

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
Maestría en Ecohidrología

Tesis de Maestría en Ecohidrología

Para la obtención del título de
Magíster en Ecohidrología

**EVALUACIÓN QUÍMICA AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO DE LA
CUENCA DEL RIO CHICÚ. SABANA DE BOGOTÁ, COLOMBIA**

Cristian Camilo López Velandia, Licenciado en Química, Universidad Pedagógica Nacional.

Director: Carlos Molano Cajigas, Ingeniero Civil, Universidad de los Andes (Colombia),
Magister en Ingeniería Hidrológica del Instituto de Ingeniería Hidráulica y Ambiental IHE-
UNESCO en Delft (Holanda).

Codirectora: Nilda González, Licenciada en Geología, Universidad Nacional de la Plata
(Argentina).

La Plata, Buenos Aires, 10 de noviembre de 2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
Maestría en Ecohidrología

Tesis de Maestría en Ecohidrología

Para la obtención del título de
Magíster en Ecohidrología

**EVALUACIÓN QUÍMICA AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO DE LA
CUENCA DEL RIO CHICÚ. SABANA DE BOGOTÁ, COLOMBIA**

Cristian Camilo López Velandia, Licenciado en Química, Universidad Pedagógica Nacional.

Director: Carlos Molano Cajigas, Ingeniero Civil, Universidad de los Andes (Colombia),
Magister en Ingeniería Hidrológica del Instituto de Ingeniería Hidráulica y Ambiental IHE-
UNESCO en Delft (Holanda).

Codirectora: Nilda González, Licenciada en Geología, Universidad Nacional de la Plata
(Argentina).

La Plata, Buenos Aires, 10 de noviembre de 2016



A mi madre, brindarme el apoyo, paciencia y energía para soportar la ardua tarea de terminar este trabajo.

A mi padre, por apoyarme y darme energía positiva para poder culminar con esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a tantas personas que hicieron parte en el desarrollo de esta tesis. Inicialmente a el Ingeniero Rómulo Camacho y su asistente Fanny Ríos de la Corporación Autónoma Regional (CAR) por su ayuda en torno a la obtención de los permisos de ingreso a los predios para la toma de muestras de agua subterránea.

A la profesora Msc. Dora Luz Gómez y a la Universidad Pedagógica Nacional, Departamento de Química, que me abrieron sus puertas con el fin de poder realizar el análisis fisicoquímico de estas muestras, a su vez agradezco infinitamente a los estudiantes Hanzel Suarez, Andrea Duque y Miguel Solórzano por su colaboración a la hora de los muestreos y análisis químico.

A mi Director y codirectora cuya ayuda fue inconmensurable en torno a la dirección de este trabajo.

A las personas en los municipios de Tabio y Tenjo, que amablemente me abrieron las puertas de sus hogares y las llaves de sus pozos para poder extraer el agua tan necesaria para completar esta investigación.

A la alcaldía de Tenjo que me suministró el transporte para poder acceder a esos sitios tan remotos que conforman la cuenca del Rio Chicú.

A mis compañeros que cada viernes me acompañaron sin desfallecer a recibir nuestras clases en la Facultad.

Por último, pero no menos importante a mi madre que me dio la fortaleza para continuar esta investigación y me soporto todos los días diciendo “Tengo que terminar la tesis”. A mi padre que me brindo la tranquilidad para poder concluir este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. FUNDAMENTOS DE LA ELECCIÓN DEL TEMA Y ANTECEDENTES SUMARIOS ...	19
1.2. OBJETIVOS.....	22
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	22
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.3. RESULTADOS ESPERADOS.....	22
2. INFORMACIÓN GENERAL	25
2.1. METODOLOGÍA	25
2.2. LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN	25
2.3. POBLACIÓN Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS	25
2.4. VÍAS DE COMUNICACIÓN.....	26
3. HIDROLOGÍA	28
3.1. METODOLOGÍA	28
3.1.1. INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA PRELIMINAR.....	28
3.1.2. ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN.....	28
3.1.2.1. Estimación de Datos Faltantes	28
3.1.2.1.1. Método de Regresión Lineal Múltiple	28
3.1.2.1.2. Método de Cociente Normal.....	29
3.1.2.2. Análisis Temporal de la Precipitación y Temperatura	29
3.1.2.3. Análisis Espacial de la Precipitación.....	29
3.1.3. BALANCE HÍDRICO	30
3.1.3.1. Evapotranspiración Potencial (ETP).....	30
3.1.3.2. Reserva de Agua Útil (RAU).....	31
3.1.3.3. Almacenamiento de humedad en el suelo (Alm_t)	32
3.1.3.4. Diferencia de humedad en el suelo (ΔAlm_t)	32
3.1.3.5. Evapotranspiración Real (ETr).....	32
3.1.3.6. Déficit de humedad en el Suelo (Def)	32
3.1.3.7. Exceso de Humedad en el Suelo (Exc)	32
3.1.3.8. Almacenamiento en la cuenca y descarga fluvial (S).....	33
3.1.3.9. Infiltración (Inf).....	33
3.1.3.10. Cálculos para la realización del balance hídrico de Thornthwaite-Mather.....	33
3.2. CLIMA, HIDROLOGÍA Y VEGETACIÓN.....	34
3.3. PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	35
3.3.1. PRECIPITACIÓN.....	35
3.3.1.1. Análisis Estacional de la Precipitación.....	37
3.3.1.2. Análisis Espacial de la Precipitación.....	38
3.3.1.2.1. Elaboración de mapas de isohietas para la precipitación intermensual	38
3.3.1.3. Análisis Espacial de la Precipitación.....	39
3.3.1.3.1. Precipitación Media Intermensual (Normal: 25 años; 1987 – 2012).....	39
3.3.1.3.2. Precipitación Media Intermensual para el mes de julio (Normal: 25 años; 1987 – 2012)	39
3.3.1.3.3. Precipitación Media Intermensual para el mes de octubre (Normal: 25 años; 1987 – 2012).....	39
3.3.2. TEMPERATURA	39
3.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)	40
3.3.4. SUELOS.....	40
3.3.4.1. Suelos de Planicie	40

3.3.4.1.1.	Complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, Símbolo RLQ. Fase RLQa 41	
3.3.4.1.2.	Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands. Símbolo RLO. Fase: RLOa.....	41
3.3.4.2.	Suelos de Montaña.....	41
3.3.4.2.1.	Consociación Typic Eutrudepts. Símbolo MLS Fase MLSg.....	41
3.3.4.2.2.	Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts. Símbolo MLV Fases MLVe, MLVf.....	42
3.3.4.2.3.	Complejo Pachic Melanudands - Typic Hapludands – Andic Dystrudepts. Símbolo MLK. Fase: MLKc, MLKd.....	42
3.3.4.2.4.	Asociación Typic Hapludands – Pachic Melanudands- Humic Lithic Dystrustepts. Símbolo MGT Fase MGTd.....	43
3.3.5.	COBERTURA Y USO DE SUELOS.....	43
3.3.5.1.	Zonas Urbanas (Zu).....	43
3.3.5.2.	Zonas Agrícolas y Ganaderas (T).....	44
3.3.5.2.1.	Categoría TF2-y.....	44
3.3.5.3.	Zonas esencialmente agrícolas (C).....	44
3.3.5.3.1.	Categoría CF1-x.....	44
3.3.5.3.2.	Categoría CF2-s.....	44
3.3.5.4.	Zonas esencialmente de pastoreo (P).....	45
3.3.5.4.1.	Categoría PF1-t.....	45
3.3.5.4.2.	Categoría PF2-r.....	45
3.3.5.5.	Zonas de Vegetación Natural o Artificial (B, V, RF).....	45
3.3.5.5.1.	Categoría BF1.....	45
3.3.5.5.2.	Categoría VN1.....	46
3.4.	BALANCE HÍDRICO.....	46
3.4.1.	ANÁLISIS ESTACIONAL.....	46
3.4.2.	ANÁLISIS ESPACIAL.....	47
4.	<u>GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA.....</u>	51
4.1.	METODOLOGÍA.....	51
4.2.	ESTUDIOS ANTERIORES.....	51
4.3.	GEOGRAFÍA FÍSICA.....	51
4.3.1.	ZONA PLANA.....	51
4.3.2.	ZONA MONTAÑOSA.....	51
4.3.3.	ZONA DE COLINAS SUAVES.....	52
4.4.	ESTRATIGRAFÍA.....	52
4.4.1.	ESTRATIGRAFÍA REGIONAL.....	52
4.4.2.	ESTRATIGRAFÍA LOCAL.....	53
4.4.2.1.	Formación Chipaque (Ksc).....	53
4.4.2.2.	Grupo Guadalupe.....	53
4.4.2.2.1.	Formación Arenisca Dura (Kgd).....	54
4.4.2.2.2.	Formación Plaeners (Kgpl).....	55
4.4.2.2.3.	Formación Labor y Tierna (Kgl).....	55
4.4.2.3.	Formación Guaduas (TKgu).....	56
4.4.2.4.	Formación Bogotá (Teb).....	57
4.4.2.4.1.	Conjunto Inferior (Tebi – E ₁ b).....	57
4.4.2.4.2.	Conjunto Superior (Teb _s – E ₂ b).....	57
4.4.2.5.	Depósitos Cuaternarios.....	57

4.4.2.5.1.	Depósitos de Terraza Alta (Qta).....	57
4.4.2.5.2.	Depósitos Aluviales (Qal).....	57
4.4.2.5.3.	Depósitos Coluviales (Q _{2c}).....	58
4.5.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	58
4.5.1.	SECTOR NOROESTE.....	58
4.5.2.	SECTOR SURESTE.....	59
4.6.	GEOLOGÍA ECONÓMICA.....	59
5.	INVENTARIO DE POZOS, ALJIBES Y MANANTIALES.....	61
5.1.	METODOLOGÍA.....	61
5.2.	RESULTADOS DEL INVENTARIO.....	61
5.2.1.	POZOS.....	61
5.2.2.	ALJIBES.....	62
5.2.3.	MANANTIALES.....	62
5.3.	RED DE MONITOREO.....	63
6.	HIDROGEOLOGÍA.....	66
6.1.	METODOLOGÍA.....	66
6.2.	ESTUDIOS ANTERIORES.....	66
6.3.	CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGÍA.....	66
6.4.	EL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD Y SUS LIMITACIONES.....	66
6.4.1.	METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD.....	68
6.4.1.1.	Método GOD.....	68
6.5.	ESTRUCTURA HIDROGEOLÓGICA REGIONAL DE LA SABANA DE BOGOTÁ.....	69
6.5.1.	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	70
6.5.1.1.	Rocas porosas/fracturadas con gran a moderada importancia hidrogeológica.....	71
6.5.1.1.1.	Acuífero Formación Arenisca Dura (K _{2d}).....	71
6.5.1.1.2.	Acuífero Formación Labor y Tierna (K _{2t}).....	71
6.5.1.2.	Sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica.....	71
6.5.1.2.1.	Acuífero Formación Sabana (Q _{1sa}).....	72
6.5.1.2.2.	Acuífero Formación Chía (Q _{2ch}).....	72
6.5.1.3.	Rocas porosas/fracturadas con poca importancia hidrogeológica.....	72
6.5.1.3.1.	Acuitardo Formación Guaduas (K _{2E1g}).....	72
6.5.1.3.2.	Acuitardo Formación Plaeners (K _{2p}).....	73
6.5.1.4.	Sedimentos y rocas porosas/fracturadas sin importancia hidrogeológica.....	73
6.5.1.4.1.	Depósitos Coluviales (Q _{2c}) y Cuaternarios sin diferenciar (Q).....	73
6.5.1.4.2.	Formación Chipaque (K _{sc}).....	73
6.6.	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LOS ACUÍFEROS DE MAYOR INTERÉS.....	75
6.6.1.	ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA.....	75
6.6.1.1.	Análisis de Niveles Freáticos.....	75
6.6.1.2.	Análisis Espacial de los Niveles Freáticos.....	76
6.6.1.2.1.	Elaboración de mapas de Niveles Freáticos para los años 1998, 2007, 2011 y 2012 de la zona de estudio.....	76
6.6.1.2.2.	Niveles Freáticos para el año 1998.....	78
6.6.1.2.3.	Niveles Freáticos para el año 2007.....	78
6.6.1.2.4.	Niveles Freáticos para el año 2011.....	78
6.6.1.2.5.	Niveles Freáticos para el año 2012.....	79
6.6.1.2.6.	Variación Interanual del nivel freático 1998 – 2007.....	79
6.6.1.2.7.	Variación Interanual del nivel freático 2007 – 2011.....	79
6.6.1.2.8.	Variación Interanual del nivel freático 2011 – 2012.....	80

6.6.2.	VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO SEGÚN MÉTODO GOD.....	80
6.6.2.1.	Tipo de Acuífero (Groundwater Occurrence).....	80
6.6.2.2.	Litología de la cobertura (Overall Aquifer Class).....	81
6.6.2.3.	Profundidad del nivel de agua (Depth to Groundwater).....	81
6.6.2.4.	Indicador de Vulnerabilidad de polución del acuífero.....	81
6.6.2.5.	Evaluación espacial del indicador de vulnerabilidad de polución del acuífero.....	81
7.	<u>HIDROGEOQUÍMICA I</u>	83
7.1.	MARCO TEÓRICO.....	83
7.1.1.	REVISIÓN DE INFORMACIÓN ANTECEDENTES.....	83
7.1.1.1.	Estudio Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá: Hidrogeología de la Cuenca del Río Chicú	83
7.1.1.2.	Estudio Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá: Sector Tibitó – Salto de Tequendama y Oriente Bogotano, Sabana de Bogotá.....	84
7.1.1.3.	Plan de Manejo Ambiental realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.....	85
7.1.2.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	87
7.1.2.1.	Origen de las sustancias disueltas en el agua subterránea.....	87
7.1.2.2.	Sustancias disueltas en el agua subterránea.....	89
7.1.2.2.1.	Cationes Mayoritarios.....	90
7.1.2.2.1.1.	Sodio (Na ⁺).....	90
7.1.2.2.1.2.	Potasio (K ⁺).....	90
7.1.2.2.1.3.	Calcio (Ca ²⁺).....	91
7.1.2.2.1.4.	Magnesio (Mg ²⁺).....	91
7.1.2.2.2.	Aniones Mayoritarios.....	92
7.1.2.2.2.1.	Cloruro (Cl ⁻).....	92
7.1.2.2.2.2.	Sulfato (SO ₄ ²⁻).....	92
7.1.2.2.2.3.	Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), Carbonato (CO ₃ ²⁻) y Dióxido de carbono (CO ₂).....	93
7.1.2.2.2.4.	Nitratos (NO ₃ ⁻).....	94
7.1.2.2.3.	Elementos Minoritarios o Traza.....	96
7.1.2.2.3.1.	Hierro.....	96
7.1.2.2.3.2.	Cobre.....	97
7.1.2.2.3.3.	Plomo.....	97
7.2.	METODOLOGÍA.....	98
7.2.1.	MUESTREO.....	98
7.2.1.1.	Materiales de muestreo y procedimiento de lavado.....	98
7.2.1.2.	Etiquetado de botellas y cuaderno de campo.....	98
7.2.1.3.	Procedimiento en campo.....	99
7.2.1.3.1.	Purga de la captación y método de toma de la muestra.....	99
7.2.1.3.2.	Análisis en campo.....	99
7.2.1.3.3.	Preservación de Muestras.....	100
7.2.2.	ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	100
7.2.2.1.	Equipamiento Instrumental y técnicas utilizadas.....	100
7.2.2.2.	Tratamiento preliminar de la muestra.....	101
7.2.2.3.	Preparación de reactivos y disoluciones patrón.....	101
7.2.2.3.1.	FAAS.....	101
7.2.2.3.2.	Volumetría.....	102
7.2.2.3.3.	Gravimetría.....	102
7.2.2.3.4.	Potenciometría.....	102

7.2.2.3.5. Espectrofotometría UV/VIS	102
7.2.2.4. Condiciones Experimentales	102
7.2.2.4.1. FAAS.....	102
7.2.2.4.2. Espectrofotometría UV/VIS	103
7.3. RESULTADOS	103
7.3.1. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	103
7.3.2. BASE DE DATOS HIDROQUÍMICOS	104
7.3.3. ANÁLISIS EXPLORATORIO.....	107
7.3.3.1. Muestreo julio/2014	107
7.3.3.2. Muestreo octubre/2014.....	108
7.3.4. COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA.....	110
7.3.4.1. Carbonato sódico residual (RSC, por sus siglas en inglés).....	113
7.3.4.1.1. Muestreo julio/2014	113
7.3.4.1.2. Muestreo octubre/2014	113
7.3.4.2. Porcentaje de sodio Posible (PSP).....	113
7.3.4.2.1. Muestreo julio/2014.....	114
7.3.4.2.2. Muestreo octubre/2014	115
7.3.4.3. Otros indicadores	115
7.3.4.3.1. Muestreo julio/2014	115
7.3.4.3.2. Muestreo octubre/2014	115
7.3.5. HIDROQUÍMICA GENERAL	116
7.3.5.1. Facies Hidroquímicas	116
7.3.5.2. Relaciones Iónicas	118
7.3.5.3. Análisis Multivariante.....	123
7.3.5.3.1. Análisis de conglomerados jerárquico (HCA)	125
7.3.5.3.1.1. Muestreo julio/14.....	125
7.3.5.3.1.2. Muestreo octubre/14	127
7.3.5.3.2. Análisis de componentes principales.....	129
7.3.5.3.2.1. Muestreo julio/14.....	129
7.3.5.3.2.2. Muestreo octubre/14	134
8. HIDROGEOQUÍMICA II	141
8.1. METODOLOGÍA	141
8.2. MARCO TEÓRICO	141
8.2.1. KRIGING	141
8.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL PARA LAS VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS.....	142
8.3.1. PARÁMETROS PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	143
8.3.2. EVOLUCIÓN DE LAS FACIES HIDROQUÍMICAS	145
8.3.3. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)	148
8.3.4. TEMPERATURA (T).....	148
8.3.5. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (TDS).....	149
8.3.6. SODIO (Na ⁺).....	149
8.3.7. POTASIO (K ⁺).....	150
8.3.8. CALCIO (Ca ²⁺).....	150
8.3.9. MAGNESIO (Mg ²⁺)	151
8.3.10. BICARBONATO (HCO ₃ ⁻)	151
8.3.11. SULFATO (SO ₄ ²⁻)	152
8.3.12. CLORURO (Cl ⁻)	152

8.3.13. NITRATOS (NO ₃ ⁻).....	153
8.3.14. HIERRO (FE).....	153
8.3.15. COBRE (CU).....	154
9. CONCLUSIONES	156
10. RECOMENDACIONES	167
11. BIBLIOGRAFÍA	168
1. ANEXO 1.	178
2. ANEXO 2.	186
3. ANEXO 3.	191
4. ANEXO 4.	194
5. ANEXO 5.	202
6. ANEXO 6.	202
7. ANEXO 7.	202
8. ANEXO 8.	202

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Caracterización de áreas sembradas y cosechadas. Cultivo de Papa. Departamento de Cundinamarca	26
Figura 3.1. El reservorio del suelo y cómo se conecta con el caudal de descarga en la salida de la cuenca, Qo.....	30
Figura 3.2. Boxplot Estaciones climatológicas seleccionadas en la zona de estudio.....	36
Figura 3.3. Variables ordenadas y coloreadas según correlación	37
Figura 3.4. Climatograma de la estación Providencia Gja.....	38
Figura 3.5. Hietograma de la estación Tabio.....	38
Figura 3.6. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de precipitación espacial.....	38
Figura 3.7. Resultado de BHC para el uso de suelo Zu.	47
Figura 3.8. Resultado de BHC para el uso de suelo PF1-t.....	47
Figura 4.1. Zona Plana, Municipio de Tabio.....	51
Figura 4.2. Zona Montañosa, Municipio de Tenjo	51
Figura 4.3. Zona de Colinas Suaves, Municipio de Tabio.....	51
Figura 4.4. Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá	52
Figura 4.5. Columna Estratigráfica Generalizada.....	54
Figura 6.1. Sistema empírico para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero.....	68
Figura 6.2. Esquema estructural de la Sabana de Bogotá	70
Figura 6.3. Boxplot Niveles freáticos de los años 1998, 2007, 2011 2012 en la zona de estudio	75
Figura 6.4. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de niveles freáticos: A) Año 1998; B) Año 2007; C) Año 2011; D) Año 2012; E) Diferencia Años 1998 – 2007; F) Diferencia Años 2007 – 2011; G) Diferencia Años 2011 – 2012.....	77
Figura 7.1. Flujos predominantes en un acuífero	88
Figura 7.2. Secuencia de Chevotareb.....	89
Figura 7.3. Distribución de las especies del ácido carbónico como porcentajes del contenido total de carbono, CT.	94
Figura 7.4. Diagrama de Pourbaix para el hierro en función del Eh y pH a 25 °C y 1 atm de presión.....	96

Figura 7.5. Etiquetas para la toma de muestras.....	99
Figura 7.6.a. Boxplot resultado de concentraciones de iones mayoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de julio/2014	108
Figura 7.6.b. Boxplot resultado de concentraciones de iones minoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de julio/2014	108
Figura 7.6.c. Boxplot resultado de determinaciones <i>in-situ</i> y de TDS de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de julio/2014.....	108
Figura 7.7.a. Boxplot resultado de concentraciones de iones mayoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de octubre/2014.....	109
Figura 7.7.b. Boxplot resultado de concentraciones de iones minoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de octubre/2014.....	109
Figura 7.7.c. Boxplot resultado de determinaciones <i>in-situ</i> y de TDS de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de octubre/2014	110
Figura 7.8.a. Diagrama de Piper para las muestras tomadas del Acuífero de Sedimentos Chía y Sabana, Cuenca del Río Chicú, Cundinamarca, Colombia (Muestreo julio/14)...	117
Figura 7.8.b. Diagrama de Piper para las muestras tomadas del Acuífero de Sedimentos Chía y Sabana, Cuenca del Río Chicú, Cundinamarca, Colombia (Muestreo octubre/14).	117
Figura 7.9.a. Relaciones Iónicas entre iones mayoritarios y minoritarios analizados (julio/14).	119
Figura 7.9.b. Relaciones Iónicas entre iones mayoritarios y minoritarios analizados (octubre/14).	119
Figura 7.10. Relaciones Iónicas entre iones a) $\text{Na}^+:\text{HCO}_3^-$; b) $\text{K}^+:\text{SO}_4^{2-}$; c) $\text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^-$..	120
Figura 7.11. Relación iónica $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^- : (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$	120
Figura 7.12. Relación Iónica CAI-1: CAI-2	121
Figura 7.13. Relación Iónica Cationes mayoritarios menos cloruro: Bicarbonato	122
Figura 7.14. Relación Iónica Cationes mayoritarios menos cloruro: Bicarbonato más Sulfato	122
Figura 7.15. Relación Iónica $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} : \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	122
Figura 7.16. Relaciones iónicas $\text{Ca}^{2+} : \text{HCO}_3^-$	123
Figura 7.17. Relaciones iónicas $\text{Ca}^{2+} : \text{SO}_4^{2-}$	123
Figura 7.18. Dendograma HCA modo-R muestreo julio	125
Figura 7.19. Dendograma HCA modo-Q muestreo julio	127
Figura 7.20. Dendograma HCA modo-R muestreo octubre.....	128
Figura 7.21. Dendograma HCA modo-Q muestreo octubre.....	129
Figura 7.22. Gráfico de valores propios	130
Figura 7.23. Diagrama de dispersión PC1: PC2.....	131
Figura 7.24. Diagrama de dispersión PC2: PC3.....	132
Figura 7.25. Grafica de componentes principales modo Q; a)Diagrama de dispersión PCA1: PCA2; b) Diagrama de dispersión PCA1: PCA3; c)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA2 modo Q; d)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA3 modo Q; e)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA2; f)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA3	134
Figura 7.26. Gráfico de valores propios	134
Figura 7.27. Diagrama de dispersión PC1: PC2.....	135
Figura 7.28. Diagrama de dispersión PC1: PC3.....	136
Figura 7.29. Grafica de componentes principales modo Q; a)Diagrama de dispersión PCA1: PCA2; b) Diagrama de dispersión PCA1: PCA3; c)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA2 modo Q; d)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA3 modo Q; e)Agrupación	

según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA2; f)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA3	137
Figura 8.1. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de variación hidrogeoquímica julio/14: A) pH; B) T; C)TDS; D) Na ⁺ ; E) K ⁺ ; F)Ca ²⁺ ; G) Mg ²⁺ ; H) HCO ₃ ⁻ ; I) SO ₄ ²⁻ ; J) N-NO ₃ ⁻ ; K) Fe; L) Cu	144
Figura 8.2. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de variación hidrogeoquímica octubre/14: A) pH; B) T; C)TDS; D) Na ⁺ ; E) K ⁺ ; F)Ca ²⁺ ; G) Mg ²⁺ ; H) HCO ₃ ⁻ ; I) SO ₄ ²⁻ ; J) N-NO ₃ ⁻ ; K) Fe; L) Cu	144
Figura A4.1. Acuífero Libre o no-confinado.....	196
Figura A4.2. Acuífero Confinado.....	197
Figura A4.3. Acuífero Semi-confinado	197
Figura A4.4. Porosidad eficaz.....	198
Figura A4.5. Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados.....	198
Figura A4.6. Transmisividad en acuíferos bajo régimen de explotación.....	199
Figura A4.7. Coeficiente de almacenamiento en un acuífero confinado.....	200

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Población de los municipios insertos en la cuenca 2005 y proyección a 2014	25
Tabla 2.2. Área cubierta por fincas con cultivos de papa	25
Tabla 3.1. Número máximo diario de horas de sol según latitud Norte.....	31
Tabla 3.2. Valores de capacidad de retención de humedad por cobertura y textura	31
Tabla 3.3. Resumen de los cálculos para el balance de Thornthwaite-Mather.....	34
Tabla 3.4. Estaciones Climatológicas e Hidrometeorológicas presentes en la Zona de Estudio.....	35
Tabla 3.5. Estaciones climatológicas seleccionadas en la zona de estudio	37
Tabla 3.6. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de precipitación espacial.	38
Tabla 3.7. Resultados Evapotranspiración Potencial según el modelo de Thornthwaite ..	40
Tabla 3.8. Valores de recarga anual de las series de suelo en la Cuenca	48
Tabla 5.1. Datos Generales de los Pozos	62
Tabla 5.2. Puntos de extracción de agua subterránea que conforman la red de monitoreo	64
Tabla 6.1. Características hidrogeológicas de la Cuenca del Río Chicú.....	74
Tabla 6.2. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de niveles freáticos.....	76
Tabla 6.3. Semáforo de Colores para mapa de vulnerabilidad.....	80
Tabla 7.1. Resultados Plan de Manejo Ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica.	84
Tabla 7.2. Resultados Plan de Manejo Ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica.	85
Tabla 7.3. Técnicas y equipos utilizados para el análisis de aguas.....	101
Tabla 7.4. Condiciones de trabajo para la determinación de cationes por FAAS	103
Tabla 7.5.a. Concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de julio/2014	105
Tabla 7.5.b. Concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de octubre/2014.....	106

Tabla 7.6. Valores medios de concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de julio/2014	107
Tabla 7.7. Valores medios de concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de octubre/2014.....	109
Tabla 7.8.a. Indicadores de calidad para riego y evolución hidroquímica julio/2014.....	112
Tabla 7.8.b. Indicadores de calidad para riego y evolución hidroquímica octubre/2014 .	112
Tabla 7.9. Clasificación de aguas para riego de acuerdo con el contenido de RSC.....	113
Tabla 7.10. Clasificación de aguas para riego según su salinidad efectiva	114
Tabla 7.11. Guía para la interpretación de la calidad de agua para irrigación ¹	115
Tabla 7.12. Valores propios y varianza acumulada para cada factor	130
Tabla 7.13. Matriz de coordenadas Varimax.....	132
Tabla 7.14. Valores propios y varianza acumulada para cada factor	134
Tabla 7.15. Matriz de coordenadas Varimax.....	135
Tabla 8.1. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de variación hidrogeoquímica para el mes de julio/14	146
Tabla 8.2. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de variación hidrogeoquímica para el mes de octubre/14.....	147
Tabla A4.1. Clasificación de las formaciones hidrogeológicas según su transmisividad (m ² /día).....	199
Tabla A4.2. Valores típicos de coeficiente de almacenamiento.....	201

ÍNDICE DE PLANOS

	Pág.
Plano 1. Mapa de Localización Cuenca del Río Chicú.....	229
Plano 2. Mapa de Isohietas Media intermensual.....	230
Plano 3. Mapa de Isohietas Media Mensual de julio.....	231
Plano 4. Mapa de Isohietas Media Mensual de octubre.....	232
Plano 5. Mapa de Suelos Cuenca del Río Chicú.....	233
Plano 6. Mapa de uso de suelos Cuenca del Río Chicú.....	234
Plano 7. Mapa de Ecurrimiento para el mes de julio.....	235
Plano 8. Mapa de Ecurrimiento para el mes de octubre.....	236
Plano 9. Mapa de Infiltración para el mes de octubre.....	237
Plano 10. Mapa Geológico Cuenca del Río Chicú.....	238
Plano 11. Mapa de Localización de Pozos Censo de Usuarios de Agua Subterránea.....	239
Plano 12. Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Año 1998.....	240
Plano 13. Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Año 2007.....	241
Plano 14. Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Año 2011.....	242
Plano 15. Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Año 2012.....	243

Plano 16.	Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Variación 1998 -	
	2007.....	244
Plano 17.	Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Variación 2007 -	
	2011.....	245
Plano 18.	Mapa de Nivel Freático Acuífero Formación Sabana y Chía Variación 2011 -	
	2012.....	246
Plano 19.	Mapa de Indicadores de Vulnerabilidad Método GOD.....	247
Plano 20.	Mapa de Variación Hidroquímica Facies Hidroquímicas.....	248
Plano 21.	Mapa de Variación Hidroquímica Potencial de Hidrógeno (pH).....	259
Plano 22.	Mapa de Variación Hidroquímica Temperatura (T).....	250
Plano 23.	Mapa de Variación Hidroquímica Sólidos Totales Disueltos (TDS).....	251
Plano 24.	Mapa de Variación Hidroquímica Sodio (Na ⁺).....	252
Plano 25.	Mapa de Variación Hidroquímica Potasio (K ⁺).....	253
Plano 26.	Mapa de Variación Hidroquímica Calcio (Ca ²⁺).....	254
Plano 27.	Mapa de Variación Hidroquímica Magnesio (Mg ²⁺).....	255
Plano 28.	Mapa de Variación Hidroquímica Bicarbonato (HCO ₃ ⁻).....	256
Plano 29.	Mapa de Variación Hidroquímica Sulfato (SO ₄ ²⁻).....	257
Plano 30.	Mapa de Variación Hidroquímica Nitratos (N-NO ₃ ⁻).....	258
Plano 31.	Mapa de Variación Hidroquímica Hierro (Fe)	259
Plano 32.	Mapa de Variación Hidroquímica Cobre (Cu).....	260

ABSTRACT

Chicú River Basin is located at Cundinamarca department, Colombia, between the municipalities of Tabio and Tenjo and a small portion of Cota between 74°7' E – 4°45' N y 74°5' E – 4°54' N, its elevation is 2550 and 3100 meters, presenting a semi-wet cold weather with an average temperature of 13.7 ° C and an average annual rainfall of 853 mm with a bimodal distribution.

The basin presents a favor balance ($P > ETP + Ro$) in terms of available water, allowing groundwater recharge and the availability of the resource in the excess water months. The estimated recharge for the Neogene – Quaternary aquifer has a value of $1.11 \times 10^7 \text{ m}^3$ with 109.72 km^2 and $4.03 \times 10^6 \text{ m}^3$ recharging of Guadalupe Group outcrops with 38.21 km^2 , having a total annual recharge of $1.52 \times 10^7 \text{ m}^3$ for 147.93 km^2 of area.

The studied aquifer (i.e. Sabana and Chia Aquifer Formation) presents unconsolidated sediments with moderate hydrogeological importance characteristics, whose recharge due to percolation of precipitated water in the flat area and the contact areas with the Guadalupe Group Aquifer, mainly on the eastern edge of the Tenjo – Tabio Serrania and slowly vertically upward from the infrayacen aquifer water. The discharge is done through wells that exploit it, distributed along the entire flat area, evapotranspiration and finally direct discharge into Bogotá River. Comparing the ground water levels of the years 1998, 2007, 2011 and 2012, the appearance of dejections on the recharge zone and generally significant reductions in water table levels ($\approx 90 \text{ m}$) is evident. According to the GOD method, basin presents a moderate tending to low degree of intrinsic vulnerability to pollution.

Based on the use of hydrochemical indicators and multivariate statistical was found that the main process that controls the aquifer hydrogeochemistry are the reverse cation exchange processes where HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ions are involved, followed by ion enrichment processes suffering water as it moves and interacts with the aquifer sediments.

Finally, basin does not present a high degree of anthropogenic alteration in their hydrochemical due to their geological characteristics, where the greatest effects are evident in months of water table reduction, consistent with wettest months where agricultural processes are accelerated. It is also noted, dilution processes at the basin that can be considered as self-regulation and auto-remediation phenomena. Also, the exploitation and over-exploitation processes from agricultural and livestock activities that make up the majority land use of the basin, are the most significant events that generate representative alterations in regional and local flows and long-term consequence may be adverse around the acquisition of this resource for the inhabitants of the region.

RESUMEN

La Cuenca del Río Chicú se encuentra ubicada en el departamento de Cundinamarca, Colombia, entre los municipios de Tabio y Tenjo y una pequeña porción en el municipio de Cota entre $74^{\circ}7' \text{ O} - 4^{\circ}45' \text{ N}$ y $74^{\circ}5' \text{ O} - 4^{\circ}54' \text{ N}$, su elevación está comprendida entre 2550 y 3100 m.s.n.m., presentando un clima frío semihúmedo con temperatura media de 13.7°C y una precipitación media anual de 853 mm con una distribución bimodal.

Esta presenta un balance a favor ($P > \text{ETP} + \text{Ro}$) en términos de agua disponible que permite la recarga de los acuíferos y la disponibilidad del recurso en los meses de exceso hídrico. La recarga se estimó para el acuífero del Neógeno – Cuaternario con un valor de $1.11 \times 10^7 \text{ m}^3$ para 109.72 km^2 y $4.03 \times 10^6 \text{ m}^3$ de recarga para los afloramientos del Grupo Guadalupe para 38.21 km^2 , presentando una recarga total anual para un área de 147.93 km^2 de $1.52 \times 10^7 \text{ m}^3$.

El acuífero estudiado (i.e. Acuífero de Formación Sabana y Chía) presenta características de sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica, cuya recarga se debe a la percolación del agua precipitada en el área plana, en las zonas de contacto con el Acuífero Grupo Guadalupe, principalmente en el borde Oriental de la Serranía de Tenjo – Tabio y de manera lenta en forma vertical ascendente, de las aguas de acuíferos que la infrayacen. La descarga se realiza a través de los pozos y aljibes que lo explotan distribuidos a lo largo de toda la zona plana, la evapotranspiración y finalmente la descarga directa hacia el río Bogotá. Al comparar los niveles freáticos de los años 1998, 2007, 2011 y 2012 se evidencia la aparición de abatimientos sobre la zona de recarga y en general reducciones significativas de los niveles ($\approx 90 \text{ m}$). Según el método GOD la cuenca presenta un grado de vulnerabilidad intrínseco moderado tendiendo a bajo a la polución.

Con base en el uso de indicadores hidroquímicos y técnicas estadísticas multivariantes se encontró que el principal proceso que controla la hidrogeoquímica de la cuenca son los procesos de intercambio catiónico reverso en los que intervienen los iones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , seguido de los procesos de enriquecimiento iónico que sufre el agua a medida que transita e interacciona con los sedimentos del acuífero.

Finalmente, se encuentra que la cuenca no presenta un grado elevado de alteración antrópica en su hidroquímica producto de sus características geológicas, donde los mayores efectos se evidencian en meses de reducción de niveles freáticos, concordantes con meses húmedos donde los procesos agrícolas se aceleran. También se observa que la cuenca presenta procesos de dilución que pueden ser considerados como fenómenos de autorregulación y autorremediación, a su vez se advierte que los procesos de explotación y sobre-explotación generados por las actividades agrícolas y ganaderas que conforman el uso mayoritario del suelo en la cuenca, son los sucesos más significativos que producen alteraciones representativas en los flujos regionales y locales y que su consecuencia a largo plazo pueden ser adversas en torno a la adquisición de este recurso para los habitantes de la región.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN
 - 1.1. FUNDAMENTOS DE LA ELECCIÓN DEL TEMA Y ANTECEDENTES SUMARIOS
 - 1.2. OBJETIVOS
 - 1.2.1. OBJETIVOS GENERALES
 - 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS
 - 1.3. RESULTADOS ESPERADOS



1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural finito esencial para la vida, la cual se encuentra en un proceso de circulación dinámica en diferentes compartimentos de la hidrosfera, presentándose en las condiciones terrestres en los tres estados (sólido, líquido y gaseoso), siendo el estado líquido el de mayor preferencia temporal, localizándose en mayor proporción en océanos y mares, y en menor medida pero con gran relevancia para el ser humano dado que en este reservorio se ubica el 1,7 % del total de agua en el planeta tierra y el 30,1 % del total de agua dulce, es el agua subterránea (Gleick, 1993). La importancia de este último compartimiento al igual que su demanda en las últimas décadas se ha incrementado en pro del desarrollo agroindustrial del ser humano y la mejora de la calidad de vida producto del abastecimiento de este recurso a la población doméstica, industrial y agrícola que ha comenzado a crecer paulatinamente, lo cual ha producido su excesiva explotación, transformándose en una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para su uso en muchas zonas de Colombia, tales como la Sabana de Bogotá.

La problemática de este recurso surge desde varios contextos: “a escala mundial, los acuíferos [i.e. formaciones geológicas que contienen recursos hídricos utilizables] están experimentando una creciente amenaza de contaminación y problemas hidrológicos, causados por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y emprendimientos mineros, [que han generado sobreexplotación].” (Foster *et al.*, 2007). Estas actividades económicas, realizan emprendimientos de explotación del recurso “sin un adecuado conocimiento del sistema hídrico subterráneo del área, que ha provocado considerables descensos en los niveles freáticos y piezométricos.” (Van der Hammer, 1988) y contaminación de tipo biológica y química.

Para la región de estudio, enmarcada dentro de la Cuenca del Río Bogotá, el desarrollo agroindustria está fuertemente ligado con el uso del agua subterránea y su explotación, dado que esta “se ha intensificado progresivamente en los últimos quince años y se ha ampliado su aprovechamiento para consumo humano” (De Bermoudes y Quiroz, 2002), la razón particular de este suceso se produce por la insuficiencia en términos de calidad y cantidad en el área del recurso a nivel superficial para satisfacer la creciente demanda, sobre todo en las épocas de verano prolongado que acaecen en la región.

La contaminación y la sobreexplotación de los acuíferos aprovechados en esta región se encuentran en ascenso en función del tiempo, generando el detrimento de la calidad y cantidad, que provocarían a largo plazo limitaciones en su uso.

Por efectos de la utilización descontrolada e intensiva que se da en la región, es primordial realizar un control efectivo del comportamiento hidrológico y de la calidad del agua subterránea a escala temporal y espacial, para lo cual “se hace necesario el entendimiento de las variaciones espaciales y temporales del área de estudio” (Almasri and Kaluarachchi, 2005, citado en Kaown *et al.* 2012), lo cual permitirá identificar las zonas de riesgo que reciben cargas de contaminantes (e.g. fertilizantes, pesticidas, herbicidas, entre otros) desde la superficie en el tiempo.

1.1. FUNDAMENTOS DE LA ELECCIÓN DEL TEMA Y ANTECEDENTES SUMARIOS

En el desarrollo económico y crecimiento poblacional de la Sabana de Bogotá surgen sectores productivos que poseen gran demanda en torno al recurso agua, entre los que se pueden encontrar grupos de floricultores, agricultores e industriales en general. Gracias a políticas de exención de tributos y prioridad a estas empresas generadoras de empleo y capital, en la adquisición de servicios entre los que se encuentra incluido el suministro de agua, se inició la explotación intensiva de los recursos hídricos superficiales “especialmente de las cuencas de los ríos Chicú, Subachoque, Bojacá y Balsillas, lo que ocasionó la reducción de este recurso en corto plazo” (Corporación Autónoma Regional [CAR], 2008).

Como consecuencia de este suceso, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR] realizó el primer estudio de reglamentación en la cuenca del río Chicú en 1992, en el cual se dio la recomendación de no efectuar actividades de desarrollo antrópico en la zona, a fin de preservar el recurso hídrico superficial. Por esta razón, diversos sectores productivos, específicamente el sector floricultor, ante su necesidad apremiante por el agua, “recurrió a la prospección y perforación de pozos de aguas subterráneas, y se inició el aprovechamiento del acuífero freático que se encuentra en formaciones del cuaternario, pero igualmente por sobreexplotación se indujo a su agotamiento progresivo en la Sabana de Bogotá en las cuencas estudiadas” (CAR, 2008).

Por efecto de la sobreexplotación en la Sabana de Bogotá y específicamente en la cuenca del Chicú, objeto de estudio, se observaron “impactos ambientales irreversibles, tales como desecación de manantiales, humedales, quebradas, ríos, bosques rivereños, subsidencia del terreno, entre otros (Contraloría General de la Republica, 2011).

Con el fin de profundizar en el conocimiento de las aguas subterráneas en la Sabana de Bogotá, se realizaron estudios conjuntos entre la CAR, el Servicio Geológico Colombiano (SGC; anteriormente Ingeominas), el Departamento Administrativo del Medio Ambiente, actualmente Secretaria Distrital del Medio Ambiente y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), entre los cuales cabe destacar:

- “Estudio hidrogeológico cuantitativo de la Sabana de Bogotá” (1990), que permitió a la CAR acceder al conocimiento de sus sistemas acuíferos y definir un plan de manejo y administración del recurso hídrico subterráneo.
- “Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá: Hidrogeología del Sector Tibito – Salto de Tequendama y Oriente Bogotano, Sabana de Bogotá” (1991) desarrollado por el Servicio Geológico Nacional.
- Monitoreo de aguas subterráneas realizados por la CAR (2012), en conjunto con el SGC y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA)

Con base en estos trabajos específicos, la CAR en 2008 concluye en el Plan de Manejo Ambiental de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá la declaración de una Zona Crítica “para el aprovechamiento y uso de las aguas subterráneas y establecer una serie de restricciones al uso del recurso agua en dichas zonas, determinando condiciones especiales en los Módulos de consumo para uso doméstico, pecuario, riego, industriales, institucional y recreativo” (Acuerdo 31, 2005), debido que durante los últimos siete años, se han

presentado descensos en el sistema acuífero cuaternario que superan los 5 metros en las subcuencas de la Sabana de Bogotá.

En adición, en informes que pertenecen a los planes de ordenamiento territorial (P.O.T.) de los municipios (Tabio y Tenjo) que se encuentran en la cuenca en estudio, se evidencia la disponibilidad de agua para consumo humano, sin embargo debido a “la incorrecta gestión de las aguas, su inadecuada utilización y conservación exponen a los municipios en muy corto tiempo a sequías de grandes proporciones, que se agudizan (...) por las largas épocas de verano en esta zona” (Riaño, 2009), que produce en consecuencia por parte de la comunidad, la búsqueda de soluciones alternativas, tales como la explotación de aguas subterráneas en su mayoría sobre los depósitos del cuaternario que se encuentran en la zona.

En estos municipios, la extracción de agua subterránea se realiza con varios fines, según Robles y Sáenz (1990) de los 853 pozos que existían a la fecha, el 94% extraen del acuífero freático, el 1,5% se destina a abastecimiento público (acueducto del municipio de Tenjo y veredas), el 46,7% a uso doméstico, el 32,7% para ganadería, el 19,1% para riego; sin embargo, la mayoría de éstos (72,7%) no cumplen con la normativa técnica para la construcción de los mismos, lo cual provoca su mal funcionamiento, obstrucción y abandono (20%), originan el detrimento de la calidad del acuífero explotado.

Además, la calidad del acuífero se puede ver afectada a través de los pozos sépticos, utilizados por la población rural para disponer sus efluentes, “los cuales no cuentan con las condiciones técnicas de funcionamiento” (Riaño, 2009), induciendo rebosamientos de los mismos que pueden generar contaminación al acuífero freático. También, se encuentran problemáticas en torno a las actividades agrícolas, que en “la mayoría de sus cultivos, controlan sus plagas [y su producción] a través del uso de agroquímicos, los cuales contaminan cuerpos de agua, [afectando] la diversidad de insectos y aves, en algunos casos afectan al propio operario que los aplica y finalmente generan residualidad en los productos cosechados” (Riaño, 2009).

No obstante, se encuentra que sobre la zona de estudio y en específico sobre el municipio de Tenjo, se desarrolla el distrito de riego de la Ramada, el cual es un sistema desarrollado por el Ministerio de Minas y Energía en el año 1926, y administrado por la CAR, el cual permite agrupar más de 1000 productores (usuarios) a quienes se les garantiza riego y drenaje a las tierras enclavadas en sus límites, dentro de esquemas de administración y manejo del recurso hídrico con criterios de racionalización y aprovechamiento de aguas tratadas a nivel primario del río Bogotá y que sean aptas para su reutilización en usos como el riego agroindustrial (CAR, 1989).

La problemática que trae consigo este distrito, es el deterioro ambiental referente a la calidad hídrica y de los productos cosechados en la zona, debido que se ha encontrado presencia de metales pesados en el suelo y vegetales de diversos municipios aledaños a la zona de estudio por uso de agua de riego, en la cual existe presencia de elementos como Cadmio y Plomo (Miranda *et al*, 2008). En previos estudios realizados por el SGC (1997) en los horizontes del suelo en la sabana Bogotana y en específico sobre la zona en estudio, han encontrado presencia de algunos metales pesados en el suelo tales como el Cadmio (rango: 15 – 20 mg kg⁻¹ Cd), Plomo (rango: 10 - 20 mg kg⁻¹ Pb), Cobre (rango: 15 – 50 mg

kg⁻¹ Cu) entre otros, situación que puede generar la contaminación difusa del acuífero cuaternario producto de la infiltración y acumulación de estos analitos en la matriz suelo y en los sedimentos que conforman el acuífero estudiado.

Con este contexto, se hace necesario realizar estudios específicos en los cuales se evalúe los efectos generados por la actividad humana, demostrando la importancia intrínseca de los agrosistemas que se desarrollan principalmente en la zona, sobre la calidad del agua subterránea, siendo esta una oportunidad para estudiar los procesos ecohidrológicos en un sistema controlado, en el cual se pueden ilustrar efectos de alteración hidrogeoquímica producto de la actividad antrópica. La complejidad de esta temática, requiere el entendimiento de las interacciones funcionales entre la vegetación, suelo y los procesos hidrológicos a múltiples escalas (Vose *et al*, 2011).

Al concebir a la ecohidrología como una disciplina que busca mejorar el entendimiento de los factores y mecanismos hidrológicos que definen los procesos y patrones en el desarrollo natural de los ecosistemas (Rodríguez-Iturbe, 2000), la cual según el programa internacional de hidrología de la UNESCO (s.f.), se basa en la suposición que el manejo sustentable de los recursos hídricos puede ser obtenido a través de:

- Reversar la degradación y la regulación del proceso de circulación de nutrientes y agua establecidos a través del tiempo a una escala de captación.
- Aumentar la capacidad de carga del ecosistema en contra del impacto humano (resiliencia, robustez, biodiversidad, servicios ecosistémicos) para las sociedades.
- Usar las interacciones de la biota del agua como una herramienta de gestión del agua.

Con el fin de cumplir estos supuestos, es necesario operar sobre niveles demostrativos, que permiten el entendimiento del ecosistema y su comportamiento hídrico y su respuesta frente a los diversos impactos generados por el hombre, entre estos niveles podemos encontrar (UNESCO, s.f.):

- A. Información (monitoreo, colecta de datos [en campo], definición de interacciones y retroalimentaciones entre la sociedad, la biota y la hidrología.)
- B. Conocimiento (definición de patrones, descripción y explicación de procesos).
- C. Uso de conocimiento (habilidad para formular políticas, principios para la acción, solución de problemas usando soluciones del sistema, educación, implementación).
- D. Cooperación para la solución de problemas (disposición de diferentes participantes que contribuyan activa y efectivamente en la implementación de la visión ecohidrológica en el sitio de demostración).

Por estas razones, desde una perspectiva ecohidrológica enfocada a la hidrogeología e hidrogeoquímica, este proyecto procurará por:

- Obtener información hidroquímica del acuífero cuaternario explotado en la Cuenca del Río Chicú, con el fin de conocer su estado en términos de calidad hídrica en dos periodos distintos de régimen hídrico (sequía y exceso hídrico), y permitir la definición de las interacciones entre la sociedad y la respuesta que ofrece el ecosistema respecto a la presión que sobre este se ejerce.

- Evaluar el impacto del uso actual del suelo (zonas de cultivo intensivo y cultivos transitorios en su mayoría) sobre la calidad del agua subterránea presente en el acuífero Cuaternario de la Cuenca del Río Chicú, Cundinamarca, Colombia.
- Proveer información sobre las características del agua subterránea en la zona, su modo de explotación y uso, constituyendo un aporte para el conocimiento de las condiciones ambientales del acuífero estudiado.
- Proveer información sobre las características del agua subterránea en torno a su calidad y variabilidad espacial y temporal, produciendo información valiosa para los órganos de gestión del recurso y en específico a los usuarios directos del recurso.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y evaluar el impacto del uso actual del suelo sobre las condiciones hidroquímicas a nivel espacial y temporal del acuífero freático, explotado en la cuenca del río Chicú, en la Sabana de Bogotá, Colombia.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir y caracterizar las condiciones climáticas e hidrológicas de la cuenca del río Chicú, enfatizando en el sistema hídrico subterráneo.
- Caracterizar y clasificar fisicoquímicamente el agua subterránea de la cuenca del río Chicú basado en los constituyentes iónicos, tipos de agua y facies hidroquímicas.
- Identificar zonas (puntos problemáticos) que presentan conflictos respecto a la calidad hídrica del agua subterránea (contaminación por nitratos y/o metales pesados) y encontrar su relación con los usos actuales (riego, consumo humano, ganadería, entre otros) y usos de suelo a nivel espacial y temporal.

1.3. RESULTADOS ESPERADOS

La cuenca en términos hidrometeorológicos e hidrológicos presentara una variación bimodal, con dos periodos de exceso hídrico y dos periodos de sequía, siendo los periodos de exceso los momentos en los cuales se producirá la mayor recarga en el acuífero, lo cual será evidenciado por aumentos en los niveles freáticos del acuífero estudiado. La hidroquímica del acuífero presentara una gran variabilidad debido a la heterogeneidad geológica de la zona, no obstante se podrá evidenciar sobre todo en épocas de alta precipitación, la recarga local que el acuífero recibe desde las zonas montañosas que bordean dicha cuenca debido a la presencia en concentraciones altas del ion bicarbonato y a la baja conductividad eléctrica. Además se espera encontrar facies hidroquímicas con una dominancia de aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas que a medida que se sigue el flujo regional de la cuenca, presentarán un enriquecimiento de ion sodio por intercambio iónico.

Debido al alto grado de impacto antrópico de la zona, la presencia de agrosistemas y las deficiencias en la construcción de los pozos de extracción, se encontrará un porcentaje elevado de pozos con presencia del ion nitrato en correlación con la conductividad eléctrica e iones cloruro, que podrá ser indicativo de impacto ambiental por aplicación de carga

contaminante difusa debido al uso de suelo que se encuentran sobre la zona estudiada, evidenciándose con mayor efecto en la época de déficit hídrico, puesto que en esta época se genera la mayor extracción de agua subterránea por parte de los habitantes de la zona.

La presencia de metales pesados (Pb) en el agua subterránea, no presentará valores que sobrepasen los parámetros de calidad del recurso, su presencia será indicativa de contaminación, sobre todo en los sectores municipales donde se produce riego con agua importada del distrito de riego será mayor debido a la constante aplicación y acumulación de estos analitos en la matriz suelo. La presencia de Cobre, será indicativo de presencia de agroquímicos que presentan a este elemento en su composición (e.g. plaguicidas como oxiclورو de cobre o hidróxido cuproso), que se usan sobre todo en el control de cultivos de crucíferas (i.e. Brócoli, Coliflor, Repollo) que se producen en la zona. Su variabilidad espacial y temporal será influenciada por el tipo de uso de suelo que se esté generando en la superficie, puesto que esta variable generara modificaciones de tipo química por ejemplo la fluctuación del pH o potencial redox por riego o extracción de agua subterránea o por aplicación de diferentes tipos de agroquímicos, o por el periodo de régimen hídrico en que se encuentre la zona.

Finalmente, se espera encontrar con base en los datos obtenidos, que el efecto generado por la actividad antrópica, en especial la agrícola, ha generado una presión continua en el tiempo sobre el recurso hídrico subterráneo sobrepasando las características de resistencia y resiliencia del ecosistema natural, y que se hace necesario implementar tecnologías que permitan la descontaminación del recurso y la minimización del impacto generado por actividades como el riego, explotación intensiva de los pozos de extracción, además de la necesidad de educar a la población respecto al uso sostenible del agua subterránea y de los agroquímicos utilizados en su producción.

CAPÍTULO 2. INFORMACIÓN GENERAL

- 2. INFORMACIÓN GENERAL
 - 2.1. METODOLOGÍA
 - 2.2. LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN
 - 2.3. POBLACIÓN Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS
 - 2.4. VÍAS DE COMUNICACIÓN



2. INFORMACIÓN GENERAL

2.1. METODOLOGÍA

Se revisó y compiló la información bibliográfica disponible provista por las bases de datos del Servicio Geológico Colombiano [SGC], la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], el Departamento Nacional de Estadística [DANE], el Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], firmas privadas, entre otras.

2.2. LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN

La cuenca hidrográfica del Río Chicú, se encuentra localizada sobre los municipios cundinamarqueses de Tabio y Tenjo, al occidente de la sabana de Bogotá, departamento de Cundinamarca y de la Capital de la Republica de Colombia (Plano 1), ubicados en los planos del IGAC, escala 1:250000, 227-II-B, 227-II-D y 227-IV-B, con una extensión de 147.93 km².

2.3. POBLACIÓN Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS

Según el censo general del año 2005 realizado por el DANE, la población que habita estos municipios es dividida en dos categorías: la primera ubicada en la cabecera urbana y la segunda en las zonas rurales de los municipios. En la tabla 2.1 se puede encontrar un resumen de la población que habita en cada uno de estos municipios:

Tabla 2.1. Población de los municipios insertos en la cuenca 2005 y proyección a 2014

		Tenjo		Tabio	
		Personas 2005	Personas 2014*	Personas 2005	Personas 2014*
Área	Cabecera	7962	9318	9330	12787
	Resto	8645	10418	11384	13604
	Total	16607	19736	20714	26391

*Proyección de la población al año 2014

Fuente: DANE, 2005a; DANE, 2005b; DANE, 2015, modificado por el autor

Basados en los datos del DANE (2005a), sobre la cuenca habita una población aproximada de 27.991 habitantes y una población proyectada de 33.340 habitantes proyectados para el 2014, conociendo que sobre la cuenca se encuentra la totalidad del municipio de Tenjo y únicamente una zona rural del municipio de Tabio. Lo cual, en comparación con la población que habitaba la cuenca en el año 1990 de 13.687 (Robles y Sáenz, 1990) se puede notar un aumento del 204% para el periodo 1990 – 2005 (15 años) y un aumento del 119% para el periodo 2005 – 2014 (9 años proyectado).

Tabla 2.2. Área cubierta por fincas con cultivos de papa

	Área total del municipio [km ²]	Área cubierta por fincas de papa [km ²]	% cubierta por papa	Área cubierta por fincas productoras de flores [km ²]	% cubierta por Flores
Tabio	74.5	2.34	3.2	0.67	4.2

Fuente: DANE, 2001; DANE, 2011. Modificado por el Autor

Las principales actividades en el área son la agricultura de papa, cebada, hortalizas, la floricultura y la ganadería lechera.

Con respecto al cultivo de papa, el cual es una de las actividades económicas más importantes de la región cundinamarquesa y del país, se encuentra que en los municipios de Tabio y Tenjo el área total cubierta y utilizada para el cultivo de papa es del 3,2 y 5,6% del área total municipal respectivamente (Tabla 2.2.), siendo esta utilizada “durante todo el año [aprovechando] las condiciones de clima y microclima predominantes en cada municipio con la existencia escasa de uso de tierras para cultivos transitorios o permanentes, (...) [generándose una] intensificación de las siembras a principios del segundo semestre del año, y una cosecha en el primer trimestre del semestre [del año siguiente, mostrando] la estacionalidad del cultivo” (DANE, 2001) (Figura 2.1).

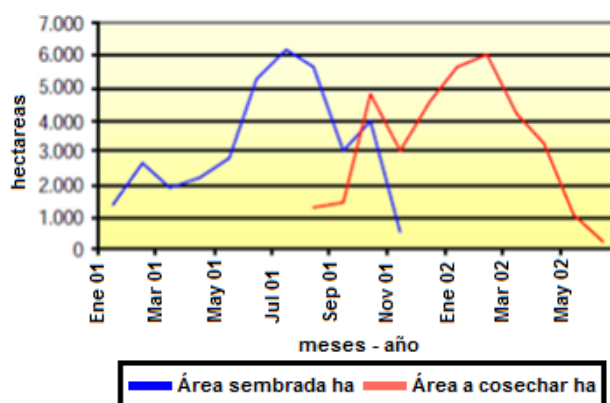


Figura 2.1. Caracterización de áreas sembradas y cosechadas. Cultivo de Papa. Departamento de Cundinamarca
Fuente: DANE, 2001

Otra actividad económica que se encuentra es la ganadería lechera, donde se produce el cultivo de pastos para ganadería y la presencia de ganado bovino en las fincas. Los municipios “tienen una evidente vocación lechera y debido a ello, el 69% de los animales son hembras (...) observándose una relación de 1,3 hectáreas por cada bovino” (DANE, 2001) del área de las fincas paperas usados para la siembra de pastos.

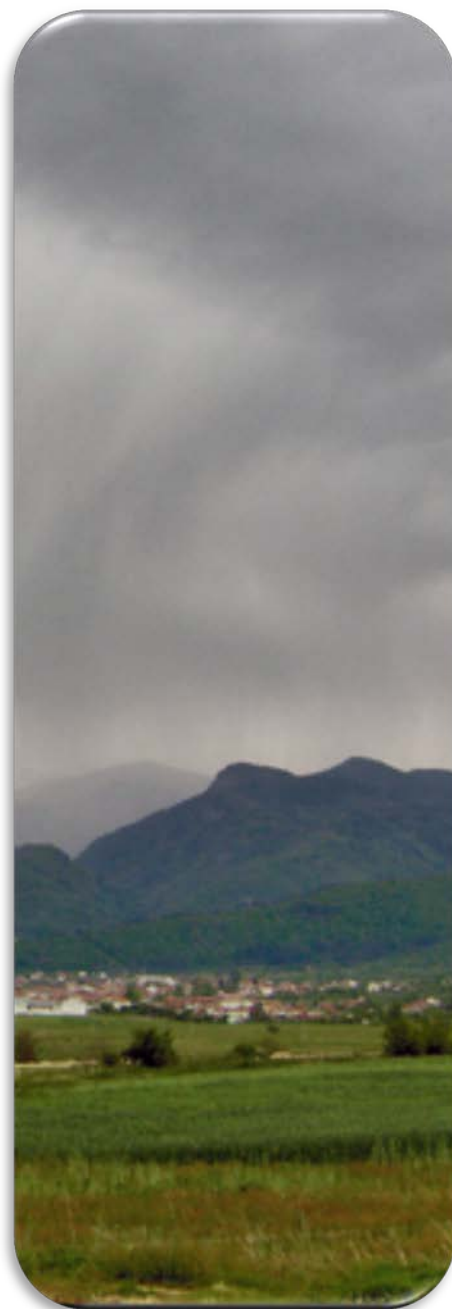
Por último, como cultivo intensivo, se encuentra la floricultura, la cual en los municipios Tabio y Tenjo presenta un área ocupada para este fin del 4.2% y 1.1% respectivamente del total del área municipal (Tabla 2.2.). En los cuales, el cultivo de las mismas se puede generar a través de invernaderos, o cultivos a cielo abierto.

2.4. VÍAS DE COMUNICACIÓN

La principal vía de comunicación es la autopista Bogotá – Medellín, la cual permite el ingreso al área por el municipio de Tenjo, la segunda es la autopista Norte, que sale de Bogotá y que posee una variante que une a los municipios de Cajicá, Chía, Tabio y Tenjo. Además, existen numerosas carreteras sin pavimentar que comunican las diversas veredas y fincas.

CAPÍTULO 3. HIDROLOGÍA

- 3. HIDROLOGÍA
 - 3.1. METODOLOGÍA
 - 3.2. CLIMA, HIDROLOGÍA Y VEGETACIÓN
 - 3.3. PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS
 - 3.4. BALANCE HÍDRICO



3. HIDROLOGÍA

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA PRELIMINAR

Se realizó la recopilación bibliográfica de la información hidrometeorológica histórica disponible de la Cuenca del Río Chicú de estudios realizados previamente, además de las bases de datos de organizaciones y entidades públicas encargadas de la gestión e investigación hídrica e hidrometeorológica, tales como la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR] y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], entre otras, teniendo en cuenta los parámetros involucrados en el balance hídrico propuesto, siendo estas la precipitación media mensual, la temperatura media mensual y uso del suelo de la zona.

3.1.2. ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN

Se recopiló la información histórica de precipitación de las estaciones controladas por la CAR y el IDEAM (Anexo 1). Con la información obtenida, se procedió a realizar el respectivo análisis de calidad de la información obtenida y la estimación de datos faltantes en las series pluviométricas.

3.1.2.1. Estimación de Datos Faltantes

Se utilizaron dos métodos de estimación de datos faltantes de acuerdo a las características de correlación entre las estaciones que presentan series de datos de comportamiento similar dentro de la misma área de influencia topoclimática (referencia) y la estación cuya serie tiene datos faltantes (estudio). Para la estación Providencia Gja., se utilizó el método de Regresión lineal Múltiple al encontrar estaciones con coeficientes de correlación: $r > 0.80$ y para la Estación Tabio, Esperanza, Santa Inés y El Hato, el método de la Razón Ponderado usando las estaciones que presentaron coeficientes de correlación entre 0.70 y < 0.80 .

3.1.2.1.1. Método de Regresión Lineal Múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple es idéntico al modelo de regresión lineal simple, con la única diferencia de que aparecen más variables explicativas (Ecuación 3.1.):

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad \text{Ec. 3.1.}$$

Para la aplicación de este método se normalizaron las series de datos (raíz cuadrada de la serie de datos) de las estaciones presentes en la zona, eliminando los datos ausentes de cada una de las series utilizadas. Para la aplicación de este método se utilizó el software R y la librería psych (Revelle, 2013).

Como consideraciones para el modelo determinado, si los coeficientes de regresión son diferentes de cero estadísticamente según prueba de t, al 5%, con un coeficiente de determinación mayor del 75% y se cumplen los siguientes supuestos: linealidad del modelo, varianza constante, independencia y normalidad de los errores, se tendría un método

estadístico para estimar los datos faltantes de la serie de estudio, simplemente reemplazando en la expresión obtenida, una vez identificado el tiempo en el cual falta el dato en la serie de tiempo, el valor correspondiente al mismo tiempo de ocurrencia del dato faltante de la serie de referencia (Medina, 2008).

3.1.2.1.2. Método de Cociente Normal

Para las restantes estaciones cuyo coeficiente de correlación no supera la barrera del valor ± 0.8 , se utilizó este método, el cual se aplica cuando la precipitación anual de cualquiera de las estaciones de referencia, difiere más del 10% de la estación con el dato faltante (Medina, 2008). Para ello, se tomó la precipitación anual de cada una de las tres estaciones y se multiplicó por la relación (cociente), entre la precipitación anual de la estación con el dato faltante y la precipitación anual de la estación de referencia (corrección estimada). Luego se obtuvo el valor faltante como al suma del producto de precipitación ocurrida en la estación de referencia y corrección estimada, dividida por 3, es decir (Ecuación 3.2.):

$$D_j = \frac{a_j p_A + b_j p_B + c_j p_C}{3} \quad \text{Ec. 3.2.}$$

Dónde:

$$p_x = \frac{\text{Precipitación media mensual estación dato faltante}}{\text{Precipitación media mensual estación de referencia } X}$$

D_j = Precipitación estimada para el mes j

a_j, b_j, c_j = Precipitación registrada en las tres estaciones de referencia el mes j

3.1.2.2. Análisis Temporal de la Precipitación y Temperatura

Se obtuvo el histograma de precipitación usando el promedio mensual interanual de precipitación para los años 1987 - 2012 (25 años) de las estaciones Providencia Gja (Cuenca Baja) y de la estación Tabio (Cuenca Alta). En torno a la temperatura media mensual, únicamente se tuvo en cuenta la estación de Providencia Gja, la cual presentaba una serie temporal completa (1987 - 2012; 25 años).

3.1.2.3. Análisis Espacial de la Precipitación

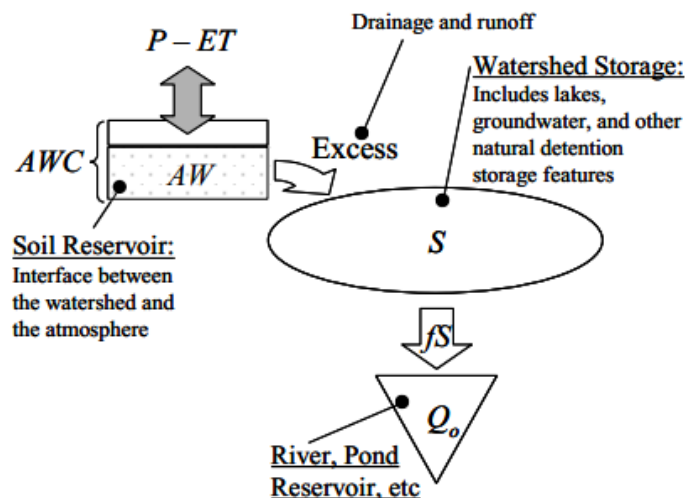
Con base en los promedios mensuales interanuales de cada estación (1987 - 2012; 25 años), se procedió a generar las isohietas para la región en estudio utilizando el software Surfer 10. Se generaron las isohietas de la precipitación media intermensual y de los meses de julio y octubre, debido que en dichos meses se da las épocas de déficit y exceso hídrico, respectivamente.

Para la generación de estos mapas se realizó la determinación y ajuste del semivariograma experimental para cada uno y se estimaron los parámetros para el modelo lineal a través del ajuste por mínimos cuadrados. Con base en estos parámetros, se realizó el Kriging ordinario de cada uno de los datos de interés (i.e. precipitación media intermensual y precipitación de los meses de julio y octubre), entendiendo al Kriging como una técnica geoestadística que trata de expresar la tendencia que se presenta los datos trabajados y se basa en la interpolación, fundamentada en la regresión contra los valores observados en las estaciones

utilizadas y los datos que lo rodean, pesados de acuerdo a los valores de covarianza espacial (i.e. semivariograma) (Bohling, 2005).

3.1.3. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico climático para la zona de estudio fue el propuesto por Thornthwaite-Mather (1955), la cual se refiere a las entradas y salidas de agua por precipitación (P) y evapotranspiración en un sistema, pudiéndose estimar la cantidad de agua que se pierde por evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas, también la cantidad de agua almacenada en el suelo y aquella que se escurre superficialmente y en profundidad (Figura 3.1.).



AWC: Reserva de Agua útil (Por sus siglas en inglés: Available Water Capacity); **AW:** Agua Disponible en el suelo (Almacenamiento, por sus siglas en inglés: Available Water); **ΔP:** Precipitación Neta; **P:** Precipitación; **ET:** Evapotranspiración Potencial

Figura 3.1. El reservorio del suelo y cómo se conecta con el caudal de descarga en la salida de la cuenca, Q_o

Fuente: Cornell Soil and Water Lab, Ecohydrology Group, Cornell University (2011)

Los cálculos para determinar el agua disponible en el suelo se desarrollaron para cada mes, usando las precipitaciones medias mensuales (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) media mensual determinada por el método de Thornthwaite.

3.1.3.1. Evapotranspiración Potencial (ETP)

Se estimó mediante el modelo propuesto por Thornthwaite (1948) los cuales están basados en la determinación de la ETP en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes (Almorox, s.f.), siendo el resultado básicamente, una relación empírica entre la ETP y la temperatura del aire, que a pesar de la simplicidad y las limitaciones obvias del método, funciona bien para las regiones húmedas (Ereño, 2012).

El modelo matemático es la siguiente (ecuación 3.3.):

$$ETP = 16K \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad \text{Ec. 3.3.}$$

Dónde: ETP: Evapotranspiración Potencial [mm/mes]

$$I = \sum i = \sum (t/5)^{1.514}$$

t = temperatura media diaria del mes [°C]

$$\alpha = 6.75 \times 10^{-9} I^3 - 7.71 \times 10^{-7} I^2 + 1.792 \times 10^{-5} I + 0.49239$$

$$K = (N/12)(d/30) \text{ [días]}$$

N = número máximo de horas de sol según la latitud [h]

d = número de días del mes.

El valor N es determinado según lo siguiente (Tabla 3.1.).

Tabla 3.1. Número máximo diario de horas de sol según latitud Norte

Mes Lat.	En	Fb	Mz	Ab	My	Jun	Jl	Ag	Sep	Oc	Nov	Dic
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
5°	11,9	12,0	12,1	12,2	12,4	12,4	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8
10°	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
15°	11,4	11,6	12,1	12,4	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
20°	11,1	11,4	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
25°	10,8	11,3	12,0	12,8	13,4	13,7	13,6	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6
30°	10,5	11,1	12,0	12,9	13,7	14,1	13,9	13,2	12,4	11,5	10,7	10,2
35°	10,2	10,9	12,0	13,1	14,1	14,6	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
40°	9,7	10,6	12,0	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,4
45°	9,2	10,4	11,9	13,6	14,9	15,6	15,3	14,1	12,5	11,0	9,5	8,8
50°	8,6	10,1	11,9	13,8	15,5	16,3	15,9	14,5	12,6	10,8	9,1	8,1
55°	7,7	9,6	11,8	14,2	16,4	17,5	17,0	15,1	12,7	10,4	8,4	7,2
60°	6,8	9,1	11,8	14,6	17,2	18,7	18,0	15,6	12,7	10,1	7,6	6,3

Unidad: Horas/día

Fuente: Chow, Maidment y Mays, 1984

3.1.3.2. Reserva de Agua Útil (RAU)

La capacidad máxima de retención de humedad depende de la textura de suelo y de la zona de actividad de las raíces (Thornthwaite y Mather, 1957, citado por Casas, Domínguez y Vela, 2011). Para la obtención de este parámetro se clasificó la capa de vegetación y sus clases texturales en la zona de estudio, utilizando los siguientes valores (Tabla 3.2.):

Tabla 3.2. Valores de capacidad de retención de humedad por cobertura y textura

Uso de Suelo y Vegetación	Textura	RAU
Asentamientos humanos, infraestructura vial, sitios de extracción de materiales, zonas sin vegetación aparente	Fina	5
	Media	5
Cultivos de Riego	Fina	100
	Media	125
Cultivos de temporal	Fina	150
	Media	200
Pastizales y matorrales (secundarios)	Fina	200
	Media	250
Vegetación natural perturbada (matorral)	Fina	250
	Media	300

xerófilocrassicaule, selva baja caducifolia, bosque de encuno y vegetación rará		
Vegetación natural conservada (selva baja caducifolia, matorral xerófilo crassicaule, bosque de encino y vegetación mixta). Incluye cauces	Fina	300
	Media	350
Cuerpo de Agua	--	60

Textura media (35% arcilla y menos 65% arena); textura fina (más de 35% de arcilla)

Fuente: Ortiz y Ortiz (1990), citado por Casas *et al* (2011).

Para la información referente a los mapas de uso de suelo y clases texturales, se tomó como base el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca, realizado por el IGAC, en donde se presenta la descripción de suelos a partir del análisis de la información existente para el departamento de Cundinamarca, reconociendo los suelos presentes en la zona de estudio.

3.1.3.3. Almacenamiento de humedad en el suelo (Alm_t)

Se refiere a la humedad que permanece en el suelo cada mes, los algoritmos matemáticos utilizados se pueden observar en la tabla 3.3.

3.1.3.4. Diferencia de humedad en el suelo (ΔAlm_t)

Siendo la variación de la humedad en el suelo entre el mes actual y el mes anterior (Ecuación 3.4.), un valor negativo implicara sustracción de agua almacenada que será usada para la evapotranspiración, mientras que un valor positivo implica infiltración de agua en el suelo (Casas *et al*, 2011).

$$\Delta Alm = Alm_t - Alm_{t-1} \quad Ec. 3.4.$$

3.1.3.5. Evapotranspiración Real (ETr)

Referida a la cantidad de agua, expresada en mm/mes, que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal, conforme a la precipitación y reservas de humedad del suelo.

3.1.3.6. Déficit de humedad en el Suelo (Def)

Es la diferencia de la ETr y ETP mes por mes (Ecuación 3.5.), donde esta variable se reduce al iniciar la temporada de lluvias hasta llegar a ser cero.

$$Def = ETr - ETP \quad Ec. 3.5.$$

3.1.3.7. Exceso de Humedad en el Suelo (Exc)

Solo presentándose en los meses lluviosos, producto de la saturación de suelo, que produce un exceso de humedad. Los algoritmos matemáticos utilizados se pueden observar en la tabla 3.3.

3.1.3.8. Almacenamiento en la cuenca y descarga fluvial (S)

Generado en los meses de exceso hídrico ($\Delta P > 0$) cuando el suelo se encuentra completamente saturado, todo el exceso de agua (i.e. el agua que excede el RAU) es almacenada en la cuenca y a su vez alimenta el escurrimiento hacia los ríos (Q_o) desde la cuenca (Ecuación 3.6.). Con el fin de estimar la lámina total de agua disponible para escurrimiento que se encuentra almacenada en la cuenca (S), se debe considerar (Casas *et al* 2011; Cornell Soil and Water Lab, Ecohydrology Group, Cornell University, 2011):

$$S_t = Exc_t + \frac{S_{t-1}}{2} \quad Ec. 3.6.$$

En torno al escurrimiento, el modelo de Thornthwaite y Mather asume que esta descarga es una fracción constante del almacenamiento en la cuenca (Ecuación 3.7.), especialmente de la descarga del agua subterránea a los ríos (i.e. suposición del reservorio lineal)

$$Q_o = fS_t \quad Ec. 3.7.$$

Donde f es el coeficiente de reservorio ($f < 1$) (caso general $f \approx 0.5$). En este trabajo, al no contar con los caudales de descarga, además que en la zona del estudio, los datos de escurrimiento son afectados por numerosas represas y captaciones de agua que dificultan y desvirtúan su cuantificación (Robles y Sáenz, 1990) sumando que la presencia de sedimentos arcillosos favorecen los procesos de escurrimiento, f será considerado con un valor de 0.8.

3.1.3.9. Infiltración (Inf)

Para su estimación, se retomó la fórmula del balance hídrico propuesta por Dunne y Leopold (1978), despejando la infiltración (Ecuación 3.8.):

$$Inf = [(P - Q_o - ETP) + Alm_t] - RAU \quad Ec. 3.8.$$

Considerándose el parámetro de almacenamiento (Alm_t) refiriéndose a la humedad que permanece en el suelo cada mes de manera que resulta en un valor positivo para la infiltración; no obstante, la humedad que queda en las raíces de las plantas (RAU) se resta para el cálculo porque es un agua que permanece solo en las raíces y no permite su percolación a capas más profundas, no produciendo recarga al acuífero (Casas *et al*, 2011).

3.1.3.10. Cálculos para la realización del balance hídrico de Thornthwaite-Mather

Teniendo en cuenta que este procedimiento tiene las siguientes consignas básicas:

1. Sí $\Delta P = P - ETP > 0 \therefore ETr \equiv ETP$
2. Sí $\Delta P = P - ETP < 0 \therefore ETr = P + \Delta Alm$

$$3. \Delta Alm = Alm_t - Alm_{t-1}$$

Se resume a continuación los cálculos propuestos para el balance hídrico (Tabla 3.3.).

Tabla 3.3. Resumen de los cálculos para el balance de Thornthwaite-Mather

Estado de Humedad Antecedente	Almacenamiento (Alm_t)	Perdida Potencial de Agua (PPaa)	Exceso (S)
<p>· <u>El suelo se está secando</u> $\Delta P < 0$</p>	$= RAU e^{\left(\frac{PPaa}{RAU}\right)}$	$= PPaa_{t-1} + \Delta P$	$= 0$
<p>· <u>El suelo se está humedeciendo</u> $\Delta P > 0$, pero $Alm_{t-1} + \Delta P \leq RAU$</p>	$= Alm_{t-1} + \Delta P$	$= RAU \ln\left(\frac{Alm}{RAU}\right)$	$= 0$
<p>· <u>El suelo se está humedeciendo sobre su capacidad</u> $\Delta P > 0$, pero $Alm_{t-1} + \Delta P > RAU$</p>	$\equiv RAU$	$= 0$	$= Alm_{t-1} + \Delta P - RAU$

ΔP : $P - ETP$; RAU : Reserva de Agua Útil; P : Precipitación; ETP : Evapotranspiración Potencial

Fuente: Cornell Soil and Water Lab, Ecohydrology Group, Cornell University (2011), editado y traducido por el autor

3.2. CLIMA, HIDROLOGÍA Y VEGETACIÓN

La región de estudio, se encuentra ubicada entre 74°7' E – 4°45' N y 74°5' E – 4°54' N, su elevación está comprendida entre 2550 y 3100 m.s.n.m.. El Clima de esta zona en general es frío semihúmedo (FsH) según la clasificación Caldas – Lang, la cual se basa en los valores de temperatura con respecto a su variación altitudinal [i.e. pisos térmicos] y no latitudinal, (...) y la efectividad de la precipitación que muestra la humedad (Gutiérrez, 1991) con una temperatura promedio mensual de 13,7 °C, una precipitación media anual de 853 mm para la estación climatológica de Providencia Gja. (Código 21205980 operada por el IDEAM) para el periodo de 1987 – 2012 (25 años).

La distribución de la precipitación en la zona es de carácter bimodal, influenciado por la Zona de Confluencia Intertropical (ITC), que determina las condiciones atmosféricas y climáticas de la zona, provocando dos periodos secos entre los meses de junio a septiembre y otro de diciembre a marzo y dos periodos lluviosos, generándose el primero entre los meses de abril y mayo cuando “la ITC se desplaza hacia el norte (...) lo cual va acompañado de un pequeño descenso en las temperaturas máximas y un aumento de las mínimas” (Eslava, 1993) y un segundo periodo lluvioso entre los meses de octubre y noviembre, en la cual “la ITC regresa a su posición norte más extrema, originando el segundo periodo lluvioso que es el más fuerte, (...) acompañado por un descenso en las temperaturas medias, disminución de las temperaturas máximas y un aumento de las mínimas (Eslava, 1993).

Por su parte la cuenca, generada por las aguas que drenan hacia el Rio Chicú (Plano 1), tiene nacimiento al noreste del municipio de Tabio, y cruza la cuenca en su parte media pasando por los municipios de Tenjo y Cota, hasta desembocar al sureste sobre el emisario principal (Rio Bogotá). Actualmente, este rio es intermitente al igual que sus afluentes, de los

cuales se destacan las quebradas Tincé y Hota Montosa, las cuales nacen en la cuchilla de Paramillo y sirven de nacimiento a este río (Alcaldía Municipal de Tabio, 2009).

Por acciones antrópicas su recorrido natural ha sido alterado, evitando el drenaje natural hacia el afluente final debido que presentan represamientos, que almacenan cantidades importantes de agua destinadas principalmente para consumo humano y el abastecimiento para veredas aledañas (Robles y Sáenz, 1990).

En términos de su uso por parte de los habitantes, la zona en estudio se encuentra ubicada en la mega zona del altiplano cundiboyancense, “la cual exhibe la máxima presión demográfica, demanda de alimentos y bienes y servicios y registra la mayor capacidad instalada de la infraestructura rural” (Consejo regional de planificación económica y social centro oriente, 1998), mostrando un uso intensivo delimitado a la zona plana, con cultivos de pasto para ganadería, esencialmente gramíneas y leguminosas forrajeadas, y cultivos transitorios de papa, cebolla, hortalizas y como principal cultivo de tipo industrial el de flores, siendo este el de mayor importancia por su crecimiento y por el uso masivo del recurso hídrico superficial y subterráneo. Por su parte, en las zonas de montaña, la vegetación natural que se presenta en la zona es de reserva boscosa primaria y zonas no forestadas, las cuales se encuentran en proceso de reducción por efectos antrópicos. Se encuentra como vegetación típica el canelo, el arrayán, el siete cueros y el riñón.

3.3. PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS

Con el fin de calcular el balance hídrico de la Cuenca del Río Chicú se utilizaron los parámetros analizados a continuación.

3.3.1. PRECIPITACIÓN

Para el análisis climatológico de la zona en estudio, se utilizó la información de precipitaciones medias mensuales de las estaciones insertas en la cuenca y algunas que la rodean (Anexo 1), administradas por el IDEAM y la CAR. En la tabla 3.4., se presentan los nombres, tipos y códigos de la estación estudiada y sus características de elevación, localización y período de registro.

Se realizó un análisis exploratorio de datos, verificando la homogeneidad de los datos de todas las series pluviométricas utilizadas a través de un análisis de doble masa ($r^2 > 0.99$). Las estaciones poseen un promedio intermensual de 67.6 ± 3.4 mm/mes (Figura 3.2.)

Tabla 3.4. Estaciones Climatológicas e Hidrometeorológicas presentes en la Zona de Estudio

Nombre	Tipo	LOCALIZACIÓN				Elev. m.s.n.m	Periodo de Registr o	Admo.
		<i>Proyección TM –</i>		<i>Proyección Elipsoidal -</i>				
		<i>Sistema de</i>	<i>Sistema de</i>	<i>Sistema de Referencia</i>				
		<i>Referencia</i>	<i>Referencia</i>	<i>MARGA - SIRGAS</i>				
		<i>MARGA -</i>	<i>SIRGAS</i>	Lat.	Long.			
		X	Y	Norte	Oeste			
STA. INÉS	PM	993400	1023000	74°08'12.2"	4°48'15.1"	2550	1980 -	CAR

TABIO	CP	998070	1035180	74°05'41.7"	4°54'51.6"	2620	1970 - 2013	CAR
PRIMAVERA LA RAMADA LA	CP	985090	1029900	74°12'42.9"	4°51'59,7"	2590	1965 - 2013	CAR
HATO EL	PM	991531	1029909	74°09'13.9"	4°52'0.0"	2575	1978 - 2013	IDEAM
ESPERANZA	PM	988634	1022777	74°10'47,9"	4°48'7.8"	2555	1974 - 2013	IDEAM
PROVIDENCIA.GJA	PM	986310	1021696	74°12'3.3"	4°47'32.6"	2560	1983 - 2013	IDEAM

PM: Pluviométrica; CP: Climatológica Principal; Lat.: Latitud; Long.: Longitud; Elev.: Elevación; m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar; Admo.: Administrado

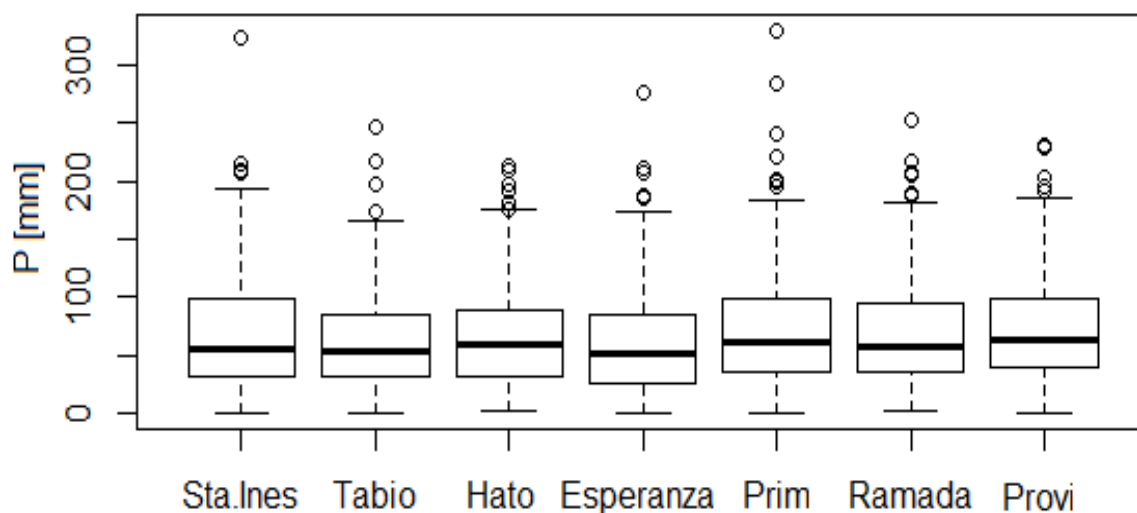


Figura 3.2. Boxplot Estaciones climatológicas seleccionadas en la zona de estudio

Posterior a la normalización (usando raíz cuadrada) y selección de las estaciones con mayor correlación ($r > 0.80$) se realizó la estimación de datos faltantes en la serie pluviométrica de la estación Providencia Gja., a través del método de regresión múltiple lineal. El modelo estadístico escogido (Ecuación 3.9.) para esta estimación responde sobre el 82% de la variabilidad de los datos analizados (adjusted $r^2 = 0.8217$).

$$Y = 0.91 + 0.28X_1 + 0.35X_2 + 0.29X_3 \quad \text{Ec. 3.9.}$$

Dónde: $Y = \sqrt{P_x \text{ Providencia}}$; $X_1 = \sqrt{P_x \text{ Sta.Ines}}$; $X_2 = \sqrt{P_x \text{ Ramada}}$; $X_3 = \sqrt{P_x \text{ Primavera}}$

En las demás estaciones analizadas, se utilizó el método del cociente normal con las estaciones que no superaron un coeficiente de correlación de ± 0.8 y presentan una variación mayor al 10% entorno a los valores de precipitación media mensual. En la aplicación de este método, se tomaron las estaciones pluviométricas que presentaba mayor correlación respecto a la estación con el dato faltante (Figura 3.3.), y fueron utilizadas con el fin de generar los pesos estadísticos aplicados en el método.

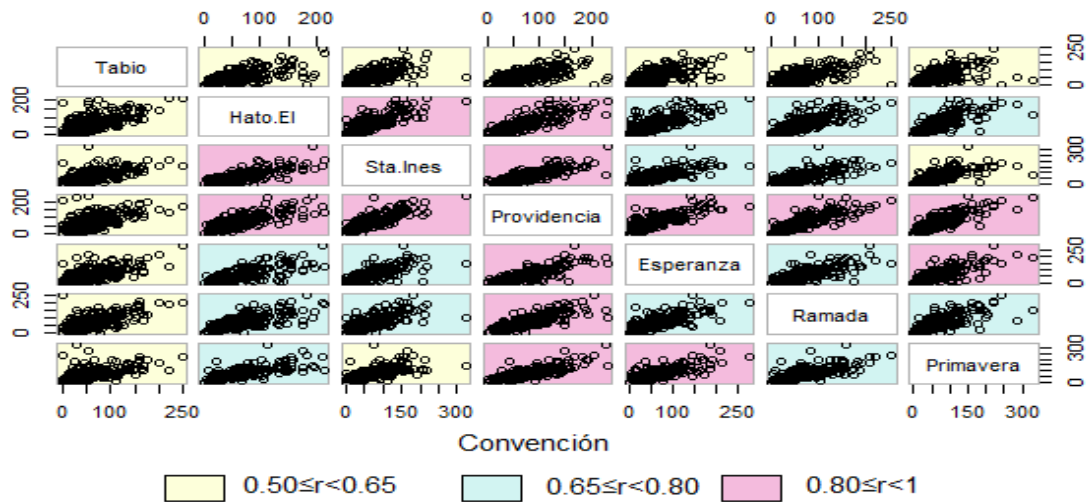


Figura 3.3. Variables ordenadas y coloreadas según correlación

Empleando series de precipitación completas de la misma longitud (1987 – 2012; 25 años), se determinaron las precipitaciones multianuales de todas las estaciones (Tabla 3.5.).

Tabla 3.5. Estaciones climatológicas seleccionadas en la zona de estudio

DATOS DE LA ESTACIÓN			P [mm/año]
Nombre	Tipo	Elev. (m.s.n.m.)	(1987 – 2012)
Providencia Gja.	PM	2556	852.9
Tabio	CP	2620	705.7
Santa Inés	PM	2551	790.1
Hato El	PM	2575	749.7
Esperanza	PM	2556	709.3

Elev.: Elevación; m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar; CP: Estación Climatológica Principal; PM: Estación Pluviométrica; P: Precipitación; mm/año: Milímetros por año

3.3.1.1. Análisis Estacional de la Precipitación

Las estaciones Providencia Gja. (Cuenca Baja) y Tabio (Cuenca Alta) presentan un comportamiento de precipitación tipo bimodal (Figuras 3.4. y 3.5.), con dos periodos lluviosos y dos secos. Los periodos lluviosos ocurren entre los meses de abril – mayo (101.9±15.6 mm, estación Providencia Gja.; 82.9±19.6 mm, estación Tabio) y octubre-noviembre (98.9±19.5 mm, estación Providencia Gja.; 78.3±17.5 mm, estación Tabio), siendo los meses más lluviosos el de abril (102.2±16.0 mm, estación Providencia Gja.; 88.6±22.7 mm, estación Tabio) y octubre (106.7±20.3 mm, estación Providencia Gja.; 83.6±16.2 mm, estación Tabio). Los periodos secos ocurren de diciembre - febrero (43.7±10.5 mm, estación Providencia Gja.; 38.5±12.4 mm, estación Tabio) y julio – septiembre (55.8±12.1 mm, estación Providencia Gja.; 54.3±12.4 mm, estación Tabio), siendo el mes más seco el mes de enero (31.2±7.2 mm, estación Providencia Gja.; 25.8±7.4 mm, estación Tabio).

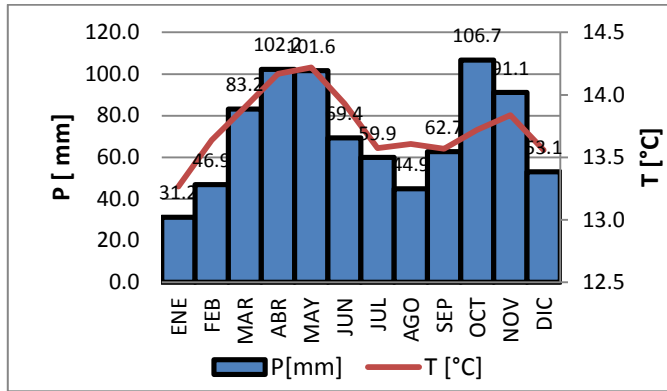


Figura 3.4. Climatograma de la estación Providencia Gja.

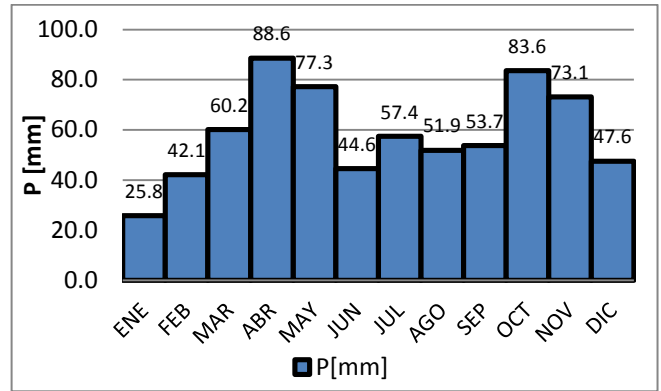


Figura 3.5. Hietograma de la estación Tabio.

3.3.1.2. Análisis Espacial de la Precipitación

3.3.1.2.1. Elaboración de mapas de isohietas para la precipitación intermensual

Con base en la precipitación media mensual intermensual de los meses de julio y octubre para los años 1987 – 2012 en las estaciones estudiadas y para la media mensual interanual, se generó los semivariogramas experimentales de los datos y se ajustó los variogramas teóricos a través del método de los mínimos cuadrados, obteniendo los siguientes parámetros de ajuste (Tabla 3.6.).

Tabla 3.6. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de precipitación espacial.

	Media Interanual	Julio	Octubre
Modelo	Lineal	Lineal	Lineal
Pendiente	0.00133	0.00277	0.001218
Relación de Anisotropía	2	2	1
Angulo de Anisotropía [Grados]	84.93	65.28	170
Dirección [Grados]	0.0	0.0	0.0
Tolerancia [Grados]	90	90	90

Los semivariogramas obtenidos son (Figura 3.6.):

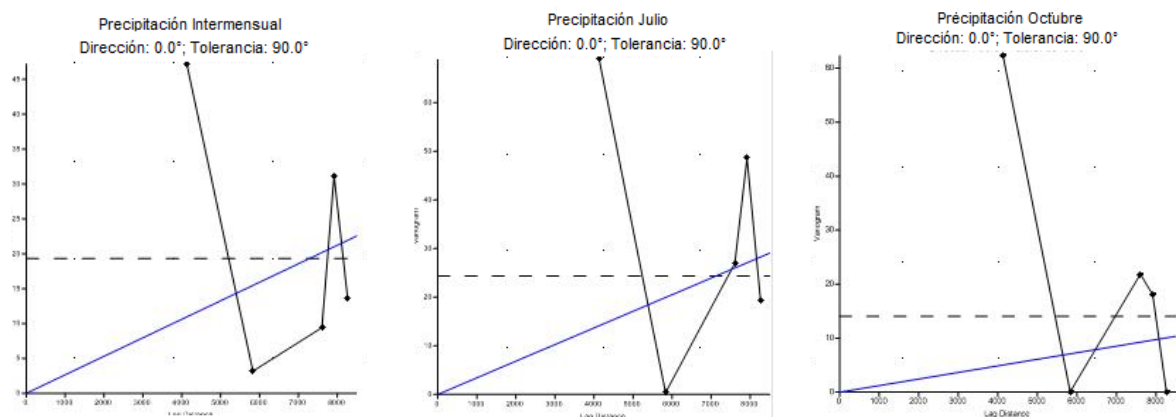


Figura 3.6. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de precipitación espacial

Con base en estos variogramas ajustados al modelo teórico lineal, se procedió a realizar la interpolación espacial de los datos a través del método de Kriging Ordinario, obteniendo los mapas de isohietas para la región en estudio (Planos 2, 3 y 4).

3.3.1.3. Análisis Espacial de la Precipitación

3.3.1.3.1. Precipitación Media Intermensual (Normal: 25 años; 1987 – 2012)

Se observa una disminución generalizada de la precipitación en dirección SW – NE (Plano 2), en dirección de los vientos dominantes. En la cuenca alta, la precipitación encuentra su mínimo (Est. Tabio: 58.8 ± 10.5 mm/mes) y gradualmente aumenta hasta la cuenca baja (Est. Providencia Gja.: 71.1 ± 14.4 mm/mes). El comportamiento que se presenta en la cuenca es producido por el efecto que generan los ascensos orográficos que delimitan la región en estudio; por su parte los valores medios observados en la estación Esperanza (59.1 ± 13.2 mm/mes), son producto que en la zona donde se ubica la estación, se evidencia en mayor medida el efecto generado por la transición entre las épocas de exceso y déficit hídrico.

En contraste, la estación Santa Inés (65.8 ± 14.1 mm/mes) próxima a la estación Esperanza, presenta características diferente en términos de magnitud de precipitación, producto de la ubicación de la estación de la cuenca. Esta se encuentra en la zona de influencia de precipitaciones orográficas, lo cual generó un aumento en el volumen de lluvia sobre el área, en comparación a las estaciones adyacentes.

3.3.1.3.2. Precipitación Media Intermensual para el mes de julio (Normal: 25 años; 1987 – 2012)

En este mes se genera el segundo periodo de déficit hídrico y se observa que sobre el área de estudio (Plano 3), la precipitación aumenta gradualmente en dirección de los vientos dominantes (S – N). Los valores de mayor precipitación se concentran en los límites de la cuenca (Est. Tabio: 57.4 ± 20.5 mm/mes; Est. Santa Inés: 53.7 ± 22.7 mm/mes; Hato El: 59.9 ± 20.1 mm/mes), donde se ubican los levantamientos orográficos que la delimitan (i.e. montañas) y valores de precipitación menores hacia el interior del valle intramontañoso, ubicados en la cuenca baja (Est. Esperanza: 45.5 ± 22.0 mm/mes)

3.3.1.3.3. Precipitación Media Intermensual para el mes de octubre (Normal: 25 años; 1987 – 2012)

Este mes se encuentra dentro del segundo ciclo de excesos hídricos en la zona de estudio. Para este mes (Plano 4), las precipitaciones presentan un aumento gradual del volumen en dirección (NE – SW) provocado por los vientos dominantes de la zona (Dirección Norte) que causan que los máximos de lluvia se generen en las zonas planas ubicadas en la cuenca baja y media por influencia de los ascensos orográficos que se presentan en la zona (Est. Esperanza: 93.7 ± 29.3 mm/mes; Est. Santa Inés: 108.9 ± 37.3 mm/mes; Est. Hato El: 106.8 ± 29.9 mm/mes), y que en la cuenca alta se presenten los mínimos de lluvia al haber descargado su mayor parte en zonas más bajas de la cuenca (Est. Tabio: 83.6 ± 23.9 mm/mes).

3.3.2. TEMPERATURA

Para la estación Providencia Gja. (Figura 4), presenta un comportamiento estable (13.7 ± 0.2 °C) a lo largo del año, siendo los meses de mayor temperatura abril y mayo (14.2 ± 0.2 °C).

3.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

Se usó la ecuación propuesta por Thornthwaite (1948) para el promedio multimensual de los años 1987 – 2012 (25 años) de la estación Providencia Gja., con la cual se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 3.8.).

Tabla 3.7. Resultados Evapotranspiración Potencial según el modelo de Thornthwaite

Mes	Días	P [mm]	T [°C]	I	N	K	ETP [mm]
Ene	31	31.2	13.3	4.4	11.9	1.02	53.85
Feb	28	46.9	13.6	4.6	12	0.93	50.94
Mar	31	83.2	13.9	4.7	12.1	1.04	58.36
Abr	30	102.2	14.2	4.8	12.2	1.02	58.46
May	31	101.6	14.2	4.9	12.4	1.07	61.70
Jun	30	69.4	13.9	4.7	12.4	1.03	58.05
Jul	31	59.9	13.6	4.5	12.3	1.06	57.43
Ago	31	44.9	13.6	4.6	12.3	1.06	57.63
Sep	30	62.7	13.6	4.5	12.1	1.01	54.65
Oct	31	106.7	13.7	4.6	12	1.03	56.85
Nov	30	91.1	13.8	4.7	11.9	0.99	55.21
Dic	31	53.1	13.6	4.5	11.8	1.02	55.01
I = 55.5				a = 1.4			

P: Precipitación; mm.: Milímetros de lluvia; T: Temperatura; °C: Grados Celsius; N: número máximo de horas de sol según la latitud; ETP: Evapotranspiración Potencial

Estacionalmente, la ETP presenta un comportamiento uniforme a lo largo del año (56.5 ± 1.6 mm/año), presentando un valor máximo en Mayo (61.7 mm/mes) y un valor mínimo en febrero (50.9 mm/mes).

3.3.4. SUELOS

Los volúmenes de agua que percolan hacia el acuífero se encuentran controlados por su paso a través de los diversos horizontes presentes en el suelo. La velocidad de infiltración está subordinada a las características intrínsecas del suelo (e.g. granulometría), al contenido de humedad antecedente, al desarrollo radicular de las plantas y a la materia orgánica presente en estas.

Utilizando la información provista por el IGAC (2002) y los planes de ordenamiento territorial de los municipios insertos en el área de estudio (Plano 5), las características generales de los suelos en la cuenca del Río Chicú son:

3.3.4.1. Suelos de Planicie

Caracterizados por presentar un relieve plano, con pendientes que varían entre 1-3%. Comprende un área amplia no confinada. Su origen es de tipo fluvio lacustre, por ello la mayor parte de los relieves ocurientes corresponden a terrazas, con variaciones en los

contenidos litológicos, arcillas fluvio lacustres recubiertas o no por mantos de ceniza volcánica y depósitos orgánicos de menor extensión (Alcaldía Municipal de Tabio, 2009).

3.3.4.1.1. Complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, Símbolo RLQ. Fase RLQa

Localizado entre los 2600 y 3000 m.s.n.m., ocupan posición de terrazas del río con un relieve ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes entre el 1- 5%, caracterizados por tener baja a moderada evolución, son bien a imperfectamente drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas y profundos a moderadamente profundos, limitados por nivel freático fluctuante, originados por depósitos de ceniza volcánica.

El complejo lo constituyen en un 50% los suelos Pachic Melanudands (perfil modal AC-8), un 20% de Andic Dystrudepts (perfil CT-4a), 15% de Aeric Endoaquepts (AC-18) y 15% de Aquic Hapludands (CT-14a), los cuales en general presentan reacción fuerte a medianamente ácida, mediana a alta capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de bases; contenidos medios de calcio y bajos de magnesio, potasio y fósforo; su fertilidad es considerada moderada.

3.3.4.1.2. Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands. Símbolo RLO. Fase: RLOa.

Esta asociación se localiza geográficamente en alturas comprendidas entre los 2.600 y 3.000 m.s.n.m. Ocupan la posición de planos de inundación del río, dentro de la planicie fluvio lacustre, en relieve ligeramente plano con pendiente dominante 1-3%. Los suelos son profundos a superficiales, bien a pobremente drenados, de texturas finas a medias y baja a moderada evolución, originados por depósitos de ceniza volcánica. En algunos sectores de la unidad los suelos son inundables ocasionalmente y de niveles freáticos altos durante la época invernal, factores que limitan su utilización agrícola.

La asociación está conformada en un 40% por los suelos Typic Endoaquepts, 30% por los suelos Aeric Endoaquepts, 20% de Thaptic Hapludands e inclusiones de Typic Dystrudepts en una proporción del 10%, los cuales en general presentan reacción fuertemente ácida, saturación media de bases, mediana capacidad de intercambio catiónico, mediana a baja saturación de aluminio, contenidos medios a bajos de potasio y fósforo; los niveles de calcio son medios y bajos los de magnesio; son de reacción extremada a muy fuertemente ácida y fertilidad baja a moderada.

3.3.4.2. Suelos de Montaña

3.3.4.2.1. Consociación Typic Eutrudepts. Símbolo MLS Fase MLSg

Esta unidad hace parte de las crestas y escarpes mayores de relieve fuertemente empinado. La pendiente dominante supera el 75% y la altitud varía entre 2.800 y 3.000 m. El material de origen de los suelos está constituido por rocas clásticas limoarcillosas y depósitos de ceniza volcánica espesor variable. Los suelos son en general bien drenados, de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y profundos a superficiales limitados por mantos de roca dura y coherente.

El componente de mayor unidad lo constituyen los suelos Typic Eutrudepts, que se distribuyen en la parte media y alta de las laderas estructurales con pendientes dominantes superiores al 75% y relieve fuertemente empinado. Los suelos han evolucionado a partir de rocas clásticas limoarcillosas, son de baja evolución, bien drenados y moderadamente profundos limitados por contacto lítico.

Las propiedades químicas de estos suelos está caracterizada por reacción fuerte a moderadamente ácida, alta saturación de bases, mediana a alta capacidad de intercambio catiónico, contenidos medios a altos de nutrientes (Ca, Mg, K, P) y fertilidad alta. Limitan el uso agropecuario de estos suelos las pendientes fuertes y la susceptibilidad a fenómenos erosivos y remoción en masa.

3.3.4.2.2. Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts. Símbolo MLV Fases MLVe, MLVf

Esta asociación se localiza en alturas entre los 2.800 y 3.000 m.s.n.m. Geomorfológicamente estos suelos se ubican en crestones de relieve que varía de moderadamente quebrado a moderadamente escarpado con pendientes de 50 a 75%. Algunos sectores han sido afectados por erosión moderada (en surcos).

Son suelos desarrollados a partir de rocas clásticas limoarcillosas, químicas carbonatadas depósitos de espesor variable de ceniza volcánica; son profundos a superficiales limitados por contactos con el manto rocoso, bien a moderadamente bien drenados y de texturas finas a moderadamente gruesas.

La asociación está integrada por los suelos Humic Lithic Eutrudepts (CC-307) en una proporción estimada del 35%, Typic Placudands (CU-79) en un 25% y Dystric Eutrudepts (Perfil CC-308) en un 25%. Las inclusiones están representadas por los suelos Pachic Melanudands (MU-10) y afloramientos de roca en 10 y 5% respectivamente, en general presentan bajo contenido de fósforo, alta capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de bases; niveles medios a altos de calcio, magnesio y potasio en el horizonte superficial y bajos en los horizontes subsiguientes. La reacción de estos suelos es fuertemente ácida y la fertilidad alta.

3.3.4.2.3. Complejo Pachic Melanudands - Typic Hapludands – Andic Dystrudepts. Símbolo MLK. Fase: MLKc, MLKd

Los suelos de esta asociación se localizan en alturas entre 3.000 y 3.200 msnm. Son suelos profundos a moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias a moderadamente gruesas, evolucionados a partir de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos gravigénicos y rocas clásticas limoarcillosas; ocupan geomorfológicamente glacis de origen coluvial con pendientes entre 7 y 12%.

Esta unidad de suelo, se encuentra presente en un relieve ligera a moderadamente quebrado, conformado en un 35% por los suelos Pachic Melanudands (MU-9), un 35% por los suelos Typic Hapludands (perfil N-16) y 30% de suelos Andic Dystrudepts (CC-306), en general presentan una reacción muy fuerte a fuertemente ácida, alta capacidad de

intercambio catiónico, baja saturación de bases, contenidos medios a bajos de calcio, magnesio y medios a altos de fósforo y fertilidad media a baja.

La profundidad efectiva superficial representa uno de los mayores limitantes para el uso y manejo agropecuario de estos suelos.

3.3.4.2.4. Asociación Typic Hapludands – Pachic Melanudands- Humic Lithic Dystrustepts. Símbolo MGT Fase MGTd

Esta unidad cartográfica, se encuentra geográficamente en altitudes que varían entre 3.000 y 3.600 m, ocupando la posición geomorfológica de lomas y glacis de acumulación; el relieve es moderado a fuertemente inclinado y las pendientes oscilan entre 7 y 25%. Los suelos han evolucionado a partir de mantos de ceniza volcánica de espesor variable, rocas clásticas arenosas y depósitos, orgánicos bien drenados, de texturas moderadamente finas a gruesas, profundos a superficiales, limitados por contacto lítico y nivel freático alto.

Los suelos de esta unidad tienen baja aptitud agrícola, se deben destinar a la conservación de flora y fauna existentes y la protección del recurso hídrico.

La asociación está formada en un 30% por los suelos Typic Hapludands, Pachic Melanudands, en un 30% y Humic Lithic Dystrustepts en otro 30%. Las inclusiones corresponden a suelos Hydric Haplohemists en un 10%, los cuales en general presentan reacción muy fuerte a fuertemente ácida, mediana saturación de bases, alta capacidad de intercambio catiónico, el contenido de magnesio y calcio es medio en el horizonte superficial y bajo en los horizontes subsuperficiales, fósforo es alto en el primer horizonte y bajo en los demás.

3.3.5. COBERTURA Y USO DE SUELOS

Utilizando la información provista por el IGAC (2002), la Alcaldía Municipal de Tabio (2009), la Secretaría de Agricultura de Cundinamarca (2002) y la CAR (Plano 6), las características generales de los usos de suelo en la cuenca del Río Chicú son:

3.3.5.1. Zonas Urbanas (Zu)

Cobertura caracterizada por espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo presentan una escasa participación. La superficie debe ser superior a 5 ha lo que hace que esta zona esté clasificada como "tejido urbano continuo. Se identifica con este tipo de cobertura las zonas urbanas de los municipios insertos en la zona de estudio, (i.e. Cabecera de los municipios de Tabio y Tenjo).

Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Asentamientos Urbanos) y su ubicación de acuerdo al suelo que se encuentran en la zona de estudio (i.e. complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrustepts, fase RLQa) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 5 mm.

3.3.5.2. Zonas Agrícolas y Ganaderas (T)

Ocupadas por cultivos comerciales o no, en un 25 a 50% del área y el resto en pastos. A continuación se hace la distinción del tipo de uso actual de suelo, según uso para pisos térmicos y subdivisiones según características geomorfológicas, cultivo dominante y tecnificación en la producción:

3.3.5.2.1. Categoría TF2-y

Áreas de agricultura y ganadería localizada entre 2000 y 3500 m.s.n.m., con climas frío a muy frío, con cultivos de papa, trigo, maíz, hortalizas, frutales que alternan con pastos (ray grass anual, azul orchero, falsa poa, kikuyo, brasilero) en relieves plano a fuertemente ondulado. Son cultivos mixtos en pendientes 0 – 12%. Semitecnificado y/o Rudimentario.

Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Cultivos de Riego) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, fase RLQa y Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands, fase: RLOa) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 100 mm.

3.3.5.3. Zonas esencialmente agrícolas (C)

Zonas de agricultura, localizadas entre 2000 y 3000 m.s.n.m., con climas frío a muy frío. Presentan cultivos comerciales o no en más del 80% del área. Estos cultivos pueden ser de trigo, cebada, papa, flores, maíz, hortalizas, frutales (curuba, fresa, mora) en relieve plano a fuertemente ondulado, con pendientes de 0 – 25%.

A continuación se hace la distinción de los tipos de uso actual de suelo, según uso para pisos térmicos y subdivisiones según características geomorfológicas, cultivo dominante y tecnificación en la producción:

3.3.5.3.1. Categoría CF1-x

Presentan uno o dos cultivos dominantes tecnificados y/o semitecnificados. Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Cultivos de Riego) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, fase RLQa y Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands, fase: RLOa) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 100 mm.

3.3.5.3.2. Categoría CF2-s

Presentan suelos ocupados por pastos y cultivos de tipo transitorio y permanente (i.e. cultivos mixtos) semitecnificados. Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Cultivos de Temporal) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, fase RLQa y Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands, fase: RLOa) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 150 mm.

3.3.5.4. Zonas esencialmente de pastoreo (P)

Con presencia esencialmente de gramíneas y leguminosas forrajeas en más del 80% del área, localizadas entre 2000 y 3000 m.s.n.m., con climas frío a muy frío. Es estas zonas, los pastos pueden ser mejorados y naturales, tales como: kikuyo, ray grass, anual, pasto azul orchoro, festucas, falsa poa, trébol y alfalfa. En este tipo de cultivos, se presentan prácticas de manejo como riego suplementario, fertilización y entre otras, que permiten que estén libres de maleza.

A continuación se hace la distinción de los tipos de uso actual de suelo, según uso para pisos térmicos y subdivisiones según características geomorfológicas, cultivo dominante y tecnificación en la producción:

3.3.5.4.1. Categoría PF1-t

Se presentan en pendientes menores del 25%, con técnicas de cultivo tecnificadas. Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Cultivos de Riego) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, fase RLQa y Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands, fase: RLOa) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 100 mm.

3.3.5.4.2. Categoría PF2-r

Se presentan en pendientes mayores del 25%, con técnicas de cultivo rudimentarias. Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Cultivos de Temporal) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts, fase MLVf y Complejo Pachic Melanudands - Typic Hapludands – Andic Dystrudepts, fase MLKc, MLKd) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 200 mm.

3.3.5.5. Zonas de Vegetación Natural o Artificial (B, V, RF)

Se define de esta forma la cobertura de vegetación arbórea y/o arbustiva. A continuación se hace la distinción de los tipos de uso actual de suelo, según uso para pisos térmicos y subdivisiones según características geomorfológicas y cultivo dominante:

3.3.5.5.1. Categoría BF1

Son bosques primarios y/o secundarios, encontrándose en una pequeña fracción sobre los cerros de Cota y el anticlinal de Tabio. Localizado entre 2000 y 3000 m.s.n.m., con un clima frío a muy frío. La vegetación dominante es el aliso, roble encenillo, arrayán y siete cueros, en relieves ondulados a fuertemente quebrados, con pendientes inferiores al 50%.

Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Vegetación natural conservada) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. Consociación typic Eutrudepts, fase MLSg y Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts, fase MLVf) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 350 mm.

3.3.5.5.2. Categoría VN1

Son zonas con presencia de matorrales ubicados a más de 2000 m.s.n.m., en climas fríos y muy fríos. Esta unidad corresponde a aquellas unidades de vegetación natural de porte bajo con un dosel irregular producto de las condiciones naturales o la acción antrópica. La vegetación es arbustiva y/o herbácea representada por gramíneas euforbiáceas, ericáceas, polipodiáceas, compuestas por frailejón, chilco, nacedero, musgos y epífitas en relieves planos a escarpados, con pendientes 0-50 y mayor al 50%.

Al correlacionar el uso de suelo (i.e. Vegetación natural perturbada) y su ubicación de acuerdo a los suelos que se encuentran en la zona de estudio (i.e. Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts, fase MLVf, Consociación typic Eutrudepts, fase MLSg Complejo Pachic Melanudands - Typic Hapludands – Andic Dystrudepts, fase MLKc, MLKd) se encuentra que el valor de RAU para esa zona es de 250 mm.

3.4. BALANCE HÍDRICO

3.4.1. ANÁLISIS ESTACIONAL

Con base en los datos hidrometeorológicos obtenidos de la estación Providencia Gja. y las características de los suelos de la Zona en estudio, se determinó los balances hídricos en cada serie de suelos (Anexo 2).

En general (Figura 3.6. y 3.7.), se observa que la zona en estudio está sometido a condiciones variables de exceso hídrico ($\Delta P > 0$) entre los meses de marzo – julio y septiembre – diciembre, y déficit hídrico ($\Delta P < 0$) en los meses restantes (De las Salas y García, 2000). Encontrando que existe un balance a favor ($P > ETP + R_o$) en términos de agua disponible que permite la recarga de los acuíferos y la disponibilidad del recurso en los meses de exceso hídrico, lo que se traduce en humedad que favorece las prácticas agrícolas que se generan en la región.

Se realizó la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes con el fin de verificar si existían diferencias significativas entre las variables E_{Tr} , R_o e Inf en cada serie de suelos analizada. Posterior a la ejecución del test no se encontró diferencias estadísticamente significativas entre los datos ($p > 0.01$).

El proceso de recarga al acuífero (Inf), ocurre en los meses de exceso hídrico (i.e. marzo – abril, septiembre – octubre), una vez se alcanza la capacidad de campo del suelo y la E_{Tr} es igual a la ETP, no obstante por el movimientos lento del agua en su proceso de percolación e infiltración en el suelo genera la saturación de este, que a su vez produce una restricción en la entrada de agua, favoreciendo la escorrentía superficial (R_o).

Se observa una diferencia entre la infiltración que se produce en la zona de uso de suelo Urbano (60.3 mm/año; 12.1 ± 8.9 mm/mes) y el Rural (95.2 mm/año; 23.8 ± 15.8 mm/mes) la cual es explicada por el elevado contenido de materia orgánica de los suelos que soportan vegetación natural evolucionada (e.g. bosques naturales) y a la acción de las raíces de la diversa vegetación cultivada (e.g. suelo agrícola) los cuales crean innumerables canalillos

hasta el subsuelo, que permiten un mayor volumen de agua que percole naturalmente al subsuelo y posterior recarga al acuífero y por otro lado, debido a la impermeabilización que se observa en las cabeceras municipales de los municipios insertos en Cuenca del Río Chicú, no permite que se produzca con eficiencia los procesos de percolación e infiltración del agua precipitada.

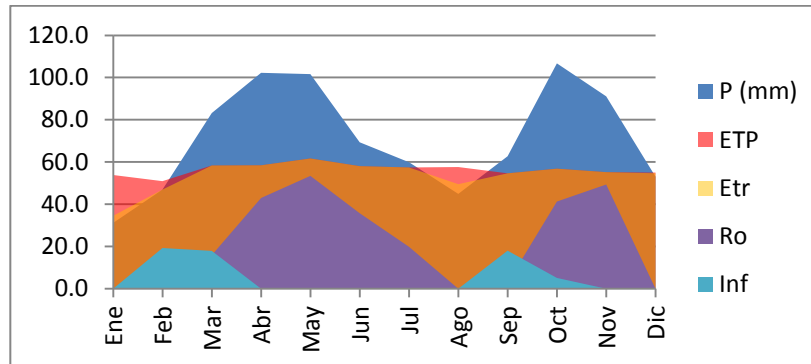


Figura 3.7. Resultado de BHC para el uso de suelo Zu.

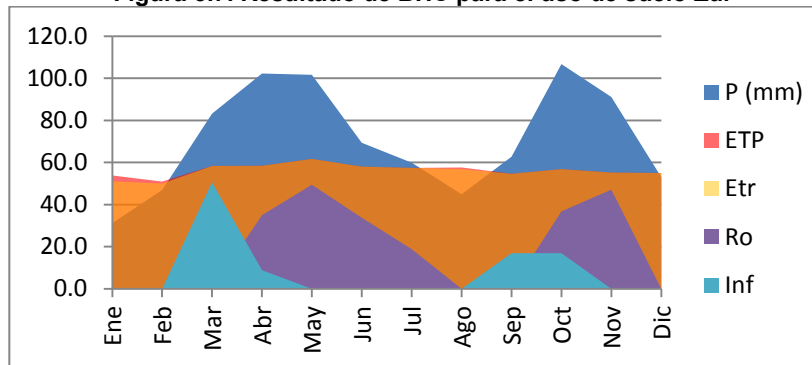


Figura 3.8. Resultado de BHC para el uso de suelo PF1-t.

Por otra parte en términos de la escorrentía superficial, esta acontece en los meses de exceso hídrico con un aumento de la altura de la lámina de agua posterior a la saturación del suelo (i.e. marzo – julio, septiembre – noviembre), con alturas de lámina de escorrentía estimadas en suelo urbano (261.3 mm/año; 32.7 ± 17.9 mm/mes) y en suelo rural (219.0 mm/año; 36.5 ± 10.1 mm/mes), mostrando que en zonas rurales con uso de suelo agrícola existe una menor escorrentía, generada por la disminución de velocidad de escurrimiento que permite un aumento en la infiltración de parte de la lámina de agua y por ende una disminución en esta variable.

Por último la variable ETr presenta en suelos rurales (674.9 mm/año; 56.2 ± 1.2 mm/mes), valores iguales a los de ETP a lo largo de todo el año a excepción del mes de enero producto de la abundante disponibilidad de agua en el suelo en esta zona, por otro lado en la zona urbana (646.4 mm/año; 53.9 ± 7.2 mm/mes) se produce una variación de los valores de ETr respecto a la ETP, dado que sobre esta zona la disponibilidad de humedad en el suelo se ve afectada por el grado de impermeabilización que posee las cabeceras municipales. Similares datos se obtuvieron en diferentes estudios realizados en la sabana de Bogotá donde se presentan ETr entre 679 y 851mm/año (Abril y Gonzalez, s.f.), 235 a 756 mm/año (De las Salas y García, 2000).

3.4.2. ANÁLISIS ESPACIAL

El escurrimiento presenta valores medios mensuales interanuales en la región de 18.9 ± 0.4 mm para el mes de julio y 37.2 ± 1.7 mm para el mes de octubre. Se observa (Plano 7 y 8) que las zonas de mayor escurrimiento se presentan en la planicie de la cuenca, producto de las características texturales finas de la zona (i.e. arcillas intercaladas con arenas y gravas), las cuales favorecen los procesos de escorrentía por la rápida saturación del suelo (julio: 19.0 ± 0.5 mm/mes; octubre: 37.7 ± 2.0 mm/mes). Por su parte, en la región montañosa que emplaza a la cuenca, se observan valores menores de escorrentía (julio: 18.6 ± 0.0 mm/mes; octubre: 36.4 ± 0.0 mm/mes) producto de las características texturales (i.e. areniscas intercaladas con arcillolitas) y de la presencia de porosidad secundaria (i.e. Fallas y fracturas) que facilitan la infiltración del agua precipitada y la disminución de la escorrentía superficial.

Tabla 3.8. Valores de recarga anual de las series de suelo en la Cuenca

Suelo	Área Total [km ²]	Área Cuaternario [km ²]	Área Cretáceo [km ²]	Infiltración Cuaternario [m ³]	Infiltración Cretácico [m ³]
BF1	1.18	0.13	1.05	1.39E+04	1.12E+05
CF1x	2.71	2.15	0.56	2.20E+05	5.72E+04
CF2s	3.28	3.28	0.00	3.43E+05	0.00E+00
PF1t	74.79	73.12	1.67	7.48E+06	1.71E+05
PF2r	10.66	1.58	9.08	1.67E+05	9.59E+05
TF2y	24.42	21.53	2.88	2.20E+06	2.95E+05
VN1	29.44	6.51	22.93	6.93E+05	2.44E+06
ZU	0.32	0.32	0.00	2.09E+04	0.00E+00
Cuerpos de Agua	1.14	1.09	0.05		
Total	147.93	109.72	38.21	1.11E+07	4.03E+06

En términos de infiltración, esta únicamente se presenta en los meses de exceso hídrico. Para el mes de octubre (Plano 9), se produce sobre la cuenca una lámina de agua promedio de 15.8 ± 4.3 mm/mes. En la zona montañosa se produce la mayor infiltración en la cuenca producto de sus características texturales y de porosidad (octubre: 17.8 ± 0.2 mm/mes). Por su parte en la zona plana (octubre: 14.7 ± 5.3 mm/mes), la infiltración se reduce debido a la impermeabilidad que le provee los estratos arcillosos que conforman los sedimentos y el suelo en esta zona, mostrando que en la cuenca, la recarga de los acuíferos se produce mayormente por los formaciones arenosas ubicadas en las zonas de montañas y en específico, para el acuífero freático sobre los límites externos de los sedimentos del cuaternario.

Finalmente, correlacionando las series de suelos con la geología de la Cuenca del Río Chicú, se estimó la recarga anual de cada una de las unidades geológicas (Tabla 3.9.). Se obtiene para los depósitos cuaternarios (Zona Plana) una recarga de 1.11×10^7 m³ (101.5 mm/año) para 109.72 km². También se obtiene 4.03×10^6 m³ (105.6 mm/año) de recarga para los afloramientos del Grupo Guadalupe (Zona Montañosa) para 38.21 km². Entonces, la recarga total anual para un área de 147.93 km² pertenecientes a la cuenca en estudio es de 1.52×10^7 m³ (207.1 mm/año) sobre el área plana y montañosa; este dato es sobreestimado al comparar con valores obtenidos en estudios anteriores en los cuales se encontraron valores de recarga del orden de 2.9×10^6 m³ (Robles y Sáenz, 1990), lo cual es producto de

la estimación de los caudales de descarga que presenta la totalidad de pozos que explotan la cuenca, a su vez de la estimación del caudal de escorrentía que se presenta en el canal principal del río Chichú, puesto que estos son afectados por numerosas represas y captaciones de agua que dificultan y desvirtúan su cuantificación (Robles y Sáenz, 1990).

CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA

- 4. GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA
 - 4.1. METODOLOGÍA
 - 4.2. ESTUDIOS ANTERIORES
 - 4.3. GEOGRAFÍA FÍSICA
 - 4.4. ESTRATIGRAFÍA
 - 4.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL
 - 4.6. GEOLOGÍA ECONÓMICA



4. GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA

4.1. METODOLOGÍA

Se realizó la revisión bibliográfica de estudios realizados previamente, además de las bases de datos de organizaciones y entidades públicas encargadas de la gestión e investigación geológica de la Sabana de Bogotá, haciendo hincapié en la cuenca del Río Chicú, tales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], el Servicio Geológico Colombiano [SGC] y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], entre otras.

4.2. ESTUDIOS ANTERIORES

Para el presente documento se consultaron las bases de datos provistas por las entidades consultadas, además de la bibliografía disponible para el autor, dentro de las cuales se destacan: Montoya y Reyes (2005), Lobo-Guerrero (1992), Riaño, Bánquez, y Morales (2005), Robles, Martínez, Hincapié, y Álvarez (1991) y Robles y Sáenz (1990).

4.3. GEOGRAFÍA FÍSICA

En el área de estudio, ubicada en las planchas 227 II B y 227 II D, del IGAC, se observan 3 zonas geomorfológicas definidas por Robles y Sáenz (1990).

4.3.1. ZONA PLANA

Constituida por depósitos cuaternarios denominados Terraza Alta, Aluviales y Coluviones formando un valle intramontano, extenso y plano, con

espesor variable, con menor profundidad en los bordes, aumentando hacia el centro de la cuenca (Figura 4.1.).

4.3.2. ZONA MONTAÑOSA

Formación rocosa del grupo Guadalupe, que bordea al valle de dirección NE, la cual presenta relieves abruptos, pendientes fuertes, con rocas de gran dureza. En esta zona, se encuentran representativos los cerros de Tabio y



Figura 4.1. Zona Plana, Municipio de Tabio
Fuente: Google Maps



Figura 4.2. Zona Montañosa, Municipio de Tenjo
Fuente: Google Maps



Figura 4.3. Zona de Colinas Suaves, Municipio de Tabio
Fuente: Google Maps

Cota, cuya altura oscila entre 2560 m.s.n.m. en el casco urbano y 3200 m.s.n.m. en el sector de llano grande en el municipio de Tabio (Figura 4.2.).

4.3.3. ZONA DE COLINAS SUAVES

Ubicada en la zona NW de la cuenca, compuesta por gravas y arenas de los Depósitos de Terraza alta y en el piedemonte de los cerros por material fino de la Formación Chipaque y la Formación Guaduas; de relieves y pendientes suaves de menor competencia (Figura 4.3.).

4.4. ESTRATIGRAFÍA

4.4.1. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

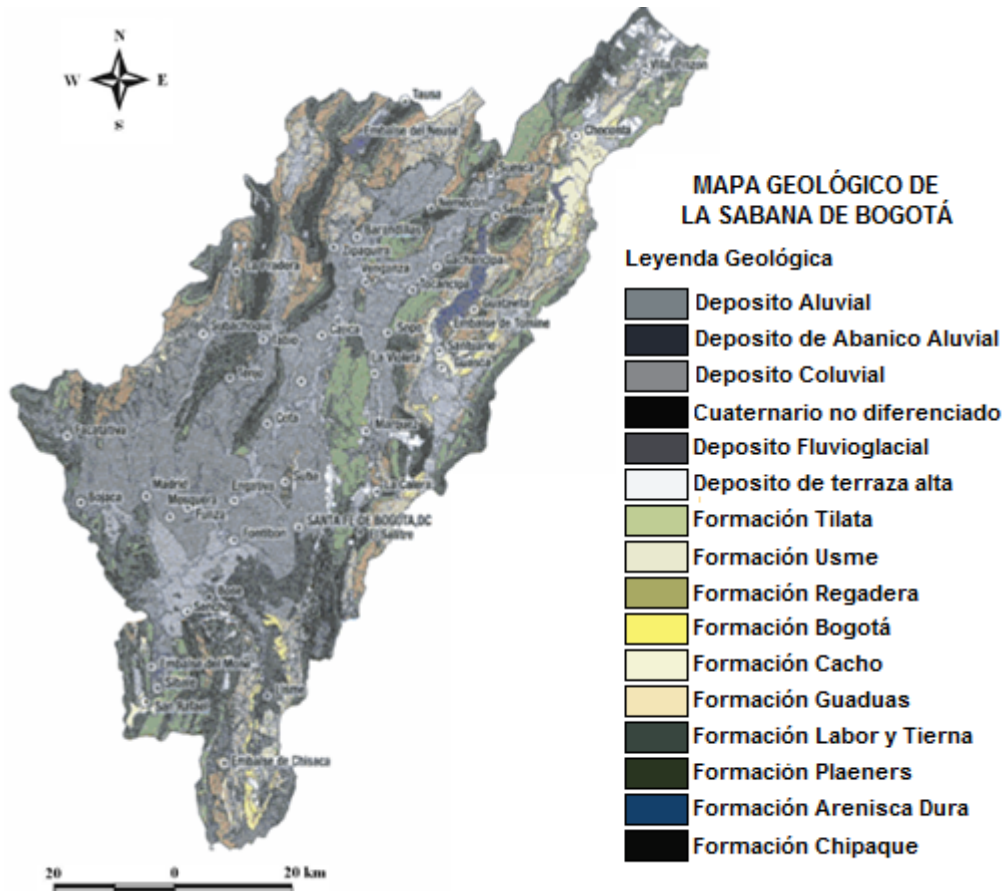


Figura 4.4. Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá
Fuente: De Bermoudes y Quiroz, 2002

La región en estudio se encuentra enmarcada dentro de la Sabana de Bogotá, ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental, siendo esta un “sinclinorio fallado con rumbo SSW – NNE en el centro y en la cresta de la Cordillera Oriental, con rocas [que evidencian diferentes condiciones de sedimentación, con características consolidadas y no consolidadas, y edades] desde el Cretáceo Medio hasta el Cuaternario” (Montoya y Reyes, 2005; Lobo-Guerrero, 1992). Las formaciones presentes en esta zona (Figura 9), tales como la “Tilatá (Plioceno), Sabana (Plioceno, Pleistoceno y Holoceno), y Tunjuelo (Pleistoceno y Holoceno) son depósitos lagunares, fluviales y fluvio-glaciares depositados en el centro y en

los bordes de la cuenca [del Río Bogotá, del que hace parte la zona en estudio] durante los últimos 3.5 millones de años” (Lobo-Guerrero, 1992).

En específico, sobre la región estudiada, “afloran rocas sedimentarias de origen marino de edad cretácica, infrayaciendo a una secuencia terciaria depositada en ambientes de transición y continentales; discordantemente sobre estas rocas hay espesos depósitos de edad cuaternaria, los cuales cubren aproximadamente el 50% de la zona y constituyen el relleno de la sabana de Bogotá. Las formaciones depositadas a finales del Cretácico y comienzos del terciario se encuentran afectadas por estructuras generadas por una etapa orogénica que actuó posteriormente a la sedimentación de las mismas. (Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2. ESTRATIGRAFÍA LOCAL

En la región en estudio se encuentran afloramientos de las siguientes unidades estratigráficas, acorde a la columna estratigráfica generalizada desarrollada por la CAR y el SGC (Figura 4.5. y Plano 10). Se describirán en orden cronológico las unidades presentes:

4.4.2.1. Formación Chipaque (Ksc)

Con nueva nomenclatura propuesta por Montoya y Reyes (2005), K_{2cp} , definida por Hubach (1957) como parte superior del Grupo Villeta y redefinida por Renzoni (1962), con edad del Cenomaniano Superior – Santoniano presenta morfología ondulada de suaves pendientes, cuyo contacto superior es concordante y gradual con la Formación Arenisca Dura (Robles *et al*, 1991). Esta unidad está constituida por arcillolitas, areniscas, limolitas y calizas; las arcillolitas (lititas de compactación) son las rocas predominantes de color gris oscuro y negro con gran cantidad de micas, sus estructuras internas son laminación discontinua y ondulosa, de baja resistencia y fácil meteorización en esquirlas. Las areniscas son cuarzosas o cuarzo-micáceas, presentadas en paquetes con esporádicas capas de arcillolitas, de color blanco, amarillo o gris oscuro, de grano fino a muy fino hasta grueso, con presencia de cemento silíceo, calcáreo o ferruginoso (Montoya y Reyes, 2005; Lobo-Guerrero, 1992).

En la región estudiada, aflora en las veredas El Salitre, Canicas y Carrón, en la Serranía de Tenjo; en estos afloramientos se encuentra en general niveles de lodolitas negras, finamente laminadas, con intercalaciones esporádicas de bancos de areniscas de grano fino, con alto contenido de hierro (Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2.2. Grupo Guadalupe

Definido formalmente al oriente de Bogotá por Pérez y Salazar (1978), está conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna. En la Sabana de Bogotá, este grupo se reconoce por encima de la Formación Chipaque al oriente y sobre la Formación Conejo al occidente, constituye los cerros resistentes que circundan la Sabana de Bogotá y es suprayacida en toda la sabana por la formación guaduas (Montoya y Reyes, 2005; Lobo-Guerrero, 1992). Este grupo es generalmente arenoso con intercalaciones de liditas, limolitas y arcillolitas (Robles y Sáenz, 1990).

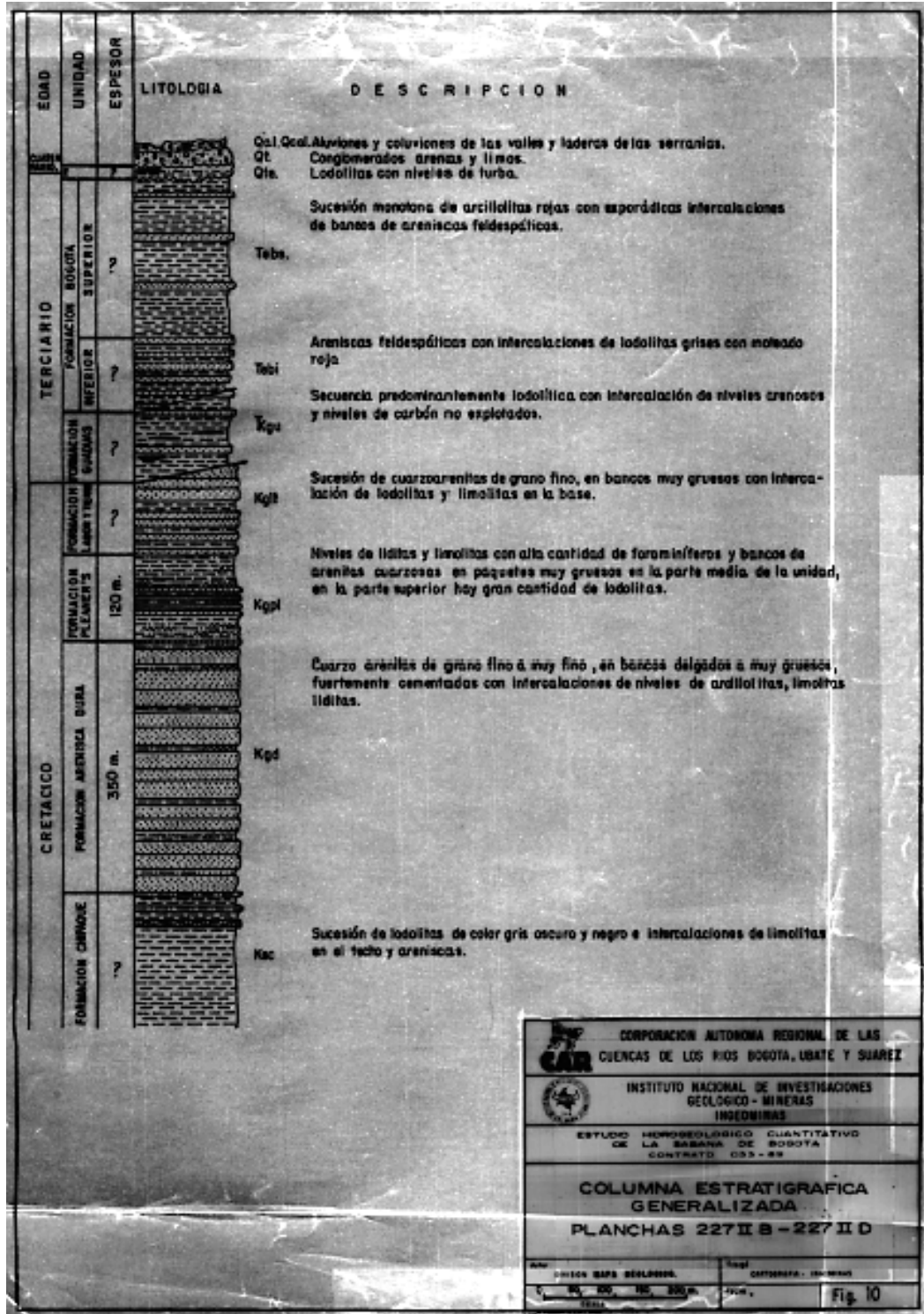


Figura 4.5. Columna Estratigráfica Generalizada
Fuente: Robles y Sáenz, 1990

4.4.2.2.1. Formación Arenisca Dura (Kgd)

Con nueva nomenclatura propuesta por Montoya y Reyes (2005), K₂d. Definida por Hubach (1957), y redefinida por Renzoni (1962), siendo su nombre propuesto formalmente por Pérez y Salazar (1978) con edad del Conaciano – Santoniano según Cáceres y Etayo (1969), aunque Hubach (1957) y Pérez y Salazar (1971) le asigna edad campaniano, es una unidad litoestratigráfica que reposa concordante y transicionalmente sobre una sucesión rítmica de

bancos gruesos de arenisca fina y estratos de lutitas y arcillolitas de la Formación Chipaque y que es suprayacida por una secuencia de arcillolitas, arcillolitas silíceas y liditas de la Formación Plaeners en contacto normal. En el área de la Sabana de Bogotá, esta unidad se reconoce por formar una morfología abrupta que resaltan notablemente en el relieve, derivada de la litología que la constituye principalmente de un alto contenido de arenisca, resistente a la erosión. Aflora en el sector occidental de la Sabana [...] en los anticlinales de Tabio. (Montoya y Reyes, 2005; Lobo-Guerrero, 1992; Robles *et al*, 1991).

Según Robles y Sáenz (1990), esta formación se presenta en la Serranía de Tenjo, aflorando en las veredas canicas, el carrón y la cuesta donde su contacto superior es normal con la Formación Plaeneres y su contacto inferior es fallado con la Formación Chipaque. También aflora en las veredas de Santuario, Churuguaco y el abra con contactos tanto inferior como superior fallados.

Se presenta completa en la serranía de cota siguiendo una franja continua aproximada N10°E [...] Consistiendo en cuarzo-arenitas de color gris y gris amarillo, de grano fino a muy fino, bien seleccionados y sobre-redondeados, en capas que varían entre delgadas a muy gruesas (5 cm – 8 m), con geometría plana paralela, fuertemente compactas con cemento silíceo. Intercaladas entre areniscas ocurren limolitas silíceas, de estratificación muy delgada (< 10 cm de espesor), plana paralela y liditas con estratificación muy delgada, plana paralela y lenticular, que parten en rombos.

4.4.2.2. Formación Plaeners (Kgpl)

Con nueva nomenclatura propuesta por Montoya y Reyes (2005), K₂p. Definida por Hubach (1957), y redefinida por Pérez y Salazar (1978) los cuales propusieron formalmente su nombre, de edad Campaniano Superior a Maastrichtiano temprano. Esta reposa concordantemente sobre la formación arenisca dura y suprayace a la formación arenisca de labor, está constituida por una sucesión de arcillolitas laminadas de dureza baja, limolitas silíceas laminadas con fractura concoidea y en menor proporción areniscas de grano fino a muy fino, con esfericidad media a alta. En general presenta una morfología que contrasta con las pendientes abruptas de las unidades geológicas que la circundan (Montoya y Reyes, 2005; Lobo-Guerrero, 1992).

En la región estudiada aflora en las serranías de Tenjo y Cota, con una secuencia de base a techo conformada por limolitas silíceas y arcillolitas interestratificadas entre sí de color gris y gris amarillento, en la parte media se intercalan delgados niveles de lidita dentro de las limolitas silíceas de color gris claro, gris oscuro con blancos muy gruesos con presencia de cuarzo-arenitas grises con una matriz arcillosa menor al 5%, de grano fino y buena selección y por último, en la parte alta prevalecen arcillolitas laminadas y lenticulares con delgadas intercalaciones de arenisca (Robles *et al*, 1991; Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2.3. Formación Labor y Tierna (Kgl)

Con nueva nomenclatura propuesta por Montoya y Reyes (2005), K₂t. Definida por Hubach (1957), y redefinida por Renzoni (1962) y Pérez y Salazar (1978), formalizan las Formaciones Arenisca de Labor y Arenisca Tierna, de edad Campaniano al Maastrichtiano

tardío. La arenisca de Labor, comienza con capas muy gruesas de areniscas que se intercalan con capas muy delgadas de arcillolitas, separada de la Formación Arenisca de Tierna por un segmento de lodolitas y arcillolitas. Las formaciones Arenisca Labor, Arenisca Tierna y el segmento que las separa, se agrupan como una sola unidad cartográfica dada la similitud litológica y su expresión morfológica, se establece desde el techo de la formación Plaeners hasta la base de la formación Guaduas (Montoya y Reyes, 2005).

La conformación principal de esta Formación Arenisca de Labor (base) son areniscas cuarzosas, blancas o grises claras ocasionalmente amarillentas blancas y pardo-amarillentas, de grano fino hasta medio, con dureza y resistencia moderadas, subredondeados, bien seleccionados con una matriz arcillosa menor a 5% con intercalaciones menores de arcillolitas grises verdosas y limolitas silíceas grises. La Formación Arenisca Tierna (Techo) está compuesta areniscas cuarzosas y feldespáticas, blanco amarillentas, de grano medio hasta conglomerático, con algunas delgadas intercalaciones de lutitas grises (Lobo-Guerrero, 1992; Robles *et al*, 1991; Robles y Sáenz, 1990).

Se puede observar esta formación sobre la carretera Tenjo-Chía, aflora en la vereda Olaya Herrera, en la Serranía de Tenjo y a lo largo del flanco oeste de la serranía de Cota. En estas localidades la formación no se presenta completa por encontrarse cubierta por depósitos cuaternarios (Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2.3. Formación Guaduas (TKgu)

Con nueva nomenclatura propuesta por el Montoya y Reyes (2005), K₂E₁g. Fue descrita originalmente por Hettner (1892, en De Porta, 1974) y redefinida por Hubach (1957) para referirse a los materiales que afloran en la región de Bogotá y que están por encima del Grupo Guadalupe. Este último, denomina piso Guaduas a la secuencia que suprayace al Grupo Guadalupe y es infrayacida por el piso de Bogotá, por intermedio del Horizonte Cacho que sería para este autor la parte más baja del piso de Bogotá. Su edad es Mastrichtiano Superior – Paleoceno Inferior (Montoya y Reyes, 2005; Robles *et al*, 1991).

Está compuesta por una sucesión de arcillolitas grises compactas, con gran cantidad de moteado de hierro. Con arcillolitas se intercalan pequeños bancos de areniscas y mantos de carbón situados hacia la parte inferior y media de la Formación. Sigue una secuencia de areniscas friables, de color amarillento a pardo rojizo con intercalaciones de arcillolitas a veces carbonosas. Sigue una secuencia de areniscas friables, de color amarillento a pardo rojizo con intercalaciones de arcillolitas a veces carbonosas. Encima de estas areniscas reposa una secuencia de arcillolitas grises con mastos de carbón, sobre las cuales descansa otra secuencia de arcillolitas predominantemente rojizas en estratos delgados lenticulares. Los sedimentos tienen un espesor variable entre unos 250 m y 1200 m (Lobo-Guerrero, 1992; Robles *et al*, 1991).

Esta aflora en los flancos de la Serranía de Tenjo al Norte del área estudiada, encontrándose que en dichas localidades, la unidad no se presente completa, debido a los contactos fallados con las formaciones que la infra y suprayacen (Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2.4. Formación Bogotá (Teb)

Con nueva nomenclatura propuesta por el Montoya y Reyes (2005), E₁₋₂b. Definida por Hubach (1945) y redefinida por Julivert (1963), como piso de Bogotá a la secuencia litológica del terciario medio. Van der Hammen (1958) por fauna analizada y Hoorn (1988), le asignan una edad de Paleoceno Superior – Eoceno Inferior. (Montoya y Reyes, 2005; Robles y Sáenz, 1990). Está compuesta casi exclusivamente por arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas), bien estratificadas, con algunos bancos de areniscas micáceas grises de grano fino hacia la parte superior de la unidad. (Lobo-Guerrero, 1992). Esta formación no aflora en la región en estudio (Robles y Sáenz, 1990).

Se encuentra conformada por dos conjuntos claramente diferenciados (Robles *et al*, 1991):

4.4.2.4.1. Conjunto Inferior (Tebi – E₁b)

Está constituido por una alternancia de areniscas y arcillolitas. Las areniscas son grises claras a gris verdosas y amarillas por alteración, cuarzo-feldespáticas, de grano fino hacia la base y conglomeráticas, hacia el tope, en estratos de 0.5 a 4 m. Las arcillolitas son de color gris oscuro a negro cuando están frescas y violáceas a amarillo cuando están meteorizadas, son blandas y altamente plásticas.

4.4.2.4.2. Conjunto Superior (Teb_s – E₂b)

Es predominantemente arcilloso con un espesor que puede sobrepasar los 1000 m, suele observarse en afloramientos aislados, pues en su mayor parte se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios.

4.4.2.5. Depósitos Cuaternarios

En la región de la cuenca del Río Chicú se diferencian tres tipos de depósitos cuaternarios.

4.4.2.5.1. Depósitos de Terraza Alta (Q_{ta})

Definida para la Sabana de Bogotá por Julivert (1963), quien los relaciona, al menos en parte con la Formación Tilata. Sin embargo, Van Der Hammer (1973) y Robles *et al*. (1991) relacionan los depósitos terraza alta con la Formación Sabana (Q_{1sa}). Están constituidos principalmente por arcillas con intercalaciones lenticulares de arenas y gravas. Ocupan la zona plana de la Cuenca del Río Chicú conformando terrazas altas y se presentan algunas acumulaciones de gravas hacia el norte del valle del municipio de Tabío. El ambiente es fluvio-lacustre y su edad según Helmens y Van der Hammen (1995) datada por técnica de ¹⁴C, la posiciona en el Pleistoceno medio y tardío (Riaño *et al*, 2005; Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2.5.2. Depósitos Aluviales (Q_{al})

Asociados por Helmens y Van der Hammen (1995) con la formación Chía, (Q_{2ch}), corresponde a depósitos de grano fino originados por corrientes fluviales como la del río Bogotá y en específico para la región en estudio, por aluviones del Río Chicú y tributarios como las quebradas La Chucua y Tiguasé que han cortado depósitos más antiguos como los de la Terraza Alta y los Depósitos de Abanicos aluviales. Forman terrazas bajas y

llanuras de inundación de clara diferenciación, constituidos por sedimentos arenosos de grano fino y sedimentos arcillosos gris verdosos y limos en descomposición, de limitada extensión y poco espesor (máximo de 5 m), con presencia de cantos redondeados de diferente tamaño provenientes de las rocas circundantes. Desde una perspectiva morfológica, generan una topografía suave con algunos relieves importantes en el valle del Río Frío. Según Helmens y Van der Hammen (1995), su edad datada por técnica de ^{14}C , la posiciona en edades del holoceno y hasta 16000 años (Riaño *et al*, 2005; Robles *et al*, 1991; Robles y Sáenz, 1990).

4.4.2.5.3. Depósitos Coluviales (Q_2c)

Son depósitos de pendientes de origen local, resultantes de la fracturación y el arrastre que han sufrido los materiales de las unidades litológicas, y que por lo general se han originado en zonas fracturadas, con una alta pendiente que facilitan su movimiento por gravedad, formados por acumulaciones sobre las laderas por procesos de escorrentía superficial, por flujo lento y viscoso de suelos saturados y no saturados. Están constituidos por gravas, guijarros, guijos y bloques con predominio de matriz arcillosa de las rocas vecinas de edades terciarias y cretácicas. Se presentan en el flanco oeste de la Serranía de Cota y en la vereda del Salitre característicos de estas zonas de piedemonte. En el relieve resaltan por su topografía suave y contrasta con las formas más abruptas de las rocas que lo rodean (Riaño *et al*, 2005; Robles *et al*, 1991; Robles y Sáenz, 1990).

4.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La zona de estudio presenta rangos estructurales reflejo de la tectónica general de la Cordillera Oriental, siendo este un sistema complejo, responsable de la generación de anticlinales estrechos y sinclinales amplios que han sido erodados y rellenados por sedimentos cuaternarios conformando la planicie de la Sabana Bogotana. Encontrando además, zonas con diapirismo de sal generalmente localizadas en el núcleo de los anticlinales, los cuales generan estructuras complejas, debido que interrumpen fallas y pliegues regionales (Riaño *et al*, 2005).

La tectónica que generó estas estructuras, afecta las capas del Paleoceno y probablemente el Cuaternario, lo que hace pensar que el evento generador de estas estructuras fue activo desde el terciario medio y afecto aún en el Cuaternario, aunque no se podría precisar si el evento es continuo o actuó por pulsos (Robles y Sáenz, 1990). Para el análisis estructural, la región se dividió en dos zonas cuyas características estructurales presentan diferencias marcadas.

4.5.1. SECTOR NOROESTE

Según Robles y Sáenz (1990), este sector está constituido por una serie de fallas cabalgantes semiparalelas entre sí, con inclinaciones que varían entre los 10° y 45° con sentido NW y dirección aproximada $N5^\circ-10^\circ E$ en la zona de estudio. A esta falla la denomina Riaño *et al*, (2005) Falla Chital, la cual bordea el flanco Este de la Serranía de Tabio – Tenjo.

Dentro de su movimiento inverso cabalgan rocas de la Formación Arenisca Dura sobre rocas de la Formación Guaduas y en algunos sitios a la Formación Plaeners y la Formación Chipaque. Al Sur de la localidad de Tabio esta falla queda fosilizada por depósitos cuaternarios y para Velandia y De Bermoudes (2002) probablemente continúe hacia la falla Mosquera que definió el centro de la Sabana.

También, se presenta una estructura anticlinal, denominada Anticlinal de Tabio, localizada sobre la Serranía de Tabio – Tenjo, que presenta su término al Norte sobre la falla Chital y al Sur presenta un hundimiento dentro de los depósitos del Neógeno - Cuaternarios (Formación Sabana).

Presenta una orientación cercana a N10°E al norte de Tabio y N20°- 40°E al sur de Tabio [...] En el flanco Este, [presente en la cuenca del Río Chicú], se encuentra con fallas y afloración de rocas de la Formación Arenisca Dura en contacto con la Formación Guaduas, en tanto que en el occidental afloran rocas de las unidades Arenisca Dura, Plaeners, Labor-Tierna y Guaduas. El anticlinal en la parte sur está fragmentado por fallas asociadas a las fallas de Subachoque y Chital; en su núcleo esta la formación Arenisca Dura y en sus flancos formaciones Plaeners y Labor – Tierna (Riaño *et al*, 2005).

4.5.2. SECTOR SURESTE

Este sector está caracterizado por fallas cabalgantes semiparalelas entre sí, inclinadas con ángulos que varían entre los 10° y 30° grados al oriente, las cuales presentan dos direcciones principales. Una aproximadamente N70°E que se extiende desde los cerros de Huaika hasta la latitud de la población de Tenjo; y otro con dirección aproximada N30°E que se presenta al sur de la Serranía de Tenjo y en la Serranía de Cota. (Robles y Sáenz, 1990).

Además, presenta la Falla El Porvenir, siendo este nombre tomado de Velandia y De Bermoudes (2002), para referirse a la estructura de falla inversa que es la continuación por debajo de los depósitos cuaternarios de la falla que bordea por el occidente a la Serranía de Chía – Cota y que se extiende hacia el Norte hacia Zipaquirá [...], la cual, desde la carretera Tabio – Cajicá hacia Zipaquirá, su trazo entra a afectar las rocas de las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor – Tierna cabalgando esta última, sobre la Formación Guaduas, que al continuar hacia el sentido N su desplazamiento va siendo menos importante. (Riaño *et al*, 2005).

4.6. GEOLOGÍA ECONÓMICA

Según Robles y Sáenz (1990) y Riaño *et al* (2005) en la región estudiada se encuentra en explotación materiales de construcción y aguas subterráneas. Entre los materiales de construcción se explotan arcillolitas de la Formación Guaduas en las laderas de la Serranía de Tenjo al Norte empleadas fundamentalmente para producir ladrillos, tejas y tabletas para pisos y también algunos afloramientos de la Formación Plaeners que utilizan como recebo para el afirmado de las carreteras y los caminos de la región, de carácter intermitente de acuerdo con las necesidades de la región aumentando la demanda principalmente, posterior a la época de lluvias. La explotación de agua subterránea se tratará en posteriores capítulos.

CAPÍTULO 5. INVENTARIO DE POZOS, ALJIBES Y MANANTIALES

- 5. INVENTARIO DE POZOS, ALJIBES
Y MANANTIALES
- 5.1. METODOLOGÍA
- 5.2. RESULTADOS DEL INVENTARIO
- 5.3. RED DE MONITOREO



5. INVENTARIO DE POZOS, ALJIBES Y MANANTIALES

5.1. METODOLOGÍA

Se ejecutó el inventario de pozos, aljibes y manantiales, recopilando información existente en el Reporte Censo de Usuarios de Aguas Subterráneas - Sabana de Bogotá, provista por la CAR (2012) y los datos suministrados por firmas consultoras.

Con base en dicha información se generó el anexo 3, en el cual se presentan los pozos que explotan el acuífero de la formación Sabana y Chía, usado para la realización del inventario de pozos, aljibes y manantiales del presente capítulo, y la generación de la red de monitoreo para este proyecto, a través de la solicitud de permiso vía telefónica a los propietarios de los diversos predios.

Una vez obtenidos los permisos, se generó la nomenclatura para cada uno de los puntos de muestreo, la cual consta de 3 partes; la primera hace referencia al origen del agua subterránea (i.e. P: Pozo; Al: Aljibe). La segunda parte consta de las iniciales del nombre del municipio en el cual se encuentra localizado el punto de agua (i.e. Tabio: Ta; Tenjo: Te), y por último el número consecutivo asignado a cada pozo. Por ejemplo: P-Te-01.

5.2. RESULTADOS DEL INVENTARIO

Usando la información disponible se encontró en la Cuenca del Río Chicú un total de 1255 puntos de agua que captan el acuífero cuaternario, los cuales corresponden a 1178 pozos, 76 aljibes y 1 manantial. Estos puntos de agua se encuentran ubicados en las planchas 227 II B, 227 II D y 227 IV B de escala 1:25000 según el IGAC (Plano 11). En el anexo 3, se muestra un índice general de los puntos de agua presentes en el Censo, con su respectiva profundidad, uso del agua y número de identificación proporcionado por la CAR.

5.2.1. POZOS

Según el Censo de Usuarios de Aguas Subterráneas - Sabana de Bogotá (CAR, 2012), se encuentran 1178 pozos en total, distribuidos en los municipios de Tenjo (1009 pozos, 85.6%), Tabio (68 pozos, 5.8%) y Cota (101 pozos, 8.6%). El sistema de extracción de agua se da por medio de compresor o bomba sumergible.

En la zona en general, se observa que los pozos explotados con compresor son generalmente diseñados sin cumplir las normas técnicas y en consecuencia producen grandes cantidades de sedimentos (Robles y Sáenz, 1990), provocando un detrimento de la calidad y cantidad de agua extraída de los acuíferos captados. Además, la deficiente operación de los pozos sumado a la insuficiencia en su diseño en algunos casos, ocasiona el colapso u obstrucción de las rejillas causando que en la cuenca se encuentren 351 pozos (29.8%) abandonados u obstruidos. A su vez, por la sobre explotación que se genera en la zona, 70 pozos (5.9%) no son utilizados debido a que se encuentran “secos”. De los restantes, 174 pozos (14.8%) están en reserva (i.e. tienen concesión de funcionamiento pero no son usados).

Los restantes (583 pozos, 49.5%) se encuentran activos, y presentan como principal uso del agua su utilización en actividades de ganadería (326 pozos, 55.9%), para bebederos y limpieza de establos de algunas parcelas y minifundios. Le sigue en orden de importancia el uso de agua para irrigación (149 pozos, 25.6%) en cultivos tales como flores y hortalizas entre otros, el abastecimiento doméstico (96 pozos, 16.5%) y otras actividades tales como el uso industrial (4 pozos, 0.7%), el abastecimiento público (3 pozos, 0.5%). Del restante (5 pozos, 0.9%) se desconoce el uso primario que se le da al agua. Los datos y características generales de los pozos inventariados se encuentran en la tabla 5.1.

Con base en el contrato 634 de 2011, titulado “Implementar y efectuar seguimiento a un proyecto piloto de red de monitoreo automático de niveles piezométricos y calidad de agua subterránea, así como realizar la campaña de monitoreo y rediseño de la red de niveles piezométricos y de calidad de agua subterránea en la Sabana de Bogotá” de la CAR, SGC y JICA (2012), se determinó que los caudales de explotación del acuífero de sedimentos Neógeno – Cuaternario presenta un valor medio de 5.8 ± 6.0 lps (litros por segundo), presentando gran heterogeneidad oscilando entre valores de 0.5 lps hasta 25.2 lps.

5.2.2. ALJIBES

Se encuentran en la zona en estudio 76 aljibes (i.e. pozos excavados). Siendo estas excavaciones hasta de 36 m de profundidad, los cuales producen bajos caudales (≈ 0.03 lps) y son utilizadas en actividades de abastecimiento doméstico (9.2%), irrigación (9.2%) y ganadería (6.6%), en su mayoría los aljibes se encuentran inactivos (75.0%). Estos se encuentran localizados en Depósitos de Terraza Alta (Qta) y Depósitos Aluviales (Qal) (Plano 11).

5.2.3. MANANTIALES

Con base en el Censo de Usuarios de Aguas Subterráneas - Sabana de Bogotá (CAR, 2012), se presenta en la zona en estudio 1 manantial ubicado en zona de piedemonte, en la vereda Santa Cruz (se entiende vereda como un tipo de subdivisión territorial de los diferentes municipios del país), municipio de Tenjo, no obstante, dicho manantial al momento de la realización del censo se encontraba seco. En campañas anteriores se tenían en inventario 12 manantiales distribuidos en la zona de piedemonte asociados a rocas del Grupo Guadalupe (Robles y Sáenz, 1990).

Tabla 5.1. Datos Generales de los Pozos

Municipio	Tenjo	Tabio	Cota	Total ¹
Número de Pozos	1009	68	101	1178
%	85.7	5.8	8.6	100.0
Caudales de Extracción	Media \pm SD	Máximo	Mínimo	Total ²
lps	5.8 ± 6.0	25.2	0.5	39

Condición de Pozo	Activo	Reserva	Secos	Abandonados	Obstruidos	Total ¹			
Número de Pozos	583	174	70	301	50	1178			
%	49.5	14.8	5.9	25.6	4.2	100.0			
Uso del Agua	Ganadería	Irrigación	Abast. Doméstico	Industria	Abast. Público	S.I	Total ¹		
Número de Pozos	326	149	96	4	3	5	583		
%	55.9	25.6	16.5	0.7	0.5	0.9	100.0		
Profundidad (m)	X ≤ 50	50 < X ≤ 100	100 < X ≤ 150	150 < X ≤ 200	200 < X ≤ 250	250 < X ≤ 300	X > 300	S.I.	Total ¹
Número de Pozos	152	270	30	6	5	5	3	707	1178
%	12.9	22.9	2.5	0.5	0.4	0.4	0.3	60.0	100.0

SD: Desviación Estándar; lps: Litros por segundo; Abast: Abastecimiento; S.I.: Sin Información

Fuente: CAR (2012)¹, CAR, SGC y JICA (2012)²

5.3. RED DE MONITOREO

Con el fin de conformar la red de monitoreo para este trabajo, se utilizó la información proporcionada por la CAR y las bases de datos de consultoras ambientales y por medio de llamadas telefónicas, únicamente se obtuvo permiso para realizar el monitoreo de calidad de agua subterránea en 10 pozos de bombeo (Tabla 5.2.) El agua extraída de estos pozos se utiliza para el riego, bebida para el ganado y uso doméstico como destino minoritario.

Dichos pozos cubren gran parte de la extensión de la cuenca y explotan el acuífero ubicado en los sedimentos del cuaternario, proporcionando información confiable de los parámetros hidrogeológicos e hidroquímicos del acuífero estudiado que permitirá determinar su estado en torno a calidad hídrica y su comportamiento frente al impacto antrópico que se desarrolla en la superficie de esta cuenca.

Al momento de realizar el monitoreo hidrogeológico respectivo se encuentra que los pozos obtenidos, por su origen productivo presentaban problemas para su seguimiento, producto que no exhibían caudalímetro o funcionaban con extractores neumáticos que no permitían una correcta determinación del caudal de explotación, a su vez en el 36.4% de los pozos se encontraba sellada la tubería de medición que no permitió la determinación del nivel freático ni dinámico. Por otro lado el 18.2% de dichos pozos presentaba problemas en torno a la medición dado que los tubos de exploración no permitían el ingreso de la sonda por colapso o deficiencia en la construcción de los mismos. Dadas estas razones, esta red de monitoreo se utilizó para la determinación de la calidad de agua extraída del acuífero, por ende los parámetros hidrogeológicos e hidráulicos que serán utilizados en este trabajo, son los determinados a través de la información proporcionada por la CAR y el SGC.

Tabla 5.2. Puntos de extracción de agua subterránea que conforman la red de monitoreo

Código	Tipo	LOCALIZACIÓN				Elev. m.s.n.m.
		Proyección TM – Sistema de Referencia MARGA – SIRGAS		Proyección Elipsoidal - Sistema de Referencia MARGA - SIRGAS		
		X	Y	Lat.	Long.	
		Este	Norte	Norte	Oeste	
Al-Te-02	Aljibe	993029.6	1023371.2	74°08'25.2"	4°48'27.2"	2600.7
P-Te-04	Pozo	994977.3	1025644.2	74°07'22.0"	4°49'41.2"	2606.6
P-Te-05	Pozo	989812.9	1025693.9	74°10'9.6"	4°49'42.8"	2559.4
P-Te-06	Pozo	995418.3	1030070.5	74°07'7.7"	4°52'5.3"	2592.4
P-Te-07	Pozo	988337.2	1027620.1	74°10'57.3"	4°50'45.5"	2587.2
P-Te-09	Pozo	990457.5	1029877.5	74°09'48.7"	4°51'59.0"	2602.2
P-Te-10	Pozo	991311.0	1030319.7	74°09'21.0"	4°52'3.4"	2619.2
P-Te-11	Pozo	994629.5	1030706.4	74°07'33.3"	4°52'26.0"	2585.3
P-Ta-12	Pozo	998921.7	1032874.9	74°05'14.0"	4°53'36.6"	2580.4
P-Ta-13	Pozo	999211.4	1034023.7	74°05'4.6"	4°54'14.0"	2603.3

Lat.: Latitud; Long.: Longitud; Elev.: Elevación; m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar

Fuente: Autor

CAPÍTULO 6. HIDROGEOLOGÍA

- 6. HIDROGEOLOGÍA
 - 6.1. METODOLOGÍA
 - 6.2. ESTUDIOS ANTERIORES
 - 6.3. CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGÍA
 - 6.4. EL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD Y SUS LIMITACIONES
 - 6.5. ESTRUCTURA HIDROGEOLÓGICA REGIONAL DE LA SABANA DE BOGOTÁ
 - 6.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS DE MAYOR INTERÉS



6. HIDROGEOLOGÍA

6.1. METODOLOGÍA

Se realizó la revisión bibliográfica de estudios previos, además de las bases de datos de organizaciones y entidades públicas encargadas de la gestión e investigación geológica e hidrogeológica de la Sabana de Bogotá, haciendo hincapié en la cuenca del Río Chicú, tales como el Servicio Geológico Colombiano [SGC], la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], firmas privadas, entre otras.

Con base en esta información, se determinaron las características hidrogeológicas de la cuenca y en especial del acuífero formación Sabana y Chía, objeto central de este estudio. Con el fin de complementar las características del acuífero estudiado, se tuvo en cuenta los datos de niveles dinámicos en fase estacionaria (niveles sin bombeo por 24 horas, mínimo) proporcionados por la CAR para el acuífero de sedimentos del cuaternario (i.e. Formación Sabana y Chía) en los años 1998, 2007, 2011 y 2012 con el fin de observar el comportamiento del agua subterránea en la región. Para ello se realizó el análisis estadístico de los datos pertenecientes a cada año estudiado (e.g. boxplot, histograma, normal QQ' plot, prueba U de Mann-Whitney, ajuste del semivariograma experimental) y con base en el mismo, se obtuvo los mapas de curvas isofreáticas para la cuenca en los años analizados, a través de la interpolación estadística por el método Kriging Ordinario.

Posterior a esto, se determinó para la región en estudio el mapa de vulnerabilidad intrínseca a través del método GOD desarrollado por Foster (1987).

6.2. ESTUDIOS ANTERIORES

Se consultaron las bases de datos provistas por las entidades especializadas en el tema además de la bibliografía disponible para el autor, dentro de las cuales se destacan: De Bermoudes, O. y Velandia, F. (2010), Departamento Administrativo del Medio Ambiente, Hidrogeocol y PNUD (2009), Veloza (2013), CAR y SIAM (2013), Robles y Sáenz (1990), Robles, Martínez, Hincapié y Álvarez (1991), entre otros.

Con el fin de realizar el análisis del comportamiento de los niveles de tabla de agua de la cuenca en estudio, se utilizaron los datos obtenidos por la CAR, SGC y JICA (2012) en el contrato 634 de 2011, titulado "Implementar y efectuar seguimiento a un proyecto piloto de red de monitoreo automático de niveles piezométricos y calidad de agua subterránea, así como realizar la campaña de monitoreo y rediseño de la red de niveles piezométricos y de calidad de agua subterránea en la Sabana de Bogotá" (Anexo 3).

6.3. CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGÍA

Los conceptos referentes a hidrogeología que serán desarrollados a lo largo de este trabajo se encuentran definidos en el Anexo 4.

6.4. EL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD Y SUS LIMITACIONES

En la literatura técnica existen innumerables definiciones respecto a la vulnerabilidad, entre las cuales encontramos:

- Custodio (1995) señala: “la vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para adsorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales”
- Vrba y Zaporozac (1994) definen a la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”.
- Carbonell (1993) define la vulnerabilidad a la contaminación, como a tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero.
- Foster e Hirata (1991) dicen que la “vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga impuesta [de origen artificial]”.
- La Environmental Protection Agency (EPA; 1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facultad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica. Incorporando, además de las condiciones del medio, las propiedades del contaminante y las practicas del cultivo (i.e. vulnerabilidad específica).

Asimismo el riesgo de contaminación, concepto íntimamente ligado con la vulnerabilidad, es entendido como la probabilidad que las aguas subterráneas alcancen niveles de químicos, bacterias, virus, etc., por encima de los cuales peligre la salud humana (Agüero y Pujol, s.f.), y está determinado básicamente por las características del acuífero, las cuales presentan una dinámica lenta bajo escalas razonables de tiempo y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas. Algunas definiciones que se encuentran en la literatura son:

- Vrba y Zaporozac (1994) lo asimilan a la vulnerabilidad específica, que se refiere al peligro de contaminación y deterioro de las características del acuífero respecto a sustancias contaminantes específicas que presentan comportamientos similares (Nitratos, hidrocarburos livianos o pesados, plaguicidas, materia orgánica, fenoles, metales, etc.)
- Foster (1991; 1987) define al riesgo como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero, por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno. Este riesgo es producto de la interacción entre la carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada subsuelo como resultado de una actividad humana y la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, debido a las características naturales de los substratos que lo separan de la superficie.

Aclarando que el término vulnerabilidad específica incluye parcialmente el concepto de riesgo, toda vez que se refiere al peligro de deterioro en relación a las sustancias contaminantes.

6.4.1. METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Existen diversas metodologías para la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos. Estos métodos en esencia, coinciden en la determinación de la vulnerabilidad en función de las características intrínsecas del medio, por ello algunos de los parámetros utilizados para su determinación por ejemplo son: características de la zona no saturada, profundidad del agua subterránea, recarga neta, permeabilidad del subsuelo, entre otros. En la práctica, la utilización de estos métodos depende fundamentalmente de la disponibilidad de información.

Para este trabajo, se utilizará la metodología propuesta por Foster (1987) denominada GOD.

6.4.1.1. Método GOD

Este método propuesto por Foster (1987) establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada, como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster e Hirata, 1988), y se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 (i.e. a mayor valor, más desfavorable es la condición) a tres variables que son las que nominan el acrónimo: G (Groundwater occurrence – tipo de acuífero), O (Overall Aquifer Class – litología de la cobertura), D (Depth to Groundwater – profundidad del nivel de agua o techo del acuífero confinado).

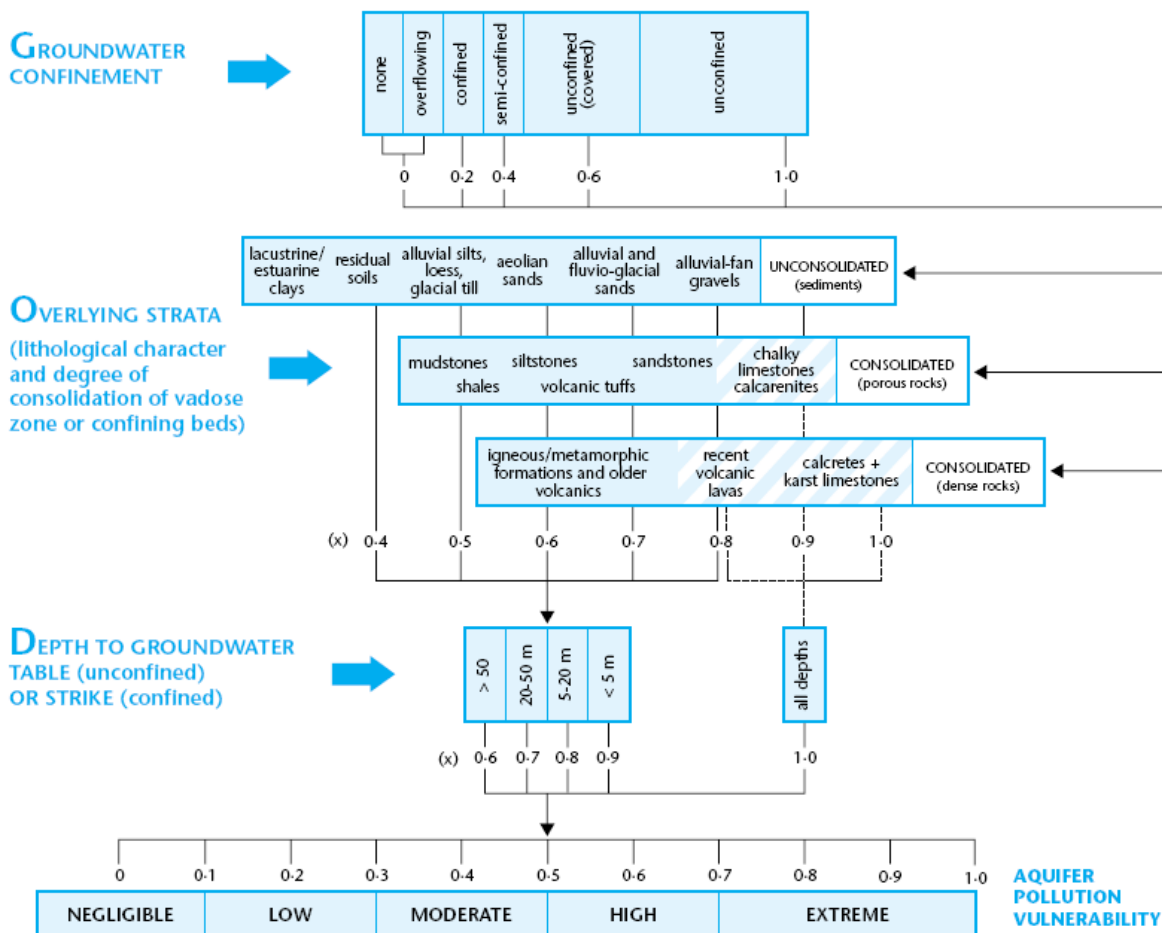


Figura 6.1. Sistema empírico para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero Fuente: Foster e Hirata (1991)

La vulnerabilidad según el método se calcula como el producto de los siguientes factores (Ecuación 6.1.).

$$Vulnerabilidad = G \cdot O \cdot D \quad Ec. 6.1.$$

Una característica del método importante de destacar, es que solo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, sin tomar en cuenta la dilución y dispersión en el acuífero. Se considera vulnerabilidad muy baja si el valor es menor a 0.1, baja si el valor está entre 0.1 y 0.3, moderada si está entre 0.3 y 0.5, alta si está entre 0.5 y 0.7 y extrema si es mayor a 0.7 (Hernández, Haro, y Mahlknecht, s.f.).

En la figura 6.1. se reproduce el diagrama para cualificar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. Los 3 índices que se multiplican entre sí, resultan en uno final (diagrama de salida – output) que puede variar entre 1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (vulnerabilidad mínima).

6.5. ESTRUCTURA HIDROGEOLÓGICA REGIONAL DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Con base en las características geológicas que conforman el subsuelo de la Sabana de Bogotá (figura 4.4.), se observa que en esta se presentan varios complejos hidrogeológicos pertenecientes a una cuenca hidrogeológica intramontana. Donde los complejos acuífero Neógeno-Cuaternario (Formación Sabana y Chía y depósitos de pendiente) y acuitardo paleógeno (Formación Guaduas) constituyen la cobertura de la cuenca, mientras que el acuífero Guadalupe (formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna) se considera como piso intermedio de la cobertura, y el basamento representado por la formación Chipaque (De Bermoudes y Velandia, 2010).

En términos regionales, la macro cuenca de la Sabana de Bogotá presenta una complejidad tectónica, representada por su alto grado de fracturamiento (e.g. fallas de cabalgamiento) que genera el contacto de rocas de edad cretácica con rocas de edad terciaria a reciente (Figura 6.2.). Estas condiciones influyen en las dimensiones y continuidad de las unidades hidrogeológicas y por lo tanto afectan el sistema hidráulico.

Debido a las particularidades presentes en las estructuras geológicas de la cuenca de la Sabana de Bogotá, se considera que todas las unidades hidrogeológicas están relacionadas y forman una unidad hidráulicamente conectada (De Bermoudes y Velandia, 2010). Generando por ello, el establecimiento dentro de la cuenca de dos zonas de interés donde los procesos de recarga y descarga de las aguas subterráneas están determinados por procesos y mecanismos distintos.

Según De Bermoudes y Velandia (2010) la zona Interior, corresponde a la superficie de la cobertura de la cuenca. Dentro de esta zona los acuíferos neógeno-cuaternarios y del paleógeno reciben recarga por la infiltración de las aguas lluvias en áreas muy limitadas ubicadas hacia los bordes internos de la cuenca, donde afloran depósitos más permeables. En el resto del área, la recarga por precipitación se dificulta debido a los niveles arcillosos aflorantes, aunque ésta puede tener importancia para los acuíferos superficiales de carácter local; otra fuente de recarga en la zona Interior proviene de las corrientes superficiales durante los períodos húmedos. La relación hidráulica entre los principales acuíferos y los

ríos también se limita a las partes altas de los valles internos, dado que en la parte plana sus cauces por ser poco profundos generalmente se encuentran colgados en medio de los sedimentos arcillosos. La descarga en esta zona se produce básicamente en forma de flujo base o mediante los manantiales.

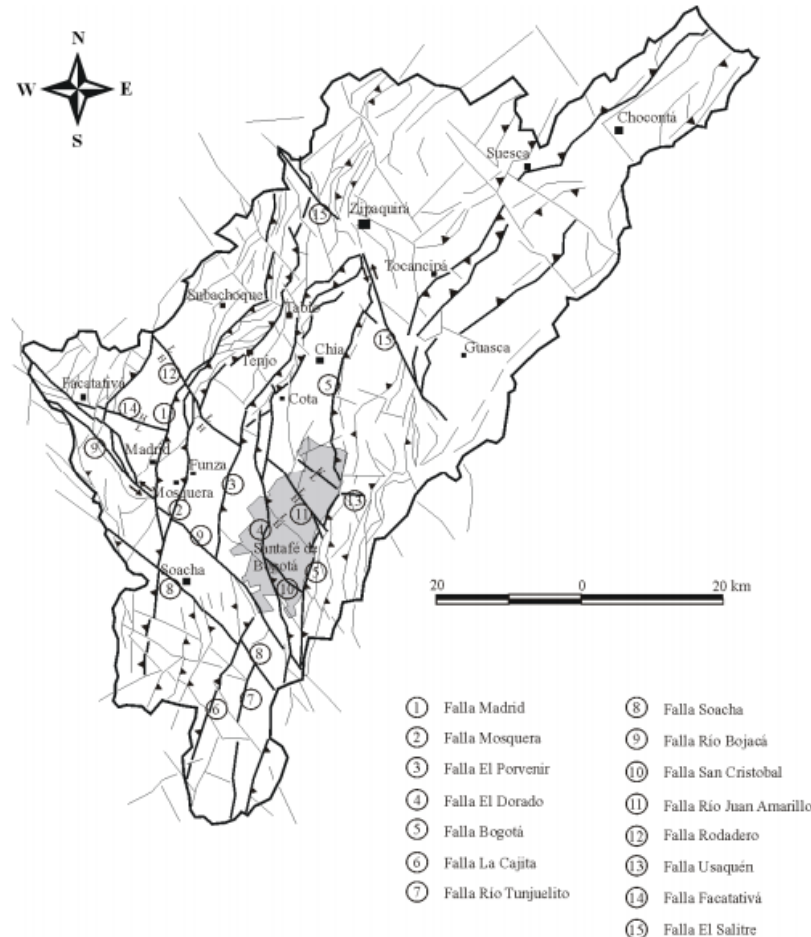


Figura 6.2. Esquema estructural de la Sabana de Bogotá
Fuente: De Bermoudes y Velandia, 2010

La zona Exterior corresponde a las cadenas montañosas donde se alimentan directamente los acuíferos del Complejo Guadalupe. La principal fuente de recarga es la infiltración de las precipitaciones; después la condensación del vapor de agua contenido en los poros y fisuras de las rocas aflorantes. Las aguas infiltradas se descargan en las vertientes en forma de manantiales o se dirigen hacia los valles como flujos subsuperficiales. También existe la descarga frontal de los acuíferos libres que se forman en la zona meteorizada del Complejo Acuífero Guadalupe. El agua del acuífero freático se dirigen hacia los valles y en la zona de contacto con los depósitos recientes ocurre su descarga (flujo lateral).

6.5.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Según Robles *et al* (1991) y Robles y Sáenz (1990) con base en la litología, el grado de fracturamiento de las rocas, la capacidad específica, conductividad hidráulica, distribución areal, producción de los pozos, calidad de agua y la importancia actual y potencial del

acuífero como fuente de abastecimiento, se clasifican las formaciones geológicas en las siguientes unidades hidrogeológicas.

- A. Rocas porosas/fracturadas con gran a moderada importancia hidrogeológica
- B. Sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica
- C. Rocas porosas/fracturadas con poca importancia hidrogeológica
- D. Sedimentos y rocas porosas/fracturadas sin importancia hidrogeológica

6.5.1.1. Rocas porosas/fracturadas con gran a moderada importancia hidrogeológica

6.5.1.1.1. Acuífero Formación Arenisca Dura (K2d)

Este acuífero de edad cretácica de moderada importancia hidrogeológica perteneciente al Grupo Guadalupe, es considerado de extensión local por estar restringido a zonas fracturadas. Es de tipo confinado de origen marino y presenta en el área un alto grado de fracturamiento principalmente en las zonas de la Serranía Tenjo – Tabio, debido al intenso tectonismo que se produce en la zona.

Tiene un espesor aproximado de 350 a 400 m y estratigráficamente se presenta entre la formación Chipaque en la base y la formación Plaeners en el techo. Presenta afloramiento en los bordes de la cuenca con rumbo general NE y conforma las zonas altas de las Serranías de Cota – Chía y Tenjo – Tabio debido a su resistencia a la erosión, no obstante en los bordes orientales de esta serranía, se puede encontrar a profundidades mayores, debido a los efectos de la Falla de Tenjo que provocan un descenso de dicha formación.

El área de recarga del acuífero en la cuenca, se limita a recarga directa de la precipitación en la zona de alto fracturamiento en la Serranía de Tenjo – Tabio y al extremo sur de la Serranía Cota – Chía. La descarga se realiza por los pozos que lo explotan y los manantiales.

El flujo regional tiene una dirección preferencial desde la zona alta de la serranía de Tenjo – Tabio hacia el centro del valle y de ahí hacia el Sur.

6.5.1.1.2. Acuífero Formación Labor y Tierna (K2t)

Este acuífero de edad cretácica perteneciente al Grupo Guadalupe de origen marino, estratigráficamente se presenta entre la formación Plaeners en la base y la formación Guaduas en el techo, no aflora en la zona de estudio, no obstante aparece en columnas litológicas y registros de algunos pozos que captan el acuífero.

En la zona de estudio es un acuífero confinado, cuya forma de recarga es a través del aporte de agua de otros acuíferos a través de la infiltración a lo largo de fracturas, como la Falla de Tenjo. Su descarga se realiza por la explotación de este acuífero a través de los pozos que la explotan.

6.5.1.2. Sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica

Corresponden a esta unidad hidrogeológica los acuíferos de la formación Sabana (Q1sa) y Formación Chía (Q₂ch), de los cuales se hace una descripción de sus características principales.

6.5.1.2.1. Acuífero Formación Sabana (Q1sa)

Este acuífero de edad cuaternaria es de tipo confinado, semi-confinado y libre, de origen continental producto de la erosión y transporte de rocas clásticas de las serranías adyacentes y se presenta a lo largo de la zona plana de la cuenca, con espesores de 50 m aproximados en los bordes, aumentando hasta 250 m en la zona central.

Estratigráficamente se encuentra suprayaciendo la Formación Bogotá y Guaduas y en su techo, en algunos sectores es posible encontrar a la Formación Chía y depósitos coluviales donde estos se presentan. En el resto del área plana afloran superficialmente.

La recarga del acuífero se debe a la percolación del agua precipitada en el área plana, en las zonas de contacto con el Acuífero Grupo Guadalupe principalmente en el borde Oriental de la Serranía de Tenjo – Tabio y de manera lenta en forma vertical ascendente, de las aguas de acuíferos que la infrayacen (i.e. acuíferos formación Guadalupe). Por su parte la descarga se realiza a través de los pozos y aljibes que lo explotan distribuidos a lo largo de toda la zona plana, la evapotranspiración y finalmente la descarga directa hacia el río Bogotá.

6.5.1.2.2. Acuífero Formación Chía (Q₂ch)

Es de edad cuaternaria y poca importancia hidrogeológica principalmente por su escasa distribución, poco espesor y debido a que se utilizan para pozos pequeños y aljibes. Presentándose en las riberas del Río Chicú y quebradas tributarias donde aparecen en terrazas bajas y zonas inundables con espesor menor a 15 m.

Este acuífero se encuentra suprayaciendo al acuífero Formación Sabana. Es de tipo libre, de origen continental, producto de la erosión y transporte de rocas clásticas de las serranías adyacentes y no se conoce su espesor, suponiéndose inferior a 30 m.

La recarga directa de este acuífero se realiza por percolación de la precipitación y de las aguas corrientes superficiales. La descarga tiene lugar solamente a través de los aljibes que lo explotan y la evapotranspiración que se genera en la zona. El flujo subterráneo en general es de NE – SW igual que la dirección del río Bogotá y siguiendo la dirección de los afluentes hasta llegar al emisario principal.

6.5.1.3. Rocas porosas/fracturadas con poca importancia hidrogeológica

En esta clasificación se encuentran los acuíferos Formación Guaduas (K₂E₁g) y Formación Plaeners (K₂p)

6.5.1.3.1. Acuitardo Formación Guaduas (K₂E₁g)

Este acuífero de edad cretácico-terciaria de origen transicional es de poca importancia hidrogeológica, de tipo confinado a semi-confinado de extensión regional, tiene muy poca exposición en la zona de estudio, aflorando únicamente entre Tenjo y Tabio con rumbo NE y buzando 10° al SE.

Tiene un espesor variable entre 150 y 550 m aproximadamente y estratigráficamente se presenta entre los acuíferos formación labor y tierna en la base y Formación Sabana en el techo.

El área de recarga está limitada a los pequeños afloramientos en superficie y sólo a través de las zonas fracturadas. En profundidad puede ser recargado por percolación de los acuíferos de la Formación Sabana y del Grupo Guadalupe. Su descarga se realiza a través de los pozos que lo explotan.

6.5.1.3.2. Acuitardo Formación Plaeners (K₂p)

El acuífero Formación Plaeners es de edad cretácica y origen marino, de poca importancia hidrogeológica y de extensión regional. No obstante se encuentra restringido en el área de estudio a zonas fracturadas donde se presenta un intenso tectonismo como la Serranía de Tenjo – Tabio, donde aflora a lo largo de esta y parte de la Serranía de Cota – Chía con rumbo general NE; en general es un acuífero de tipo confinado, con un espesor aproximado de 120 m.

El área de recarga se limita a las zonas fracturadas como la Serranía de Tenjo – Tabio, donde los cambios abruptos del relieve le permiten aprovechar parte del escurrimiento que drena de las zonas más altas. En torno a la descarga, no se conoce algún pozo que explote dicho acuífero. El flujo subterráneo de acuerdo a su estructura es desde la Serranía de Tenjo – Tabio hacia el valle y de allí hacia el sur.

6.5.1.4. Sedimentos y rocas porosas/fracturadas sin importancia hidrogeológica

Pertencen a esta unidad los depósitos coluviales, cuaternarios sin diferenciar y la formación Chipaque

6.5.1.4.1. Depósitos Coluviales (Q₂c) y Cuaternarios sin diferenciar (Q)

Este acuífero de origen continental y edad cuaternaria, carece de importancia hidrogeológica debido a su limitada extensión, reducido espesor y carácter impermeable. Aflora en áreas localizadas en el borde E y NE del valle de la cuenca del Río Chicú.

6.5.1.4.2. Formación Chipaque (Ksc)

La Formación Chipaque de edad cretácica y origen marino, de tipo confinado, conformada por lutitas, limolitas y areniscas sin importancia hidrogeológica debido a su posición estratigráfica, ya que solo es posible encontrarlo a muy grandes profundidades y también debido a su litología, no obstante es posible localizar afloramientos de este en el municipio de Tabio. Su espesor es superior a 400 m y su techo es la base impermeable que limita el Grupo Guadalupe.

Tabla 6.1. Características hidrogeológicas de la Cuenca del Río Chicú

UNIDAD	SÍMBOLO	ESPESOR		LITOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS					
		[m]			Clasificación	T [m ² /día]	K [m/día]	S	Q/s [LPS/m]	Q [LPS]
Depósitos Coluviales	Q2c	1 – 12a,c		Gravas, guijarros, bloques y arcillas	D	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Formación Chía	Q2ch	2 – 15a,c; <30b		Arcillas y limos	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Formación Sabana	Q1sa	<200a,c; <500b		Arcillas, arenas y gravas	B	5 - 20a; 7.3 - 52.45b	0.4 - 4.5a; 0.11 - 3.5b	5.5 x 10 ⁻³ - 4.5 x 10 ⁻⁵ a; (1.3 - 2.8) x 10 ⁻³ b	0.03 - 0.2a; 0.2 - 0.6b	<1a; 0.03 - 0.8b
Formación Guaduas	K2E1g	150 - 500a; 600b		Arcillolitas y areniscas	C	2.3 - 20.4b	N.D.	(1.16 - 7.2) x 10 ⁻³ b	0.08b	1.6 - 4b
Formación Labor - Tierna	K2t	100a,c; 220b		Areniscas, arcillolitas y limolitas.	A	50 - 270a; 16.24 - 360b	1 - 3.5a; 1 - 8b	5 x 10 ⁻⁴ a; 5.9 x 10 ⁻³ - 2.5 x 10 ⁻⁴ b	0.3 - 0.5a; 0.15 - 5b	3 - 15a; 2 - 30b
Formación Plaeners	K2p	120a,c; 60b		Arcillolitas, limolitas silíceas, liditas y areniscas	C	9.6b (D.P.)	0.3b (D.P.)	N.D.	0.005 - 0.07b	2 - 14b
Formación Arenisca Dura	K2d	350a; 400b		Areniscas, lutitas y arcillolitas	A	15 - 60a; 22 - 356b	0.3 - 1a; 0.8b	5 x 10 ⁻⁴ a	0.08 - 5a; 0.2 - 0.3b	7 - 20a; 2 - 14b
Formación Chipaque	Ksc	>400a; 130b		Lutitas, limolitas y arcillolitas	D	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

A: Rocas porosas/fracturadas con gran a moderada importancia hidrogeológica; B: Sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica; C: Rocas porosas/fracturadas con poca importancia hidrogeológica; D: Sedimentos y rocas porosas/fracturadas sin importancia hidrogeológica; N.D.: Dato no reportado; D.P.: Dato Puntual

Fuente: Robles et al (1991)a; Robles y Sáenz (1990)b, CAR y SIAM (2013)c.

6.6. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LOS ACUÍFEROS DE MAYOR INTERÉS

En la zona de estudio, los acuíferos de mayor interés son los de la Formación Arenisca Dura, Formación Labor y Tierna y Formación Sabana. En la tabla 6.1. se presenta la información disponible respecto a los parámetros hidráulicos de cada una de los acuíferos, capacidad específica, entre otras, según la información disponible. Para la finalidad de este trabajo, se realizará la evaluación del acuífero de sedimentos de edad Neógeno – Cuaternario (i.e. Formación Sabana y Chía).

6.6.1. ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA

Para el acuífero objeto de estudio conformado por las formaciones Sabana y Chía. Con base en sus parámetros hidráulicos (Tabla 6.1.) se determina que este acuífero presenta características de transmisividad baja a media ($T: 5 - 52.45 \text{ m}^2/\text{día}$) presentando un funcionamiento de libre a confinado ($S: 4.5 \times 10^{-5} - 2.8 \times 10^{-3}$), dándole como características para la región de la Sabana de Bogotá, un acuífero de sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica.

6.6.1.1. Análisis de Niveles Freáticos

Para el análisis del comportamiento del agua subterránea de la zona en estudio, se utilizó la información de los niveles de tabla de agua de los años 1998, 2007, 2011 y 2012 (Anexo 3), obtenidos por la CAR. Conociendo que los niveles freáticos presentan un valor medio de $2569.8 \pm 37.5 \text{ m}$ para 1998, $2561.2 \pm 37.1 \text{ m}$ para el 2007, $2563 \pm 33.7 \text{ m}$ para el 2011 y $2566.0 \pm 32.11 \text{ m}$ para el año de 2012 (Figura 6.3.).

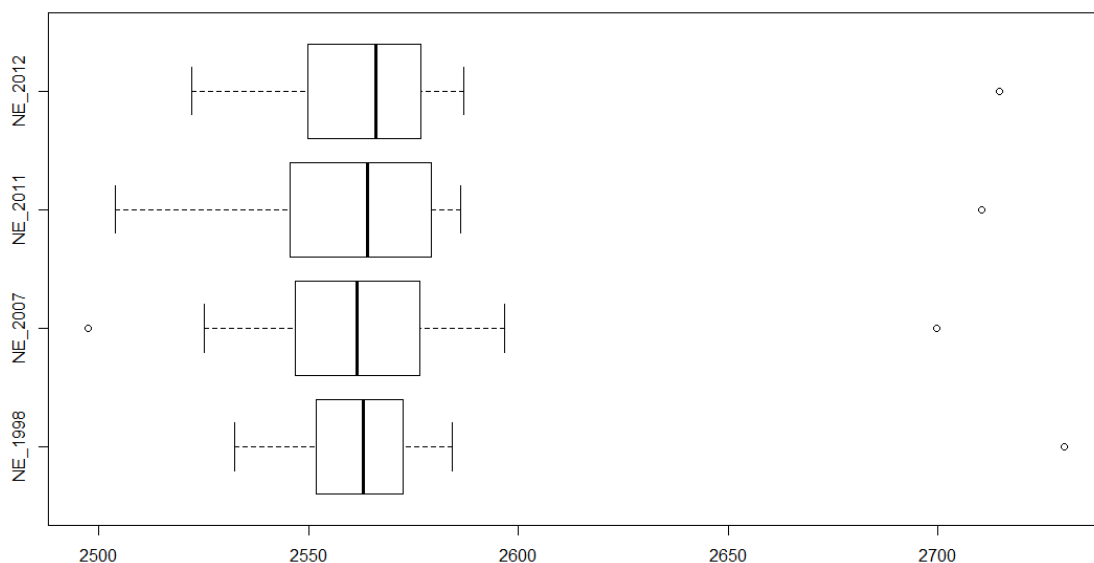


Figura 6.3. Boxplot Niveles freáticos de los años 1998, 2007, 2011 2012 en la zona de estudio

Se realizó la prueba U de Mann-Whitney para muestras pareadas, encontrando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para la totalidad de los años analizados.

6.6.1.2. Análisis Espacial de los Niveles Freáticos

6.6.1.2.1. Elaboración de mapas de Niveles Freáticos para los años 1998, 2007, 2011 y 2012 de la zona de estudio

Con base en los niveles de tabla de agua para los años analizados, se generaron los semivariogramas experimentales de los datos ajustándolos frente a los variogramas teóricos, obteniendo los siguientes parámetros de ajuste (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de niveles freáticos.

	NE_1998	NE_2007	NE_2011	NE_2012	Δ NE 98-07	Δ NE 07-11	Δ NE 11-12
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
Orden de remoción de tendencia	Secundaria	Secundaria	Secundaria	Secundaria	Secundaria	Secundaria	Secundaria
Transformación	Log10	Log10	Log10	Log10	No	No	No
Pepita (Nugget)	1.68×10^{-4}	0	0	0	123.56	0	0
Tamaño de Lag	1355.8	89.287	65.235	88.462	1355.8	98.294	57.08
Meseta (Sill)	0	4.21×10^{-4}	2.57×10^{-4}	2.56×10^{-4}	0	87.268	178.43
Número de Lags	12	12	12	12	12	12	12
Anisotropía	No	Si	Si	Si	No	Si	Si
Dirección [Grados]	-	34.5	21.4	339.1	-	62.4	19.6
Tolerancia [Grados]	-	45.0	61.1	62.0	-	59.3	69.0
Ancho de banda (Lags)	-	3.0	6.0	6.5	-	5.4	36.7
Rango Mayor	-	1019.98	750.911	1041.07	-	1165.11	688.414
Rango Menor	-	262.344	401.42	585.236	-	549.339	308.737
RMSS	1.414	1.399	0.8369	0.8439	1.292	1.393	0.5821

RMSS: Desviación de la raíz cuadrada media, por las siglas en ingles de Root-Mean-Square Standardized

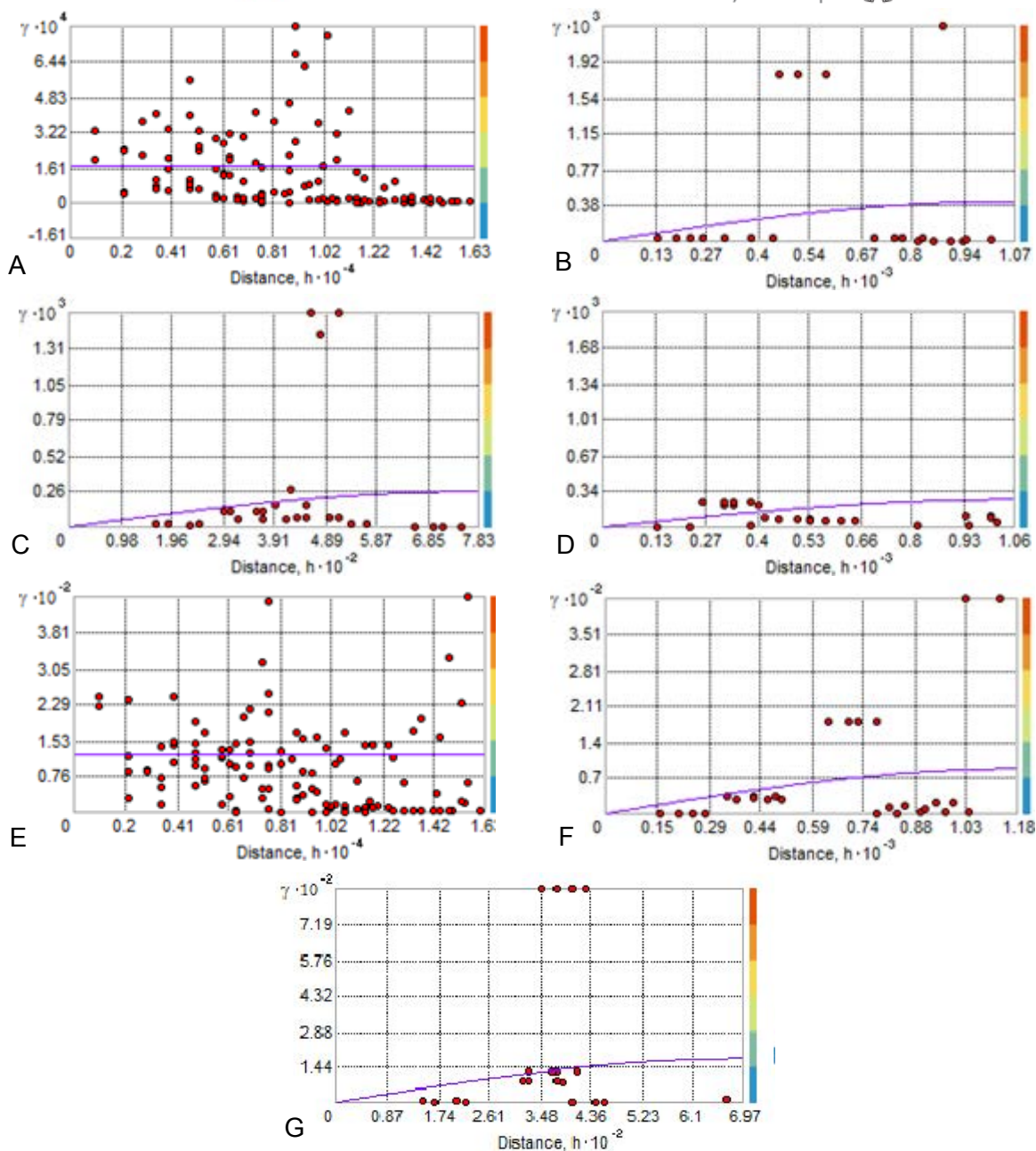


Figura 6.4. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de niveles freáticos: A) Año 1998; B) Año 2007; C) Año 2011; D) Año 2012; E) Diferencia Años 1998 – 2007; F) Diferencia Años 2007 – 2011; G) Diferencia Años 2011 – 2012

Cabe hacer mención que los resultados obtenidos a través del análisis geoestadístico se basaron en supuestos, tales como la medición bajo las mismas condiciones de reposo de los niveles dinámicos en fase estacionaria de los pozos que captan agua subterránea del acuífero estudiado, que dichos pozos se encuentren penetrando totalmente el acuífero, la presencia de un acuífero de carácter isótropo, homogéneo, entre otras, lo cual hace que estos resultados no presenten un carácter absoluto, por lo que son susceptibles de recalcularse y mejorarse, pero sirven como principal aproximación (RMSS: 1.109 ± 0.345) para determinar el comportamiento del agua subterránea en los sedimentos analizados.

Los semivariogramas obtenidos se pueden observar en la Figura 6.4. Con base en estos variogramas ajustados al modelo teórico esférico, se procedió a realizar la interpolación espacial de los datos a través del método de Kriging Ordinario, obteniendo los mapas de niveles freáticos para la región en estudio (Planos 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18).

6.6.1.2.2. Niveles Freáticos para el año 1998

Los niveles dinámicos en fase estacionaria del acuífero presente en la formación Sabana y Chía (Plano 12), poseen su máxima altura de columna de agua en el sector N de la cuenca, ubicado en la falda de la serranía de Tenjo, con alturas de columna de agua mayores a 2618 m.s.n.m. Sobre esta zona se encuentran acumulaciones de gravas (Van Der Hammer, 1973; Robles *et al.*, 1991), lo cual permite interpretar que en esta zona se produce la recarga tanto vertical como lateral. La dirección de flujo se ubica desde la zona de recarga ubicada al N-NW de la cuenca y se dirige con rumbo S-SE en dirección del sistema superficial hacia el Río Bogotá. No se evidencia efectos de sobre explotación que generen alteraciones (i.e. abatimientos de los niveles freáticos) a los flujos naturales del agua subterránea.

6.6.1.2.3. Niveles Freáticos para el año 2007

Los niveles dinámicos en fase estacionaria para el año 2007 (plano 13) presentan su máximo nivel en la zona N de la cuenca con valores mayores a 2596 m.s.n.m. en la zona de recarga. Se observa que sobre dicha zona se encuentra un abatimiento en el nivel freático, que presenta valores de columna de agua menores a 2550 m.s.n.m. (abatimiento de 46 m en comparación con los valores máximos en la zona de recarga) causados por sobre explotación del recurso hídrico (Pozos placa CAR VI- 13 y VI – 25), lo cual generó la división de la zona de recarga en dos, la mayor ubicada al N de la cuenca y la otra, de menor tamaño ubicada al NW de la cuenca. La dirección de flujo regional se da en dirección SW hacia el río Bogotá, con la aparición de varios flujos locales productos de los abatimientos en la zona N de la cuenca.

6.6.1.2.4. Niveles Freáticos para el año 2011

Los niveles dinámicos en fase estacionaria del acuífero de sedimentos del cuaternario - neógeno (Plano 14) para el presente año, poseen su máxima altura de columna de agua al N de la zona en estudio con valores mayores a 2579 m.s.n.m. Se encuentran sectores críticos en los cuales los abatimientos en los niveles de tabla de agua han aumentado drásticamente en comparación con el año 2007. El primero ubicado en la zona N – NW de la cuenca, donde se encuentran los pozos con placa CAR VI – 13, VI – 23, VI – 25, 525-3 y 525 – 4, cuyos abatimientos han superado los 90 m en comparación con las mayores alturas de columna para el año en estudio: este abatimiento ha generado la reducción y división de la zona de recarga ubicada en las faldas de la serranía de Tenjo.

Por otro lado, un segundo sector crítico ubicado en el sector NE de la cuenca, donde se están presentando variaciones locales en la dirección de flujo por procesos de sobre explotación del recurso, los cuales han generado decaimientos en los niveles freáticos en el orden de 24 m: algunos pozos que generan este problema son el VI – 58, VI – 05, VI – 09 y VI – 24. En términos de la dirección de flujo regional del agua subterránea se desarrolla en dirección N – SE, con la presencia de diversos flujos locales de agua que son direccionados por los puntos de extracción.

6.6.1.2.5. Niveles Freáticos para el año 2012

Para el año 2012 (Plano 15), sobre la zona ubicada en la falda de la serranía de Tenjo se encuentran dos zonas de recarga: la mayor presenta una altura de columna con valores mayores a 2581 m, por su parte la menor área presenta valores de nivel freático mayores a 2623 m. A su vez, se presenta una zona intermedia en la cual se generan abatimientos en el orden de 60 m, y una pequeña zona donde el nivel freático alcanzó valores de 2598 m (Pozo VI – 23).

Se observa que el flujo regional del agua subterránea se desarrolla en dirección N – SE a favor del potencial hidráulico, con presencia de varios flujos locales de agua que son direccionados por los diversos puntos de extracción que presenta la región en estudio.

6.6.1.2.6. Variación Interanual del nivel freático 1998 – 2007

Posterior a la realización de la prueba U de Mann-Whitney para muestras pareadas, estadísticamente se encuentran diferencias significativas entre los datos de los años analizados ($p < 0.05$). Se observa (Plano 16) reducción de los niveles freáticos en las zonas SW y NE de la cuenca, relacionadas a la reducción del área de recarga en el año 2007 por la sobre explotación que se genera en este último año, pasando de tener niveles de altura de agua de 2618 m para 1998 a 2596 m en el 2007 (variación: 22 m) en la zona de recarga. Por otro lado, existen pequeños aumentos en los niveles freáticos (1.4 m) en zonas ubicadas al N de la cuenca, producidas por la recarga de agua meteórica presentadas en el año.

6.6.1.2.7. Variación Interanual del nivel freático 2007 – 2011

Posterior a la realización de la prueba U de Mann-Whitney para muestras pareadas, estadísticamente se encuentran diferencias significativas entre los datos de los años estudiados ($p < 0.05$). Al comparar los niveles para los años 2007 (Plano 13) y 2011 (Plano 14) se observa que la zona crítica ubicada en la zona de recarga, ha aumentado su tamaño, al generarse un crecimiento en el abatimiento del nivel pasando de 46 m (1998) a 90 m (2011), generando como consecuencia el desarrollo de dos zonas de recarga para la cuenca; una de gran tamaño ubicada al N de la cuenca, y otra de menor tamaño ubicada al NW. A su vez se observa una disminución en los niveles de agua (Plano 17) en los sectores N y E de la cuenca oscilando entre 1.3 y 30 m de reducción, causado por la

explotación de agua subterránea que se genera en la zona (Pozos VI – 55, VI – 39, VI – 34, VI – 32, VI – 30, VI – 28, VI – 26, VI – 19, VI – 18).

La generación de dos zonas de recarga y el efecto que produce los diversos pozos, han causado el desarrollo de dos flujos regionales definidos, el primero desde la región N – SE, y el segundo, que parte desde la segunda zona de recarga con dirección NW – NE.

6.6.1.2.8. Variación Interanual del nivel freático 2011 – 2012

Posterior a la realización de la prueba U de Mann-Whitney para muestras pareadas, estadísticamente se encuentran diferencias significativas entre los datos de los años analizados ($p < 0.05$). Al igual que los años anteriores, se observa una reducción en los nivel freáticos en las zonas de recarga (Plano 18) que oscila entre 0.2 y 11 m. Se continua la tendencia en términos de la dirección de flujo regional, presentando dos flujos regionales definidos y diversos flujos locales definidas por las explotaciones que se generan en la cuenca.

6.6.2. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO SEGÚN MÉTODO GOD

Para la zona en estudio, se determinó el mapa de vulnerabilidad (Plano 19), para el cual, se usaron las siguientes convenciones de colores (tabla 6.3.) según lo siguieren Vrba y Zaporozec (1994) citado por Auge (2004).

Tabla 6.3. Semáforo de Colores para mapa de vulnerabilidad

Color	Vulnerabilidad
Verde Oscuro	Muy Baja
Verde Claro	Baja
Amarillo	Moderada
Rosa	Alta
Rojo	Extrema

Fuente: Auge (2004)

Para el acuífero de la formación Sabana y Chía, se obtuvieron los parámetros consignados en el Anexo 5.

6.6.2.1. Tipo de Acuífero (Groundwater Occurrence)

El acuífero estudiado de edad cuaternaria, presenta un carácter libre a confinado. Con base en esta información, y al no conocer las zonas específicas donde se presenta el semi-confinamiento o confinamiento del acuífero, se dio un valor de 0.5 a todos los pozos que se estudiaron en la zona.

6.6.2.2. Litología de la cobertura (Overall Aquifer Class)

El acuífero del Neógeno – Cuaternario, se encuentra constituido por sedimentos no consolidados arenosos de grano fino y arcillas, con intercalaciones lenticulares de arenas y limos. Con base en estas características, y dada la heterogeneidad presente en la litología de la zona, se dio un valor de 0.7 a todos los pozos estudiados en la zona.

6.6.2.3. Profundidad del nivel de agua (Depth to Groundwater)

Con base en las alturas de nivel estatico del acuífero estudiado para los años 2011 y 2012, se encontro que para los dos años estudiados, los pozos presentaban valores de 0.7 (i.e. Profundidades entre 20 – 50 m; 51.5% de pozos) y 0.8 (i.e. Profundidades entre 5 – 20 m; 48.5% de pozos).

6.6.2.4. Indicador de Vulnerabilidad de polución del acuífero

Con base en la ecuación 6.1, se determinó el indice de vulnerabilidad para cada pozo estudiado, encontrando que el 51.5% de los pozos (17) presentan una vulnerabilidad moderada tendiente a baja, y el 48.5 % restante (16 pozos), presentan una vulnerabilidad moderada.

6.6.2.5. Evaluación espacial del indicador de vulnerabilidad de polución del acuífero

Con base en el plano 19, se observa que las zonas de recarga ubicadas al NE de la cuenca y los pozos que se presentan en la región central de la misma presentan una vulnerabilidad a la polución moderada, producto que en dichas zonas es donde se evidencia la recarga del acuífero. Por su parte, los pozos que se encuentran a los bordes laterales y limites al SW de la cuenca, presentan vulnerabilidad intrinseca a la polución moderada tendiente a baja. Al no existir una diferencia estadística significativa entre los valores del indice de vulnerabilidad para el acuífero estudiado, es posible indicar que el acuífero presenta un grado de vulnerabilidad intrinseco moderado tendiente a bajo en forma generalizada para todo el acuífero.

CAPÍTULO 7. HIDROGEOQUÍMICA I

- 7. HIDROGEOQUÍMICA
 - 7.1. MARCO TEÓRICO
 - 7.2. METODOLOGÍA
 - 7.3. RESULTADOS



7. HIDROGEOQUÍMICA I

7.1. MARCO TEÓRICO

7.1.1. REVISIÓN DE INFORMACIÓN ANTECEDENTES

Se hizo la revisión bibliográfica de estudios antecedentes sobre la cuenca del Río Chicú, encontrando bases de datos de organizaciones y entidades públicas encargadas de la gestión e investigación geológica e hidrogeológica de la Sabana de Bogotá, tales como el Servicio Geológico Colombiano [SGC] y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR].

Los trabajos encontrados en dichas bases de datos, que hacían referencia a revisiones hidrogeoquímicas de la cuenca y del acuífero estudiado fueron:

7.1.1.1. Estudio Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá: Hidrogeología de la Cuenca del Río Chicú

Realizado por Robles y Sáenz en 1990 en asociación con el SGC (anteriormente Ingeominas), fue un trabajo en el cual se evaluó geológica, hidrogeológica e hidroquímicamente la cuenca y los tres acuíferos que se presentan en la zona. En esta investigación, se obtuvo que el acuífero de Depósitos de Terraza alta (i.e. Formación Sabana y Chía, objeto de estudio), hidroquímicamente contiene agua im potable, de tipo bicarbonatada sódica y bicarbonatada magnésica con alta concentración de iones en solución, apta para el riego a excepción de zonas salobres y saladas que se encontraban en las veredas de Poveda, Guangatá y Martín.

Para obtener estos resultados se recolectaron 157 muestras de puntos de extracción ubicados en la cuenca del Río Chicú. Estos puntos se discriminaron de la siguiente manera: 134 pozos con profundidades entre 10 y 300 m, 10 aljibes entre 0,5 y 14 m y 12 manantiales.

En resumen, determinaron que el hierro aumentaba desde la zona sur y este (0,1 a 5 mg/L) hacia el norte de la cuenca presentando valores entre 20 y 40 mg/L en la vereda Poveda. En torno a la conductividad, las aguas de la región son dulces a excepción de las extraídas en las veredas Poveda, Guangatá ($EC_w > 5000 \mu S/cm$) y Espino ($EC_w > 1000 \mu S/cm$), lo que se relaciona con los niveles de cloruros encontrados. Con respecto a los bicarbonatos, se presentan dos zonas, una central que corresponde aproximadamente al 50% del área de la cuenca, donde se encuentran aguas con concentraciones de bicarbonatos entre 180 y 580 mg/L, clasificando esta agua como tolerable para consumo humano, a su vez, se presenta una segunda zona que rodea a la zona central limitada por los piedemontes, con concentraciones $< 180 mg HCO_3^-/L$, clasificándose como potables.

La dureza presenta valores medios de 500 mg CaCO₃/L en las veredas Martín Espino, Guangatá y Poveda ubicadas al noreste de la cuenca, en el área restante los niveles de dureza oscilan entre 30 y 150 mg CaCO₃/L. Por último, en general se encontraron valores de color entre 15 y 95 UPC en la totalidad de las muestras y turbidez entre 8 – 100 NTU en el 80% de las muestras haciendo de estas, aguas no potables.

7.1.1.2. Estudio Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá: Sector Tibitó – Salto de Tequendama y Oriente Bogotano, Sabana de Bogotá

Realizado por Robles, Martínez, Hincapié y Álvarez en 1991 en asociación con el SGC y en colaboración con la CAR, encontraron en general que la calidad físico-química del agua subterránea en los acuíferos presentes en la cuenca, entre los que se encuentra la formación objeto de estudio de este trabajo, no es apta para consumo humano por su alto contenido de hierro, sin embargo, es apta para riego en todos los suelos y cultivos.

Para ello, este estudio se tomó 139 muestras de puntos de extracción de agua subterránea del acuífero cuaternario y Guadalupe, de los cuales 97 puntos presentaban un error superior al 10% en el balance iónico por inconvenientes en la determinación de calcio y magnesio, por lo cual se tuvo únicamente en cuenta 42 muestras. Estos puntos de muestreo se encuentran ubicados en la ciudad de Bogotá, y los municipios de Cota, Funza, Mosquera, y Cajicá.

Los resultados obtenidos para las muestras del acuífero cuaternario se presentan a continuación (Tabla 7.1.).

Tabla 7.1. Resultados Plan de Manejo Ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica.

T (°C)	pH	ECw (μS/cm)	TDS (mg/L)	Alc. (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
19.2 ± 5.5	7.4 ± 0.5	548.2 ± 426.9	322 ± 202	234.4 ± 201.6	38.3 ± 40.1	5.6 ± 5.3
Na (mg/L)	K (mg/L)	Fe (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
78.4 ± 75.7	18.3 ± 30.4	4.9 ± 3.6	287 ±246	34.4 ± 39.2	0.6 ± 1.4	19.9 ± 10.7

T: Temperatura; pH: Potencial de Hidrogeno; ECw: Conductividad Eléctrica; TDS: Sólidos disueltos totales; Alc: Alcalinidad Total.

En general, el agua extraída de los depósitos cuaternarios presenta una conductividad eléctrica entre 100 – 1500 μS/cm, una concentración de hierro total entre 0 – 20 mg/L, una dureza total entre 50 a 150 mg CaCO₃/L, un pH entre 6 – 8 y una concentración de sólidos disueltos totales de 10 a 500 mg/L.

En torno a la conductividad eléctrica, se encontró un aumento desde los pozos ubicados en el piedemonte de la zona noreste del área (100 μS/cm) aumentando en la zona

ubicada en los alrededores de la población de Funza (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Respecto al hierro en solución, este se encuentra principalmente como bicarbonato ferroso con concentraciones que oscilan entre 0,3 y 5 mg/L, encontrando zonas ubicadas al oeste del área estudiada, en los alrededores de los municipios de Engativá, Funza y Mosquera áreas con las mejores concentraciones de este elemento (0.3 mg Fe/L).

7.1.1.3. Plan de Manejo Ambiental realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

Realizado por la CAR en 2008, se suscribe la “Zona Crítica” la cual comprometió la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo en los municipios de Tenjo, El Rosal, Madrid, Funza, Facatativá, Mosquera y parte de los municipios de Cota, Tabio y Subachoque.

Para la realización de este trabajo, la CAR en los años 2003 y 2004 realizó el diseño y análisis de calidad de la red de monitoreo de agua subterránea conformada por 90 puntos de extracción y ampliada a 101 para el año 2004, distribuidos a lo largo y ancho de la sabana de Bogotá los cuales toman agua de los acuíferos Cuaternario, Guadalupe, Terciario y mezcla de algunos de ellos. En este proyecto se analizaron las características fisicoquímicas, bacteriológicas y plaguicidas.

Tabla 7.2. Resultados Plan de Manejo Ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica.

Variable	pH	N° Pozos	ECw [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	N° Pozos	Color [UPC]	N° Pozos	OD [mgO_2/L]	N° Pozos
	4.4 – 6.1	2	4.2 – 112	1	5 – 15	3	0.7 – 2.8	3
Rango	6.1 – 6.7	5	112 – 257	3	15 – 50	4	2.8 – 4.2	4
	6.7 – 7.8	4	257 - 2441	7	50 – 300.1	2	4.2 – 26.7	4
Variable	Na [mg/L]	N° Pozos	K [mg/L]	N° Pozos	Ca [mg/L]	N° Pozos	Mg [mg/L]	N° Pozos
			0.19 – 2.74	1	0.84 – 9.83	0	0.05 – 1.74	3
Rango	No data		2.74 – 6.24	4	9.83 – 23.39	4	1.74 – 3.61	3
			6.24 – 19.9	6	23.39 – 225.1	7	3.61 – 328.3	5
Variable	Fe [mg/L]	N° Pozos	Mn [mg/L]	N° Pozos	Dureza [mg/L]	N° Pozos	SiO ₂ [mg/L]	N° Pozos
Rango	0 – 1.36	2	0 – 0.01	4	1.8 –	0	0.86 –	4

					30.27		4.45	
	1.36 – 5.07	2	0.01 – 0.1	3	30.27 – 60.8	3	4.45 – 13.13	2
	5.07 – 21.61	7	0 – 5.151	4	60.8 – 1914	8	13.13 – 31.76	5
Variable	Alc. Total [mg/L]	N° Pozos	Cl ⁻ [mg/L]	N° Pozos	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	N° Pozos	N-NO ₃ ⁻ [mg/L]	N° Pozos
	0 – 56.5	1	0.2 – 1.3	2			0 – 0.2	5
Rango	56.6 – 124	4	1.3 -3.1	4	No data		0.2 – 0.3	2
	124 – 477.1	6	3.1 – 214.1	5			0.3 - 4	4
Variable	N-NH ₄ ⁺ [mg/L]	N° Pozos	P-PO ₄ ³⁻ [mg/L]	N° Pozos	E. Coli [UFC]	N° Pozos	Colifor. [UFC]	N° Pozos
	0 – 0.42	3	0 – 0.09	6	10 – 31	1	8 – 150	4
Rango	0.42 – 3.03	3	0.09 – 0.8	3	31 – 300	2	50- 1100	5
	3.03 – 41.38	5	0.8 – 7.541	2	300 - 301	0	1100 - 24010	2
Variable	Endrin Cet [µg/L]	N° Pozos	Endrin Ald [µg/L]	N° Pozos	Endosulfa n [µg/L]	N° Pozos	Endosulfa n II [µg/L]	N° Pozos
	0 – 0.01	7	0 – 0.03	10	0 – 0.01	1	0 – 0.01	8
Rango	0.01 – 0.04	2	0.03 – 0.12	1	0.01 – 0.03	6	0.01 – 0.04	1
	0.04 – 1.1601	2	0.12 – 0.1201	0	0.03 – 0.579	4	0.04 – 0.1501	2
Variable	Endosulf an I [µg/L]	N° Pozos	Dieldrin [µg/L]	N° Pozos	d-BHC [µg/L]	N° Pozos	b-BHC [µg/L]	N° Pozos
	0 – 0.01	8	0 – 0.01	8	0 – 0.01	4	0 – 0.01	3
Rango	0.01 – 0.04	1	0.01 – 0.03	1	0.01 – 0.02	4	0.01 – 0.03	5
	0.04 – 0.08	2	0.03 – 0.17	2	0.02 – 0.2	3	0.03 – 0.06	3
Variable	Aldrin [µg/L]	N° Pozos	a- Clordan o [µg/L]	N° Pozos	4-4'-DDT [µg/L]	N° Pozos	4-4'-DDE y DDD [µg/L]	N° Pozos
	0 – 0.01	7	0 – 0.01	5	0 – 0.04	9	0 – 0.02	9
Rango	0.01 –	2	0.01 –	4	0.04 –	1	0.01 –	1

0.03		0.04		0.16		0.15	
0.03 –	2	0.04 –	2	0.16 –	1	0.15 –	1
0.018		0.08		0.36		0.2001	

ECw: Conductividad Eléctrica; OD: Oxígeno disuelto; Alc. Total: Alcalinidad Total; E. Coli: Escherichia Coli; Colif: Coliformes Totales; Endrin Cet: Endrin Cetona; Edrin Ald: Endrin Aldehído; Endosufan: Endosulfan sulfato; UPC: Unidades de platino-cobalto; UFC: Unidades formadores de colonia.

Para las 90 muestras de agua subterránea se determinó el balance iónico (%CBE) obteniendo un valor medio de $76.1 \pm 2.9\%$. Los resultados obtenidos en este estudio para la cuenca del Río Chicú se presentan en la tabla 7.2., en la cual se encontraban 11 puntos de extracción sobre el acuífero cuaternario. A su vez, para los pozos analizados se obtuvieron datos medios de DBO (5.7 – 8.6 mg O₂/L) y DQO (21.7 – 41.7 mg O₂/L), para el agua subterránea extraída del acuífero cuaternario en la cuenca.

7.1.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La composición química del agua subterránea natural se define a partir de los análisis de muestras recogidas adecuadamente y se cuantifica por medio de la concentración de cada constituyente analizado. Aunque son más de 60 los constituyentes y propiedades del agua subterránea natural que pueden encontrarse cuantificados en análisis químicos. Por lo general y en estudios convencionales, sólo se determinan entre 10 y 20 parámetros fundamentales (Instituto geológico y minero de España [IGME], 1985).

La variada composición físico – química del agua, se debe a su elevado momento dipolar del agua y su facilidad para formar puentes de hidrógeno lo cual hacen que esta sea un excelente disolvente (Corzo, 2007).

7.1.2.1. Origen de las sustancias disueltas en el agua subterránea

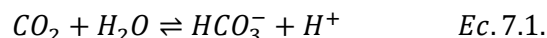
La incorporación de diferentes sustancias al agua comienza incluso antes que esta se integre al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Diversidad de gases tales como Oxígeno (O₂), Nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂) entre otros, aerosoles, polvo y sales diversas presentes en la atmosfera, reaccionan con el agua en forma de vapor, nubes y pequeños cristales de hielo, marcando el primer escalón de enriquecimiento composicional previo a su posterior infiltración, este tipo de agua incluso en zonas libres de contaminación, tiene pequeñas cantidades de sustancias disueltas procedentes del polvo atmosférico, teniendo concentraciones del orden de 0.2 – 0.4 mg/L de cada ion, y en ocasiones mayores tales como en áreas costeras, donde los iones Sodio (Na⁺) pueden llegar a unos pocos mg/L por el aerosol del agua marina (Sánchez, 2012; IGME, 1985).

En la etapa posterior a la precipitación en la cual el agua presenta unas características químicas definidas originadas en la atmósfera, ocurre la interacción con el suelo e infiltración del agua, haciendo que esta sufra modificaciones drásticas en su composición como consecuencia de un conjunto de interacciones físico - químicas y biológicas

complejas con el medio, a lo largo de su recorrido con la zona no saturada (ZNS) y, en menor medida con la zona saturada (ZS).

Los factores que influyen en la variación composicional de las aguas subterráneas son múltiples, entre ellos cabe citar: naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en contacto, superficie y duración del contacto, longitud del recorrido, temperatura, presión, existencia de gases, grado de saturación del agua en relación con las distintas sustancias incorporables, entre otras (Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.; Castillo, Osorio, y Vence, 2009).

En su paso a través del suelo durante los primeros metros de su recorrido, con frecuencia el agua adquiere gran parte de la *personalidad geoquímica*, aunque después haya recorrido varios kilómetros el subsuelo, debido principalmente a las características ácidas que presenta el agua, originadas por su reacción con el dióxido de carbono (Ecuación 7.1.), presente en los poros del suelo (Sánchez, 2012).



Haciendo que el agua, con características ácidas pueda disolver silicatos y carbonatos. No obstante, una vez que el agua haya llegado al medio saturado, no existirán aportes de acidez, haciendo que el agua se torne básica y pierda su capacidad de disolución de carbonatos y alterar silicatos (Sánchez, 2012).

Una vez el agua alcanza la superficie freática, su tiempo de tránsito puede ser días o miles de años hasta que esta salga al exterior a través de un río, manantial o una captación, haciendo que su recorrido a través de los sedimentos que conforman el acuífero

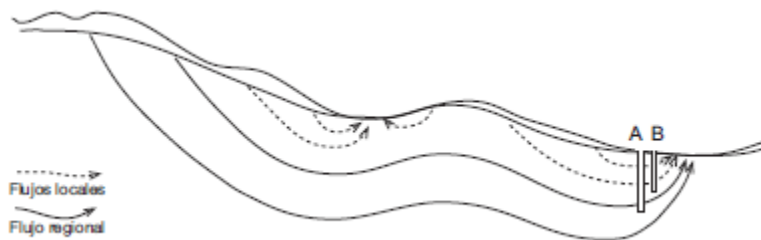


Figura 7.1. Flujos predominantes en un acuífero
Fuente: Sánchez (2012)

sea relativo, pudiendo ser de unos metros o de varios kilómetros, lo cual puede originar flujos de diferente naturaleza, de carácter local, intermedio o regional (Tóth, 2000). Por ende, su evolución química composicional dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo (Figura 7.1.).

En general, las aguas con menor tiempo de permanencia, predominantemente evolucionan desde una composición aniónica conformada por el ion bicarbonato (i.e. facies hidrogeoquímica de tipo bicarbonatada), distintiva en flujos de corto recorrido (local), pasando por facies de tipo sulfatada, típica en flujos de mayor recorrido (intermedio), hasta facies cloruradas, característica en la descarga de flujos de muy largo

recorrido (los regionales) (Tóth, 2000; González-Abraham *et al*, 2012); a esta evolución se le denomina *secuencia de Chevotareb* (Figura 7.2.).

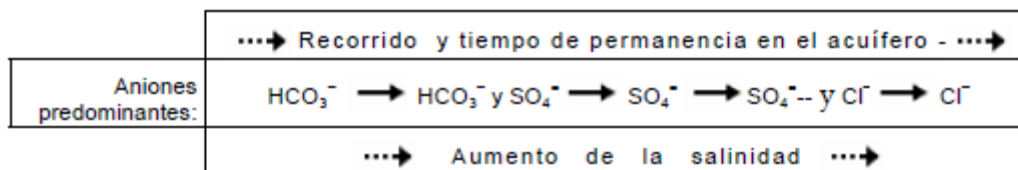


Figura 7.2. Secuencia de Chevotareb
Fuente: Chevotareb (1955) citado por Sánchez (2012)

En la composición catiónica, la secuencia análoga sería $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$, no obstante, el tipo de catión depende de la litología (en el sentido estricto, de la mineralogía) atravesada por el agua, por ejemplo: Ca^{2+} , en carbonatos donde predominan la calcita o plagioclasas cálcicas, ricas en anortita; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, en carbonatos de tipo dolomita y en rocas sedimentarias e ígneas, que contienen minerales con abundante Ca^{2+} y Mg^{2+} , $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, fundamentalmente en aluminosilicatos de tipo básico o ultra básico (González-Abraham *et al*, 2012).

Aunque la composición media del agua subterránea suele considerarse invariable en un acuífero o porción del mismo, no debe olvidarse que las interacciones agua-medio que determinan dicha composición son procesos dinámicos que se desarrollan a ritmo diverso tanto en el espacio como en el tiempo. En consecuencia la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal. Una composición química concreta por lo tanto no queda completamente definida si no se refiere a un lugar y momento determinados (IGME, 1985).

7.1.2.2. Sustancias disueltas en el agua subterránea

Según Freeze y Cherry (1979), las aguas subterráneas presentan en su composición por su frecuencia de aparición y valor de concentración decrecientes, y a pesar de la gran variabilidad de elementos presentes en:

- Constituyentes mayoritarios o fundamentales
 - Aniones: $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- .
 - Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ .
 - Otros: CO_2 , O_2 , H_4SiO_4 o SiO_2 .
- Constituyentes minoritarios o secundarios
 - Aniones: F^- , S^{2-} , SH^- , Br^- , I^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , BO_3^- .
 - Cationes: Mn^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Sr^{2+} , Zn^{2+} .
- Constituyentes traza: Al^{3+} , Ti^{4+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , entre otros.

Aun así en condiciones particulares, un constituyente minoritario puede alcanzar rangos de concentración que permita incluirlos dentro de los iones mayoritarios. En general con las aguas naturales, estos constituyentes aparecen en forma iónica (sales casi totalmente disociadas), con menor frecuencia se presentan en forma molecular parcialmente disociadas o como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas (IGME, 1985).

Los componentes mayoritarios en aguas subterráneas conforman el >99% de las sustancias disueltas en un agua no contaminada y se encuentran siempre en concentraciones mayores a 1 mg/L. El ion nitrato (NO_3^-) generalmente se encuentra en este rango, pero siempre se debe a contaminación orgánica (Sánchez, 2012). El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente menores en comparación con los iones mayoritarios conformando menos del 1% del total de componentes en el agua (Custodio y Llamas, 1976).

La determinación de la concentración de los iones mayoritarios en el agua, constituye una valiosa herramienta para la caracterización del origen de los mismos, así como para la descripción de la evolución de la composición química del agua subterránea como consecuencia de las interacciones agua-roca. (Edmunds y Smedley, 2000; Herczeg y Edmunds, 2000, citado por Renau, 2010).

7.1.2.2.1. Cationes Mayoritarios

7.1.2.2.1.1. Sodio (Na^+)

A condiciones ambientales posee alta solubilidad y cuando entra en solución, tiende a permanecer en ese estado (Hem, 1985), ya que no se produce formación de precipitados que contengan este ión. Este es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

Puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado con calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas (i.e. ablandamiento natural).

La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 o 150 mg/l en aguas dulces normales. La presencia de sodio en cantidades elevadas es muy perjudicial para la agricultura ya que tiende a impermeabilizar los suelos, especialmente en zonas de drenaje deficiente: la presencia de Ca^{2+} y Mg^{2+} atenúa este efecto (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.; Huerta, 2009).

7.1.2.2.1.2. Potasio (K^+)

Procede de la meteorización de los feldspatos ortoclasa y microlinas (KAlSi_3O_8) y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2$) (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.; Hem, 1985).

El potasio poseen alta solubilidad a condiciones ambientales y tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas (illita y montmorillonita) y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico, por ello su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del Na^+ a pesar que su contenido en las rocas es por lo común ligeramente inferior a la del Na^+ ; en aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/l, aunque en casos excepcionales pueden alcanzarse 100,000 mg/l. (salmueras). Cantidades de K^+ por encima de 10 mg/l. puede en ocasiones, ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (IGME, 1985).

7.1.2.2.1.3. Calcio (Ca^{2+})

El calcio es el ión más abundante de los metales alcalinotérreos y es el mayor constituyente de muchas rocas comunes. Este suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos tales como la calcita y aragonita (CaCO_3), dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) o sulfatos como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (CaSO_4) (IGME, 1985; Hem, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

Su comportamiento en sistemas acuosos naturales es generalmente gobernado por la cantidad disponible de sus compuestos más solubles y por el equilibrio acuoso de la fase gaseosa que envuelve a las especies del dióxido de carbono, o por la disponibilidad de sulfuro en la forma de sulfato (Hem, 1985). Los controles de la concentración de calcio en el agua subterránea pueden resumirse en tres: equilibrio carbonático, aporte de H^+ (función del aporte de CO_2) e intercambio iónico. Los dos primeros, íntimamente relacionados entre sí, limitan la concentración de calcio a las correspondientes condiciones de equilibrio en función de pCO_2 , pH, HCO_3^- y CO_3^{2-} . El intercambio iónico ente calcio y otros cationes (sodio fundamentalmente), retenidos en la superficie de minerales con los que entra en contacto el agua, se potencia notablemente en terrenos arcillosos de baja permeabilidad. Su concentración varía ampliamente en las aguas subterráneas con concentraciones entre 10 y 250 mg/l siendo frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg/l, y en salmueras hasta 50.000 mg/l (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

7.1.2.2.1.4. Magnesio (Mg^{2+})

En algunos aspectos de la química del agua, el calcio y el magnesio pueden ser considerados como sustancias con efectos similares a su vez como sustancias que

contribuyen en la dureza del agua (Hem, 1985). Este es menos abundante que el calcio en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. La solubilidad de la magnesita (MgCO_3) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita por lo que, en condiciones normales, el MgCO_3 no precipita directamente de la disolución de modo que para un periodo dilatado de tiempo, puede producirse cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos.

Sus procesos de intercambio iónico son similares a los del calcio, dado que ambos iones son fuertemente absorbidos por minerales arcillosos y otras superficies que tengan sitios de intercambio (Hem, 1985). En aguas naturales el contenido de ión magnesio no suele sobrepasar los 40 mg/l. En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg/l y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg/l (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

7.1.2.2.2. Aniones Mayoritarios

7.1.2.2.2.1. Cloruro (Cl^-)

Si se exceptúan las evaporitas y rocas de origen marino, las rocas por lo común presentan escasa proporción de cloruros. Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. El agua de lluvia puede ser una fuente importante de ión cloruro, especialmente en zonas próximas a la costa las cuales contienen entre una y varios cientos de miligramos por litro de cloruro, pero estas concentraciones disminuyen rápidamente tierra adentro (Hem, 1985).

El ión cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. La concentración de cloruros en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/l a más de 3000. En salmueras naturales próximas a la saturación de NaCl , puede llegar a casi 200.000 mg/l. El agua de mar contiene alrededor de 20.000 mg/l (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

7.1.2.2.2.2. Sulfato (SO_4^{2-})

El ión sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. Sin embargo, la disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente) y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representa el aporte cuantitativamente más importante de este ión a las aguas subterráneas.

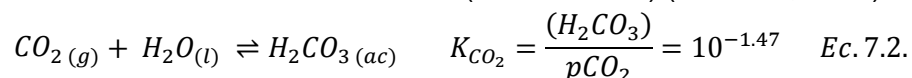
El comportamiento del ión sulfato puede desviarse significativamente del teórico predecible en base a los principios de su disolución, por su tendencia a formar iones complejos con Na y Ca y a incorporarse a procesos biológicos.

El ión sulfato está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En ambientes reductores, a pH menor que 7, la forma reducida estable es el H₂S, mientras que en soluciones alcalinas predomina el HS⁻. En aguas dulces, la concentración normal de sulfatos puede variar entre 2 y 150 mg/l. En aguas salinas, asociado al Ca²⁺, puede llegar a 5000 mg/l; asociado al Mg²⁺ y Na⁺, en salmueras, puede alcanzar hasta 200000 mg/l (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

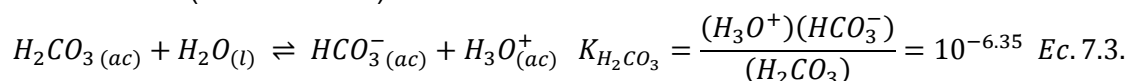
7.1.2.2.2.3. Bicarbonato (HCO₃⁻), Carbonato (CO₃²⁻) y Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono disuelto en agua y los diversos compuestos que forma en ella, juegan un importante papel en la química del agua; se disuelve en esta en función de su presión parcial (pCO₂). Una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato. El CO₂ disuelto en agua procede fundamentalmente de la zona edáfica (respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica) en la que alcanza presiones parciales del orden de 10⁻¹ a 10⁻³ bar (0,0003 bar en la atmósfera exterior) (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

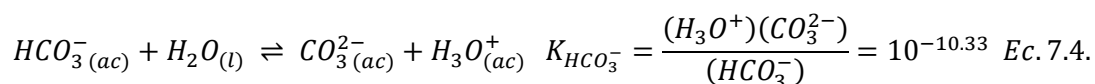
Otra fuente de CO₂ se encuentra en el agua de lluvia, la cual disuelve pequeñas cantidades de este de la atmósfera, que al precipitarse e infiltrarse en el suelo con cierto desarrollo vegetal, disuelve mayor cantidad de CO₂ de los poros del suelo (zona edáfica), produciendo la formación de ácido carbónico (ecuación 7.2.) (Sánchez, 2012)



En cambio, el ácido carbónico es muy inestable, y la mayor parte se disocia formando el ión bicarbonato (Ecuación 7.3.)



Finalmente, una pequeña parte del HCO₃⁻ también se disocia generando carbonato y un aumento de la acidez (Ecuación 7.4.)



La disolución de calizas y dolomías, potenciada por el aporte de CO_2 y/o ácidos orgánicos o inorgánicos, es otra de las fuentes principales de carbonatos y bicarbonatos. Aunque con velocidades de incorporación al agua mucho menores, la hidrólisis de silicatos es otro de los mecanismos que da lugar a la formación de estos iones (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

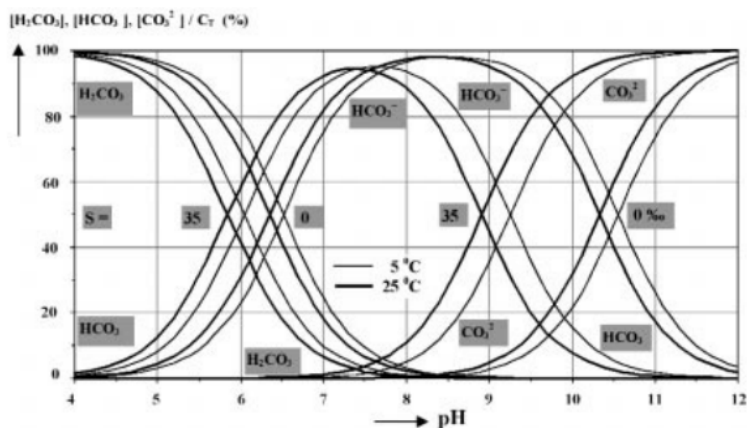


Figura 7.3. Distribución de las especies del ácido carbónico como porcentajes del contenido total de carbono, C_T .
Fuente: IGME, 2002

La predominancia de la forma iónica de esta especie es dependiente del pH (Figura 7.3.); en aguas muy ácidas predomina el ácido carbónico y en aguas muy básicas el ión carbonato. En aguas con pH inferior a 8.3, entre las que se encuentran la mayoría de las aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.; Sánchez, 2012).

En este tipo de agua, la concentración suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l; concentraciones de hasta 1000 mg/l pueden encontrarse en aguas pobres en Ca y Mg o en las que se producen fenómenos de liberación de CO_2 (e.g. reducción de sulfatos) en el acuífero (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

7.1.2.2.2.4. Nitratos (NO_3^-)

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales, y los procesos químicos y biológicos que controlan su concentración están íntimamente relacionados con el ciclo del nitrógeno. Los datos dados por Horn y Adams (1966) y Stevenson (1972), citado por Hem (1985), indica que en las rocas de la corteza terrestre se encuentra una cuarta parte del nitrógeno total y cerca de tres cuartas partes se encuentran presentes en forma gaseosa en la atmósfera (78% en volumen). Las cantidades en la hidrosfera y biosfera son mucho más pequeñas en comparación con los mayores reservorios.

Su forma oxidada constituye una relativamente importante fracción en los suelos y sustancias orgánicas (tejidos de animales o vegetales que lo extraen de la atmósfera para su metabolismo). En las rocas, sin embargo, sólo se presenta como elemento minoritario (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.).

El nitrógeno puede aparecer en forma de amoníaco (NH_3), ión amonio (NH_4^+) y, por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en ión nitrito (NO_2^-) y, finalmente en su forma oxidada, el ión nitrato (NO_3^-) que es la forma más usual y estable. Los procesos de oxidación-reducción de las especies nitrogenadas en el agua están influenciados por fenómenos biológicos y, en consecuencia los productos finales dependerán del número y tipo de organismos que intervengan en ellos (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.; Hem, 1985).

En las aguas subterráneas, generalmente el NH_4^+ o el amoníaco libre, aparecen sólo como trazas en aguas subterráneas, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. Este compuesto es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas o inorgánicas nitrogenadas que naturalmente se incorporan al agua subterránea. Dado que la presencia de amonio favorece la multiplicación microbiana su detección en cantidad significativa en el agua se considera como indicación de contaminación reciente probable.

El ión nitrito puede estar presente en las aguas bien como consecuencia de la oxidación del NH_3 o como resultado de la reducción microbiana o no, de los nitratos. Su presencia en el agua debe considerarse como un indicio fundado de una posible contaminación reciente (dada su inestabilidad en agua aireada) y, tal vez de la impotabilidad del agua debida a la toxicidad de este ión (Hem, 1985).

Sin embargo, la sola presencia de nitrito y amonio en el agua subterránea no debe ser considerada como resultado de una contaminación, sin analizar las posibles causas de su presencia, dado que en un acuífero las condiciones de oxidación no son siempre favorables y estos iones incorporados de manera natural al acuífero, pueden mantenerse durante cierto tiempo en el equilibrio con su forma oxidada, el nitrato.

Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente o bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede de 10 mg/l (IGME, 1985; Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, s.f.). Las concentraciones excesivas de nitrato en aguas potables, puede causar metahemoglobinemia en niños pequeños. Concentraciones que exceden 10 mg/L de NO_3^- y 1 mg/L de NO_2^- presentan este riesgo (EPA, 2006).

El origen de los nitratos en las aguas subterráneas no siempre es claro. Son relativamente estables pero pueden ser fijados por el terreno o ser reducidos a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. El tipo de contaminación a que es debida su presencia en el agua subterránea, está relacionada con las actividades urbanas, industriales y ganaderas, y muy frecuentemente, con carácter no puntual, con las prácticas de abonados intensivos inadecuados con compuestos nitrogenados (EPA, 2006; Bernard *et al*, 1998; Mahler, Colter y Hirnyck, 2007).

Las plantas sólo pueden aprovechar el nitrógeno en forma de nitratos, el tipo de fertilizante aplicado condiciona la proporción de nitrógeno utilizable por las mismas y, en consecuencia, la cantidad no aprovechada por ellas que se infiltra hacia el acuífero. La concentración de nitrato en el agua de infiltración depende del tipo de fertilizante y además, de la frecuencia, cantidad y modo de aplicación así como del nitrógeno orgánico o inorgánico ya existente en el suelo, así como de su permeabilidad, grado de humedad, entre otros (IGME, 1985; Bernard *et al*, 1998; Mahler *et al*, 2007).

7.1.2.2.3. Elementos Minoritarios o Trazas

Este término, es usado comúnmente con sustancias que presentas concentraciones menores a 0.1 mg/L., cuya presencia es natural en la mayoría de las aguas subterráneas (Hem, 1985; Harter, 2003). Las actividades humanas han tenido particularmente una fuerte influencia en la presencia de muchos de estos constituyentes minoritarios del agua.

Sociedades industriales usan grandes cantidades de muchos de estos elementos que naturalmente podrían no estar disponibles para su solución natural en el agua, generando que las diversas formas en que estos elementos son usados pueden tender a dispersarlos en el medio ambiente (Hem, 1985).

Los elementos analizados en el presente trabajo, pertenecen a los metales de transición, los cuales presentan números atómicos entre 21 a 28, 39 – 46 y 72 – 78 en la tabla periódica. El restante son elementos raros, y su presencia en las aguas naturales no ha sido estudiada ampliamente. Estos elementos, comúnmente tienen más de un estado de oxidación que es termodinámicamente estable en su presencia en agua. Varios de estos elementos en presencia de agua, encuentran preferencia a su forma iónica a un pH neutral (Hem, 1985)

7.1.2.2.3.1. Hierro

Su comportamiento químico y su

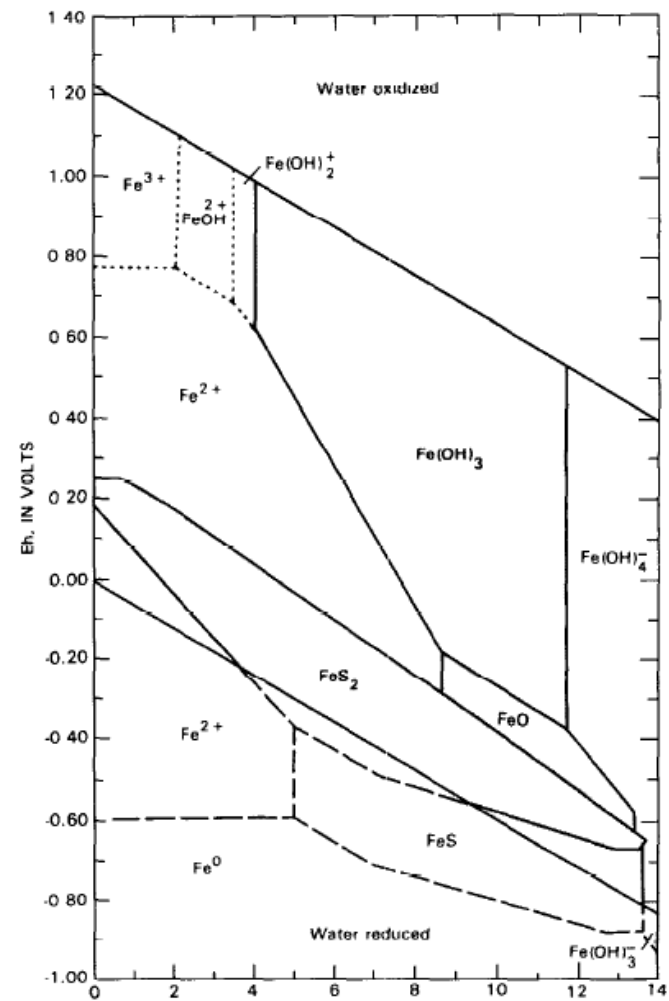


Figura 7.4. Diagrama de Pourbaix para el hierro en función del Eh y pH a 25 °C y 1 atm de presión.
Fuente: Hem, 1985

solubilidad, depende fuertemente de la intensidad de oxidación del sistema (Eh) y del pH en el cual se presenta. Suele encontrarse en la forma de ión ferroso (Fe^{2+}), la cual es su forma termodinámicamente más estable, aunque puede presentarse como ión férrico (Fe^{3+}), FeOH^{2+} o $\text{Fe}(\text{OH})_3$, en función de las condiciones Eh – pH del sistema (Figura 7.4.) y dependiendo a menudo del contenido iónico del agua (i.e. presencia de bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, entre otros).

Valores entre 1 y 10 mg/l pueden ser comunes, aunque lo normal es que se encuentre por debajo de 0,1 mg/l

Su origen se da por la presencia de minerales ígneos cuyos contenidos de hierro son relativamente altos. Algunos de estos minerales son anfíbolitas, biotitas, magnetita (Fe_2O_3) y especialmente la olivina. Cuando estos minerales son atacados por el agua, el hierro es liberado y generalmente re-precipitado formando especies sedimentarias.

7.1.2.2.3.2. Cobre

El uso del cobre en la civilización industrial moderna es extendido y producto de este uso, resulta en su dispersión en el medio ambiente. Su origen en las aguas, es producto de la disolución de este, desde las cañerías o plomerías, especialmente cuando el agua presenta un pH menor a 7. Otras fuentes, son la adición de pequeñas cantidades de sales de cobre en reservorios con el fin de evitar el crecimiento algal. En zonas rurales, el uso de compuestos orgánicos e inorgánicos cuyo uso extensivo en la los pesticidas usados en la agricultura. Por lo cual, este elemento se encuentra disponible mayormente para su solución en los cuerpos de agua superficial y subterránea que su abundancia promedio en las rocas que lo contienen (Hem, 1985; Dozier *et al*, s.f.; EPA, 2013).

El nivel máximo de contaminantes (MCL por sus siglas en inglés) establecido por la EPA (2013) para el cobre es de 1.3 mg/L. Este valor representa lo que una persona puede ingerir del contaminante particular durante su vida sin incrementar los riesgos de salud (Dozier *et al*, s.f.). Un valor límite de 1 mg/L de cobre en el agua potable fue sugerido en Water Quality Criteria (1972) (citado por Hem, 1985); límite basado en el umbral de sabor de este elemento. El mismo informe sugiere un límite máximo de 0,5 mg /L en agua para ser utilizada por el ganado, y 0,20 mg/L para el uso continuo en el riego de los cultivos (Hem, 1985).

7.1.2.2.3.3 Plomo

El plomo se presenta en forma natural en todas las rocas, en los suelos y en las tierras y polvos, en una proporción que normalmente varía entre 2 y 200 ppm., presentando concentraciones en el suelo relativamente elevadas debido a la presencia de rocas enriquecidas con dicho mineral (Unión de industrias de Plomo [Uniplom], 2004). Su movilidad natural es baja, debido a la baja solubilidad de los compuestos que lo contienen (e.g. hidroxicarbonatos de plomo, fosfatos de plomo). La adsorción de plomo en

superficies orgánicas e inorgánicas de sedimentos y la co-precipitación de plomo con óxido de manganeso; procesos por los cuales se tienden a mantener bajos los niveles de concentración en superficie y las aguas subterráneas (Hem, 1985).

Su amplio uso por la industria ha generado su amplia dispersión por el medio ambiente. Este puede llegar al agua subterránea por una fuente de contaminación tal como depósitos de desechos peligrosos, fundidores de plomo, refinerías, centros de reciclaje, centros de trituración de pilas u otras fuentes industriales de plomo (Uniplom, 2004; North Carolina Public Health, 2009).

Como límite de este elemento en el agua potable, la EPA (2014), generó los objetivos de nivel máximo de contaminante (MCLG, por sus siglas en inglés), las cuales son metas de salud no vinculantes, basadas únicamente en los posibles riesgos para la salud, donde en el caso del plomo, el MCLG es cero. A su vez, se requiere actualmente que los servicios públicos garantice que los niveles de plomo en la llave del consumidor no exceda de 15 $\mu\text{g/L}$ en al menos el 90 por ciento de los hogares incluidos en la muestra.

7.2. METODOLOGÍA

7.2.1. MUESTREO

Se seleccionaron los puntos en los cuales se realizaría el muestreo, a través de las bases de datos provistas por consultoras ambientales y la CAR. Se realizó la recolección de muestras en 10 puntos que extraen agua del acuífero de los sedimentos Sabana y Chía, de los cuales 9 eran pozos de extracción y un (1) aljibe.

Se seleccionaron dos fechas de muestreo, teniendo en cuenta el comportamiento hidrometeorológico e hidrogeológico en la cuenca, siendo las fechas escogidas el 7 y 8 de julio (periodo seco) y el 30 de septiembre y 1 de octubre (periodo húmedo) del año 2014. Con el fin de garantizar la representatividad de la muestra de agua subterránea en cada punto de muestreo, se hizo la revisión de las guías y protocolos elaborados por organismos como IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre), IGME (Instituto Geológico y Minero de España), USGS (Geological-Survey United States) y EPA (United States Environmental Protection Agency). Con base en esta revisión se realizaron los siguientes procesos previos y en el muestreo.

7.2.1.1. Materiales de muestreo y procedimiento de lavado



Se utilizaron botellas de polietileno color ámbar nuevas de 1 litro de capacidad. Los demás equipos fueron lavados con detergente, posterior a esto fueron limpiadas con ácido nítrico, enjuagadas tres veces con agua corriente y por último dos aclaraciones con agua desionizada.

7.2.1.2. Etiquetado de botellas y cuaderno de campo

Figura 7.5. Etiquetas para la toma de muestras

El proceso de etiquetado se realizó previo a la toma de la muestra, en la cual constaba la siguiente información (Figura 7.5.):

- Código
- Referencia de la muestra
- Fecha y hora de toma
- Tratamiento (acidificación, conservantes, etc.).

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL	Evaluación hidroquímica y ambiental del recurso subterráneo de la Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.		 Universidad Nacional de La Plata
Fecha:		Aditivo:	
Hora:		Longitud (Y):	
Analista:		Latitud (X):	
Código:		Altura (msnm):	
Destino:		Error GPS (m):	

Fuente: Autor

En cada toma de muestra de cada punto de control, se generó una ficha asociada en la que quedó plasmados los datos y las circunstancias necesarias para la identificación inequívoca del punto de muestreo, la cual permitió una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

7.2.1.3. Procedimiento en campo

7.2.1.3.1. Purga de la captación y método de toma de la muestra

Este proceso se generó en los pozos de explotación, con el fin que la muestra sea lo más representativa posible. Para ello se desalojó el agua estancada del pozo y la inmediatamente adyacente a éste (i.e. zona de influencia), por lo cual se solicitó a los operadores que se extrajera agua por un periodo mínimo de 45 minutos aproximadamente previo a la toma de la muestra, una vez cumplido el tiempo de purga, se procedió a tomar inmediatamente la muestra en los recipientes determinados. Las botellas previamente a la toma fueron purgadas tres veces con el agua del punto a muestrear antes de la recolección definitiva de la muestra.

Ésta se tomó dejando un espacio entre la botella y el punto de salida de la bomba con el fin de evitar contaminación cruzada, se llenó la botella hasta el borde no dejando ninguna cámara de aire entre el agua y el tapón de cierre, añadiendo previamente el conservante según corresponda.

Finalizado el muestreo, el agua subterránea embotellada fue identificada y conservada a 4° C y en la oscuridad, y fue transportada al laboratorio para su posterior análisis, evitando la mínima pérdida de la muestra.

7.2.1.3.2. Análisis en campo

En el sitio de muestreo se realizaron las siguientes determinaciones:

- Temperatura (T °C)

- pH
- Conductividad (EC_w)

Las lecturas de pH fueron realizadas con un pH-metro de campo marca Rocker pH5011. Por su parte, las lecturas de conductividad fueron realizadas con un conductímetro de campo marca Rocker COND 5022.

7.2.1.3.3. Preservación de Muestras

Con base en las recomendaciones del IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre), IGME (Instituto Geológico y Minero de España), USGS (Geological Survey United States) y EPA (United States Environmental Protection Agency), se realizó la toma y división de la muestra puntual de agua subterránea de la siguiente manera:

- Un litro de muestra sin preservar en frasco ámbar, filtrada a través de membrana con poro de $0.45 \mu\text{m}$ y refrigerada a 4°C para determinar en laboratorio sólidos totales disueltos (TDS), Alcalinidad (CO_3^{2-} y HCO_3^-), Nitratos (N-NO_3^-), Sulfatos (SO_4^{2-}) y Cloruros (Cl^-).
- Un litro de muestra con adición de ácido nítrico (HNO_3) de grado analítico con concentración 65% hasta pH 2 en frasco ámbar, filtrada a través de membrana con poro de $0.45 \mu\text{m}$ y refrigerada a 4°C para determinar en laboratorio Sodio (Na^+), Potasio (K^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Cobre (Cu).

Estas dos porciones de muestra fueron transportadas al laboratorio de Química de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) de Colombia para sus respectivos análisis.

7.2.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

A todas las muestras se realizó la determinación de los iones mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^-) y algunos minoritarios y traza (Fe, Pb, Cu). La totalidad de las determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de Química de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) de Colombia.

7.2.2.1. Equipamiento Instrumental y técnicas utilizadas.

En la tabla 7.3. se resumen las técnicas y los equipos utilizados para las determinaciones analíticas.

Para la determinación de los cationes mayoritarios y los elementos Fe, Pb, Cu y Zn se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica de llama (FAAS, por sus siglas en inglés) Perkin Elmer 2380 Atomic Absorption, utilizando la llama de aire-acetileno para todos los casos, siguiendo las indicaciones dadas por el American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], Water Environment Federation [WEF] (2005a) código 3111 Metals by Flame Atomic Absorption Spectrometry C.

Tabla 7.3. Técnicas y equipos utilizados para el análisis de aguas.

Parámetro	Técnica	Equipo
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Fe _T , Pb _T , Cu _T	FAAS	Perkin Elmer 2380 Atomic Absorption
HCO ₃ ²⁻ , CO ₃ ²⁻	Volumetría	-
SO ₄ ²⁻	Gravimetría	-
Cl ⁻	Potenciometría	Electrodo Ión Cloro Orión 94-17B
NO ₃ ⁻	Espectrofotometría UV/VIS	Hitachi U-1800 UV/VIS Spectrophotometer

Para la determinación del ión cloruro, se utilizó un potenciómetro con electrodo de cloro Orion 94-17B, siguiendo las indicaciones dadas por APHA, AWWA, WEF (2005b) código 4500-Cl⁻ Chloride C. Para la determinación del ión sulfato, se utilizó una técnica gravimétrica según las indicaciones dadas por APHA, AWWA, WEF (2005c) código 4500-SO₄²⁻ Sulfate D. Para la determinación de los iones bicarbonato y Carbonato, se utilizó una técnica tritimétrica según las indicaciones dadas por APHA, AWWA, WEF (2005d) código 2320 Alkalinity A. Por último, el ión nitrato, se determinó usando el espectrofotómetro Hitachi U-1800 UV/VIS Spectrophotometer, siguiendo las indicaciones dadas por el APHA, AWWA, WEF (2005e) código 4500-NO₃⁻ Nitrogen B.

7.2.2.2. Tratamiento preliminar de la muestra

Las muestras que fueron utilizadas para la determinación de cationes mayoritarios y los elementos Fe, Pb, Cu y Zn a través del FAAS, fueron digestadas usando ácido nítrico concentrado en reflujo abierto según APHA, AWWA, WEF (2005f) código 4500 Preliminary Treatment of Samples E. Para las restantes determinaciones no se realizó tratamiento preliminar.

7.2.2.3. Preparación de reactivos y disoluciones patrón.

7.2.2.3.1. FAAS

Los patrones de cada uno de los cationes mayoritarios y de los elementos Fe, Pb, Cu y Zn fueron preparados a partir de disoluciones de sus sales respectivas (i.e. NaCl, KCl, CaCO₃, MgCl₂, FeSO₄•7H₂O, Pb(NO₃)₂ y Cu(NO₃)₂). Los modificadores utilizados han sido, La(III) al 1%, preparado a partir de LaCl₃ • 2H₂O para la determinación de Ca y Mg. Además se preparó Cs(I) al 1%, preparado a partir de CsCl, que minimiza los problemas de ionización para la determinación de K y Na. Los patrones y modificadores utilizados son de calidad analítica marca Bayer.

Las concentraciones de los patrones utilizados fueron

- Na⁺: 0.1, 0.25, 0.5 y 1.0 mg-Na⁺/L

- K^+ : 0.25, 0.5, 1.0 y 2.0 mg- K^+ /L
- Ca^{2+} : 0.1, 1.0, 2.0, 4.0 y 5.0 mg- Ca^{2+} /L
- Mg^{2+} : 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 mg- Mg^{2+} /L
- Fe: 1.0, 2.0, 3.0 y 5.0 mg-Fe/L
- Pb: 0.5, 1.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0 mg-Pb/L
- Cu: 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 mg-Cu/L

7.2.2.3.2. Volumetría

Se usó como agente titulante una disolución estándar de ácido sulfúrico 0.010 mol/L, preparada a partir de una solución madre al 98%, la cual fue preparada con agua desionizada libre de dióxido de carbono, al ser calentada hasta ebullición durante 15 min y enfriada a temperatura ambiente previo a su uso. Se usó como indicadores ácido base fenolftaleína y naranja de metilo. El ácido sulfúrico y los indicadores utilizados son de calidad analítica marca Bayer.

7.2.2.3.3. Gravimetría

Se usaron reactivos de calidad analítica marca Bayer. Se usó ácido clorhídrico 1+1 diluyendo iguales volúmenes de ácido clorhídrico 37% con agua desionizada. Como agente precipitante se usó solución de Cloruro de Bario disolviendo 100 mg de $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ en 1L de agua. Como solución indicadora se utilizó rojo de metilo.

7.2.2.3.4. Potenciometría

Los patrones fueron preparados usando la sal Cloruro de Sodio ($NaCl$) de calidad analítica marca Bayer y diluidos utilizando agua desionizada. Los patrones preparados tenían como concentraciones 0.2, 0.4, 0.6, 0.7 mg- Cl^- /L.

7.2.2.3.5. Espectrofotometría UV/VIS

Los patrones utilizados para este procedimiento fueron preparados por disolución de una solución stock de nitrato de potasio (KNO_3) de calidad analítica marca Bayer 100 mg- NO_3^- /L y preparación de solución intermedia 10 mg- NO_3^- /L usando agua desionizada. Los patrones preparados tenían como concentraciones 0.5, 1.0, 2.5, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0 y 15.0 mg- NO_3^- /L.

7.2.2.4. Condiciones Experimentales

7.2.2.4.1. FAAS

En la tabla 7.4. se especifican la longitud de onda a la que se mide la absorbancia, el modificador necesario para evitar interferencias, el ancho de rendija (slit) y el límite de detección instrumental de la técnica (LOD).

Tabla 7.4. Condiciones de trabajo para la determinación de cationes por FAAS

Catión	Longitud de Onda (nm.)	Slit (nm.)	Modificador	LOD (mg/L)
Na ⁺	589.0	0.4	Cs(I)	0.012
K ⁺	766.5	1.4	Cs(I)	0.043
Ca ²⁺	422.7	0.7	La(III)	0.092
Mg ²⁺	285.2	0.7	La(III)	0.0078
Fe	248.3	0.2	-	0.10
Cu	324.8	0.7	-	0.077
Pb	217.0	0.7	-	0.19

7.2.2.4.2. Espectrofotometría UV/VIS

Se realizó la lectura de nitratos utilizando radiación ultravioleta a la longitud de onda de 220 nm y se realizó la corrección de la absorbancia midiendo a 275 nm.

7.3. RESULTADOS

7.3.1. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de validar los resultados obtenidos por el laboratorio, se realizó el balance iónico tradicional (%CBE, por sus siglas en inglés: percent charge-balance error) el cual se basa en la diferencia entre las cargas totales positivas y las cargas totales negativas expresado en unidades de porcentaje (Murray y Wade, 1995; Fritz, 1994). La ecuación de acuerdo a Freeze y Cherry (1979) es definida como (Ecuación 7.5.):

$$\%CBE = \frac{\sum z \cdot m_c - \sum z \cdot m_a}{(\sum z \cdot m_c + \sum z \cdot m_a)} \cdot 100\% \quad Ec. 7.5.$$

En esta ecuación, z es el valor absoluto de la carga del ión; m_c y m_a son las concentraciones en meq-g/L de las especies catiónicas y aniónicas respectivamente. El criterio que ha sido usado para la aceptación de los datos analíticos es de ± 10%, producto de la utilización de diversas técnicas para la determinación de los numerosos parámetros analizados (e.g. volumetría, potenciometría, FAAS, entre otras), las cuales traen consigo un aumento en la incertidumbre del análisis y en la precisión de los datos obtenidos en el mismo. Igualmente, se encontró que los elevados porcentajes de error en el balance iónico de las muestras eran causados principalmente por fallas en la determinación de cloro, que puede obedecer al método potenciométrico utilizado, por el cual se obtuvieron valores de concentración muy por debajo a los obtenidos en anteriores estudios (CAR, 1990; CAR, 2008; Robles *et al*, 1991; Robles y Sáenz, 1990).

Con el fin de verificar la calidad de los análisis realizados, también se llevará a cabo la evaluación de las relaciones entre los parámetros TDS y EC_w (Ecuación 7.6 y 7.7.).

$$\frac{(TDS_{medido} - TDS_{calculado})}{TDS_{medido}} \times 100\% < 5\% \quad Ec. 7.6.$$

$$0.55 < \frac{TDS_{medido}}{ECw} < 0.75 \quad Ec. 7.7.$$

7.3.2. BASE DE DATOS HIDROQUÍMICOS

La determinación de la concentración de los iones mayoritarios [y minoritarios] en el agua constituye una valiosa herramienta para la caracterización del origen de los mismos, así como para la descripción de la evolución de la composición química del agua subterránea como consecuencia de las interacciones agua-roca (Edmunds y Smedley, 2000) y de los procesos generados por la actividad antrópica que suprayace los sedimentos que contienen los acuíferos estudiados.

En la tabla 7.5.a y 7.5.b, se muestran los resultados de los análisis de los iones mayoritarios y minoritarios (expresados en mg/L) además del pH, la temperatura (°C) y el %CBE de las muestras pertenecientes al acuífero de sedimentos del Neógeno – Cuaternario (i.e. Sedimentos Sabana y Chía), de los muestreos realizados en los meses de julio y octubre, respectivamente. Los valores de TDS medido y ECw fueron eliminados del análisis puesto que no superaron el criterio de aceptación según las ecuaciones 7.6. y 7.7.; los valores de TDS consignados se obtuvieron como la suma de la concentración de aniones y cationes analizados, expresados en mg/L (Hem, 1985).

Al comparar los valores obtenidos de Cloruro con respecto a los antecedentes se observa que estos presentan concentraciones muy bajas, no obstante al presentar un error del balance iónico igual o menor del 10% en ambas campañas de muestreo, los valores del ion cloruro serán tenidos en cuenta en el análisis. Los valores de las relaciones iónicas e indicadores utilizados en este trabajo se presentan en las tablas anteriormente mencionadas.

Los valores censurados, los cuales han sido reportados como *no detectados*, *menores que* y *mayores que* fueron remplazados por valores no calificados, para ello se siguió la técnica sugerida por Sanford *et al* (1993), al cual consiste en el remplazo de *menores que* por valores de 0.55 veces el límite menor de detección y el *mayor que* por valores 1.7 veces el límite mayor de detección (Güler *et al*, 2002).

Tabla 7.5.a. Concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de julio/2014

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		A1-Te-02		P-Te-04		P-Te-05		P-Te-06		P-Te-07		P-Te-09		P-Te-10		P-Te-11		P-Ta-12		P-Ta-13	
			a	b	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD
Latitud	°	-	-	-	74°08'25.2"	74°07'22.0"	74°10'9.6"	74°07'7.7"	74°10'57.3"	74°09'48.7"	74°09'21.0"	74°07'33.3"	74°05'14.0"	74°05'4.6"										
Longitud	°	-	-	-	4°48'27.2"	4°49'41.2"	4°49'42.8"	4°52'5.3"	4°50'45.5"	4°51'59.0"	4°52'3.4"	4°52'26.0"	4°53'36.6"	4°54'14.0"										
X	m	-	-	-	993029.6	994977.3	989812.9	995418.3	988337.2	990457.5	991311.0	994629.5	998921.7	999211.4										
Y	m	-	-	-	1023371.2	1025644.2	1025693.9	1030070.5	1027620.1	1029877.5	1030319.7	1030706.4	1032874.9	1034023.7										
Altura	m.s.n.m.	-	-	-	2600.7	2606.6	2559.4	2592.4	2587.2	2602.2	2619.2	2585.3	2580.4	2603.3										
pH	Unidades	-	4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	6.1	-	6.4	-	6.4	-	6.9	-	6.9	-	6.0	-	5.0	-	6.4	-	7.0	-	6.6	-
Temperatura	°C	Potenciometría	-	-	15	-	15	-	16	-	17	-	18	-	17.0	-	17.0	-	17	-	18.0	-	19	-
Sólidos Disueltos	mg-SD/L	Termómetro	-	-	170.4	-	94.0	-	384.3	-	615.3	-	299.2	-	59.3	-	86.7	-	267.9	-	443.5	-	340.1	-
Sodio	mg-Na/L	Gravimetría indirecta	-	-	19.54	0.00	10.43	0.03	67.70	0.33	157.83	0.82	14.82	0.04	7.01	0.02	5.70	0.02	72.10	0.00	107.34	0.65	19.95	0.00
Potasio	mg-K/L	Absorción atómica	-	-	5.62	0.10	1.45	0.01	10.40	0.15	7.30	0.13	17.88	0.16	4.05	0.07	5.02	0.03	1.29	0.00	4.47	0.14	60.59	1.66
Calcio	mg-Ca/L	Absorción atómica	-	60	11.02	0.00	3.68	0.00	4.05	0.02	18.87	0.00	43.06	0.89	1.69	0.02	3.00	0.00	2.51	0.04	18.10	0.11	18.52	0.14
Magnesio	mg-Mg/L	Absorción atómica	-	36	2.11	0.05	1.45	0.02	6.29	0.12	4.25	0.00	3.94	0.03	0.91	0.01	3.71	0.01	1.82	0.03	3.95	0.06	2.24	0.01
Hierro	mg-Fe/L	Absorción atómica	5	0.3	17.30	0.10	15.62	0.10	5.46	0.05	6.09	0.10	1.07	0.02	6.51	0.00	5.04	0.03	8.35	0.05	3.27	0.04	5.31	0.05
Cobre	mg-Cu/L	Absorción atómica	0.2	1	0.74	0.02	0.66	0.02	0.52	0.02	0.63	0.02	0.71	0.02	0.62	0.00	0.66	0.02	0.84	0.00	0.55	0.02	0.57	0.00
Alcalinidad	mg-CaCO ₃ /L	Titulación	-	200	83	2	20	0	217	12	290	0	153	6	22	1	20	0	121	1	212	3	91	1
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L	Titulación	-	-	101.3	2.4	24.4	0.0	264.3	14.1	353.8	0.0	187.0	7.0	26.4	1.4	24.4	0.0	148.0	0.7	258.2	3.5	111.4	1.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L	Gravimetría	-	250	12.3	0.0	35.7	2.4	25.0	0.0	65.8	0.0	30.2	2.4	11.0	2.4	37.0	0.0	32.3	0.0	46.9	2.3	120.8	9.7
Cloruros	mg-Cl/L	Ion selectivo	-	250	0.2	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.6	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L	UV	-	10	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	0.4	0.0	1.6	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0
Plomo	mg-Pb/L	Absorción atómica	5	0.01	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0
CBE	%	-	-	-	9.6	7.8	-8.2	8.7	-1.3	7.7	-9.1	9.2	7.9	-8.0										
Normas de Referencia		a) Decreto 1594/1984. MAVDT. Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso b) Resolución 2115/2007. MAVDT. Art. 3. 4. 5. 6. 7																						

m: metros; m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar; \bar{X} : Media; SD: Desviación estándar de la muestra

Tabla 7.5.b. Concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de octubre/2014

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		Al-Te-02		P-Te-04		P-Te-05		P-Te-06		P-Te-07		P-Te-09		P-Te-10		P-Te-11		P-Ta-12		P-Ta-13	
			a	b	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD	\bar{X}	SD
Latitud	°	-	-	-	74°08'25.2"	74°07'22.0"	74°10'9.6"	74°07'7.7"	74°10'57.3"	74°09'48.7"	74°09'21.0"	74°07'33.3"	74°05'14.0"	74°05'4.6"										
Longitud	°	-	-	-	4°48'27.2"	4°49'41.2"	4°49'42.8"	4°52'5.3"	4°50'45.5"	4°51'59.0"	4°52'3.4"	4°52'26.0"	4°53'36.6"	4°54'14.0"										
X	m	-	-	-	993029.6	994977.3	989812.9	995418.3	988337.2	990457.5	991311.0	994629.5	998921.7	999211.4										
Y	m	-	-	-	1023371.2	1025644.2	1025693.9	1030070.5	1027620.1	1029877.5	1030319.7	1030706.4	1032874.9	1034023.7										
Altura	m.s.n.m.	-	-	-	2600.7	2606.6	2559.4	2592.4	2587.2	2602.2	2619.2	2585.3	2580.4	2603.3										
pH	Unidades	-	4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	6.2	-	6.3	-	6.4	-	6.2	-	6.9	-	5.7	-	5.1	-	6.2	-	6.1	-	6.2	-
Temperatura	°C	Potenciometría	-	-	16	-	19	-	19	-	19	-	18	-	19.0	-	19.0	-	19	-	19	-	20	-
Sólidos Disueltos	mg-SD/L	Termómetro	-	-	129.0	-	118.4	-	525.9	-	423.9	-	278.4	-	94.5	-	56.2	-	226.5	-	446.0	-	340.1	-
Sodio	mg-Na/L	Gravimetría indirecta	-	-	13.44	0.00	10.43	0.03	55.97	0.00	43.35	0.00	20.08	0.05	10.50	0.00	3.59	0.00	50.37	0.00	107.34	0.65	19.95	0.00
Potasio	mg-K/L	Absorción atómica	-	-	5.58	0.10	1.45	0.01	15.15	0.00	7.21	0.13	8.85	0.08	3.00	0.00	4.41	0.00	6.40	0.00	4.47	0.14	60.59	1.66
Calcio	mg-Ca/L	Absorción atómica	-	60	10.03	0.00	3.68	0.00	20.73	0.00	41.29	0.00	18.10	0.00	4.34	0.00	3.06	0.00	3.60	0.00	18.10	0.11	18.52	0.14
Magnesio	mg-Mg/L	Absorción atómica	-	36	1.91	0.00	1.45	0.02	14.47	0.00	2.69	0.00	3.78	0.00	1.38	0.00	2.76	0.00	1.26	0.00	3.95	0.06	2.24	0.01
Hierro	mg-Fe/L	Absorción atómica	5	0.3	11.62	0.10	15.62	0.10	21.15	0.00	24.64	0.20	18.81	0.00	7.66	0.00	3.42	0.00	11.21	0.10	3.27	0.04	5.31	0.05
Cobre	mg-Cu/L	Absorción atómica	0.2	1	0.69	0.00	0.66	0.02	0.48	0.02	0.61	0.00	0.64	0.02	0.55	0.00	0.68	0.02	0.90	0.02	0.55	0.02	0.57	0.00
Alcalinidad	mg-CaCO ₃ /L	Titulación	-	200	30	0	40	0	277	6	220	0	153	6	20	0	22	0	104	1	214	1	91	1
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L	Titulación	-	-	36.6	0.0	48.8	0.0	337.5	7.0	268.4	0.0	187.1	7.0	24.4	0.0	26.8	0.0	127.3	1.4	260.7	1.4	111.4	1.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L	Gravimetría	-	250	45.3	0.0	35.7	2.4	57.6	0.0	32.9	0.0	20.6	0.0	41.2	0.0	8.2	0.0	20.6	0.0	46.9	2.3	120.8	9.7
Cloruros	mg-Cl/L	Ion selectivo	-	250	0.4	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.7	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L	UV	-	10	3.5	0.0	<0.5	0.0	2.4	0.0	2.3	0.0	<0.5	0.0	0.9	0.0	2.6	0.0	4.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0
Plomo	mg-Pb/L	Absorción atómica	5	0.01	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0	<0.5	0.0
CBE	%	-	-	-	5.6	-7.0	-7.8	0.9	-8.0	-6.2	6.9	7.8	7.6	-8.0										
Normas de Referencia		a) Decreto 1594/1984. MAVDT. Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso b) Resolución 2115/2007. MAVDT. Art. 3. 4. 5. 6. 7																						

m: metros; m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar; \bar{X} : Media; SD: Desviación estándar de la muestra

7.3.3. ANÁLISIS EXPLORATORIO

7.3.3.1. Muestreo julio/2014

Se desarrolló un análisis exploratorio de los parámetros fisicoquímicos medidos en muestras de agua de los pozos (Figura 7.6.a, b, c), los cuales presentan distribuciones asimétricas a la derecha (Coeficiente de asimetría de Fisher: $\gamma_1 > 0$), a excepción de la Temperatura y pH ($\gamma_1 < 0$). Las variables fisicoquímicas presentan valores medios cuyos rangos oscilan entre 0.4 ± 0.1 mg/L (para el ión cloro) y 274.1 ± 178.5 mg/L (para los sólidos totales en disolución), los valores medios con su respectiva desviación estándar se pueden observar en la tabla 7.6.

Tabla 7.6. Valores medios de concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de julio/2014

	pH	T	TSD	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	Cu	Alc	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	N-NO ₃ ⁻	Pb	% CBE
\bar{x}	6.4	17	276.1	48.24	11.81	12.45	3.07	7.40	0.65	123	149.9	41.7	0.4	1.0	<0.5	7.7
SD	0.6	1	178.5	51.78	17.81	12.91	1.64	5.16	0.10	94	114.7	32.0	0.1	0.8	0.0	2.4

\bar{x} : Media; SD: Desviación estándar de la muestra; T: Temperatura; TDS: Sólidos Disueltos; Na⁺: Sodio; K⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio; Fe: Hierro; Cu: Cobre; Alc: Alcalinidad Tota; HCO₃⁻: Bicarbonatos; SO₄²⁻: Sulfato; Cl⁻: Cloruro; N-NO₃⁻: Nitrato; Pb: Plomo; %CBE: Balance Iónico.

Se efectuó la validación de los resultados usando el %CBE, obteniendo un error medio absoluto de $7.7 \pm 2.4\%$ (tabla 7.4).

Se encuentra que el pozo P-Te-10, ubicado al Norte de la cuenca presenta la mayor concentración de N-NO₃⁻ encontrada en los pozos analizados (1.6 mg N-NO₃⁻ /L). En este pozo también se encontró el pH de 5.0 más bajo de todos los puntos, lo cual puede ser producto de las actividades agrícolas y ganaderas que se desarrollan en la zona, no obstante, al encontrar que la concentración de N-NO₃⁻ no exceden los estándares de calidad para agua potable (máximo 10 mg N-NO₃⁻ /L), este valor se convierte en un indicador de contaminación del agua en la zona.

Las concentraciones de plomo en todos los puntos analizados son menores a 0.5 mg Pb/L, permitiendo considerar que la presencia de este elemento se debe a procesos naturales de disolución de rocas o minerales enriquecidos con este mineral y no por acciones antrópicas. No obstante, se hace necesario incrementar la sensibilidad en su determinación, con el fin de establecer la concentración exacta en el agua subterránea extraída en la cuenca y establecer si existe riesgo a la salud por su presencia en aguas usadas para consumo.

La concentración de Cu, presenta una distribución homogénea y poco variante entre los puntos analizados (0.7 ± 0.1 mg Cu/L), permitiendo considerar que la presencia de este elemento se debe a procesos naturales de disolución de rocas o minerales enriquecidos con este mineral y no por acciones antrópicas.

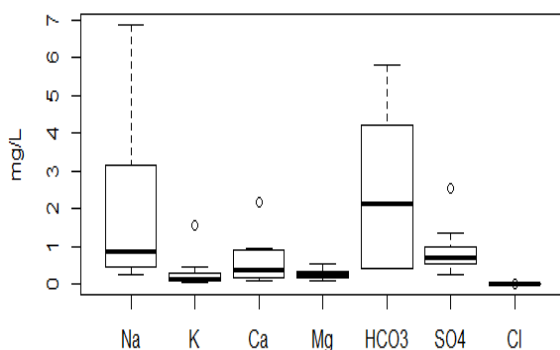


Figura 7.6.a. Boxplot resultado de concentraciones de iones mayoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de julio/2014

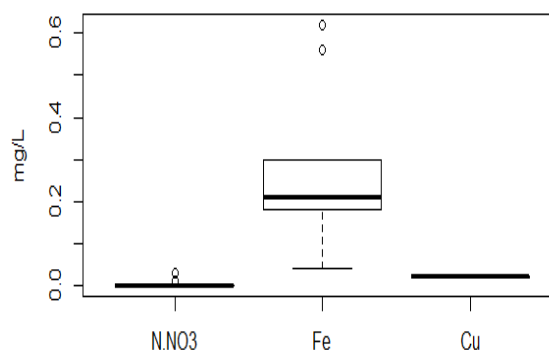


Figura 7.6.b. Boxplot resultado de concentraciones de iones minoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de julio/2014

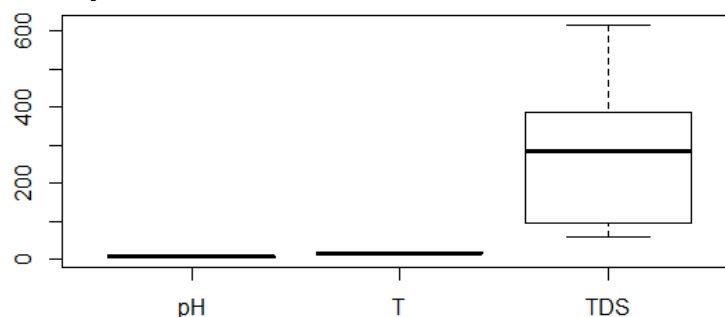


Figura 7.6.c. Boxplot resultado de determinaciones *in-situ* y de TDS de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de julio/2014

Por último, el hierro presenta una concentración media de 7.40 ± 5.16 mg Fe/L, pudiendo considerar que la presencia de este elemento se debe a procesos naturales de disolución de rocas o minerales enriquecidos con este mineral y no por acciones antrópicas. La concentración de ese ión presenta una gran dispersión de los datos a nivel regional, encontrando que los pozos P-Te-07 y P-Ta-12 ubicados al N – NE de la cuenca, próximos a las zonas de recarga presentan las menores concentraciones (2.17 ± 1.5 mg Fe/L). En la zona de transición en la cuenca media, se presentan valores de concentración medios de 6.13 ± 1.22 mg Fe/L, aumentando la concentración de este ión a medida que se desplaza a la cuenca baja y zona de descarga del acuífero estudiado (16.46 ± 1.19 mg Fe/L), producto de la mayor interacción entre el agua y los sedimentos que conforman el acuífero.

7.3.3.2. Muestreo octubre/2014

Se realizó un análisis exploratorio de los datos hidroquímicos (Figura 7.7.a, b, c); estos presentan distribuciones asimétricas tanto izquierda ($\gamma_1 < 0$) para las variables pH, T como derecha ($\gamma_1 > 0$) para las restantes. Las variables fisicoquímicas presentan valores medios cuyos rangos oscilan entre 0.4 ± 0.1 mg/L (para el ión cloro) y 263.9 ± 165.3 mg/L (para los sólidos totales en disolución), los valores medios con su respectiva desviación

estándar se pueden observar en la tabla 7.7. Se realizó la validación de los resultados usando el %CBE, obteniendo un error medio absoluto de $6.6 \pm 2.1\%$.

Tabla 7.7. Valores medios de concentración de iones mayoritarios y minoritarios de las muestras del Acuífero de sedimentos Sabana y Chía para el muestreo del mes de octubre/2014

	pH	T	TSD	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	Cu	Alc	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	N-NO ₃ ⁻	Pb	% CBE
\bar{x}	6.2	19	263.9	33.50	11.71	14.14	3.59	12.27	0.63	117	142.9	43.0	0.4	1.7	<0.5	6.6
SD	0.3	1	165.3	31.73	17.58	11.96	3.94	7.58	0.12	94	114.7	31.0	0.1	1.5	0.0	2.1

\bar{x} : Media; SD: Desviación estándar de la muestra; T: Temperatura; TDS: Sólidos Disueltos; Na⁺: Sodio; K⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio; Fe: Hierro; Cu: Cobre; Alc: Alcalinidad Total; HCO₃⁻: Bicarbonatos; SO₄²⁻: Sulfato; Cl⁻: Cloruro; N-NO₃⁻: Nitrato; Pb: Plomo; %CBE: Balance Iónico.

Se observa que la cantidad de puntos de muestreo de agua que reportan valores de N-NO₃⁻ mayores o iguales a 0.5 mg/L aumento con respecto al muestreo anterior pasando de 1 pozo a 6 pozos; los rangos de concentración oscilan entre 0.89 y 4.50 mg N- NO₃⁻/L. A su vez se observa que las magnitudes de concentración de este anión incrementan pasando de 1.60 mg N- NO₃⁻/L como máximo valor reportado en julio a 4.50 mg N- NO₃⁻/L como valor máximo reportado en el mes de octubre (crecimiento del 64%), lo cual puede ser explicado por la disminución en los niveles freáticos que reporta la zona en los meses de abril y octubre (Robles y Sáenz, 1990), haciendo que en la región se presente una menor cantidad de solvente (i.e. agua subterránea) y una reconcentración de las sales disueltas en este. Los pozos que reportan valores mayores de concentración de N-NO₃⁻ son el P-Te-11 (4.50 mg N- NO₃⁻/L) y el Al-Te-02 (3.47 mg N- NO₃⁻/L), ubicados en zonas de transición (NW) y descarga (SE) respectivamente. Aunque estos valores no exceden los estándares de calidad para agua potable (máximo 10 mg N-NO₃⁻ /L), estos se convierten en indicador de riesgo de contaminación del agua en la zona por actividad antrópica.

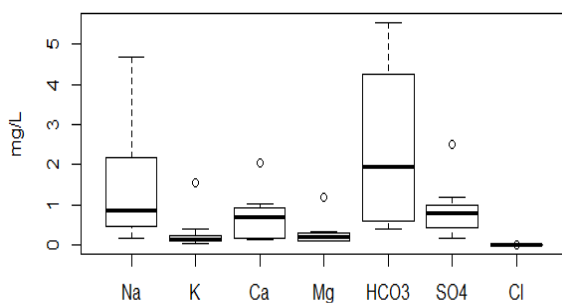


Figura 7.7.a. Boxplot resultado de concentraciones de iones mayoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de octubre/2014

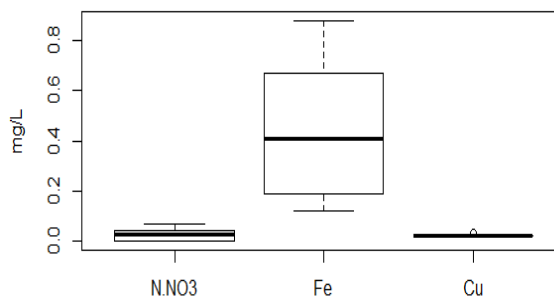


Figura 7.7.b. Boxplot resultado de concentraciones de iones minoritarios de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de octubre/2014

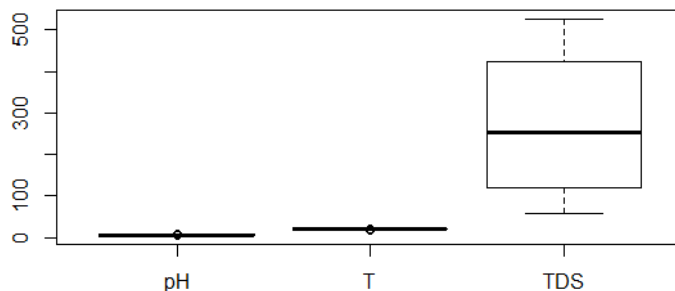


Figura 7.7.c. Boxplot resultado de determinaciones *in-situ* y de TDS de muestras de agua de pozo extraídas en el muestreo de octubre/2014

Las concentraciones de plomo en todos los puntos analizados, al igual que en el mes de julio son menores a 0.5 mg Pb/L, confirmando que la presencia de este elemento se debe a procesos naturales de disolución de rocas o minerales enriquecidos con este mineral y no por acciones antrópicas. No obstante, se hace necesario incrementar la sensibilidad en su determinación, con el fin de establecer la concentración exacta en el agua subterránea extraída en la cuenca y establecer si existe riesgo a la salud por su presencia en aguas usadas para su consumo.

De igual modo, la concentración de Cu no varía su concentración entre los periodos analizados (0.6 ± 0.1 mg Cu/L), permitiendo confirmar que la presencia de este elemento se debe a procesos naturales de disolución de rocas o minerales enriquecidos con este mineral y no por acciones antrópicas.

Para finalizar, el hierro presenta una concentración media de 12.27 ± 7.58 mg Fe/L (variación positiva 39%), producto de la reconcentración iónica en el acuífero debido a la disminución de los niveles freáticos y a procesos naturales de disolución de rocas o minerales enriquecidos con este mineral producto del aumento de las precipitaciones en esta temporada y no por acciones antrópicas. La concentración de ese ión presenta una gran dispersión de los datos a nivel regional, encontrando que los pozos ubicados en las zonas de recarga (P-Te-05, P-Te-06, P-Te-07 y P-Te-11), ubicados a lo largo del flanco N – NE y los pozos P-Te-02 y P-Te-04 ubicados en la zona de descarga de la cuenca presentan las mayores concentraciones de este ión (>11 mg Fe/L) y los pozos restantes presentan las menores concentraciones (<8 mg Fe/L).

7.3.4. COMPARACIÓN CON LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA

Teniendo en cuenta el capítulo II de la Resolución 2115 de 2007 realizada por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), y el capítulo IV del Decreto 1594 de 1984 realizado por el Ministerio Agricultura, por el cual se señalan disposiciones referentes a usos del agua y se dictan otras disposiciones. En la tabla 7.3. a y b se encuentran consignados los valores obtenidos en el muestreo con sus respectivos límites permisivos.

En comparación de los resultados del análisis de las muestras de agua extraídas en los meses de julio y octubre con los valores máximos aceptables para agua de consumo humano referenciados en el capítulo II de la Resolución 2115 de 2007, la totalidad de los pozos en los meses analizados superan el límite permisivo para el hierro y el 30% el límite de alcalinidad.

Los resultados obtenidos, referentes a la concentración de Plomo (Pb) en las muestras estudiadas, no permiten hacer comparación con la normatividad estudiada dado que los valores obtenidos se encuentran por debajo de los límites de detección del equipo (Límite de detección inferior < 0.5 mg Pb/L). Con base en estos resultados, para la potabilización de este tipo de agua, se recomienda que en los pozos muestreados se realice tratamiento convencional y la determinación de parámetros microbiológicos para las mismas.

En comparación de los resultados del análisis de las muestras de agua extraídas en el mes de julio con los valores máximos aceptables para agua de consumo referenciados en el capítulo IV del Decreto 1594 de 1984, y en específico con el artículo 40 del presente decreto el cual presenta los criterios admisibles para el uso agrícola, se encuentra que todos los pozos muestreados presentan valores menores a los límites máximos permisibles de los análisis determinados exceptuando los metales Fe y Cu. Para el primero, el 80% de los pozos analizados supera los valores máximos permitidos por el decreto, únicamente satisfaciendo dicho decreto los pozos P-Te-07 y P-Ta-12. Por su parte, para el elemento Cu, la totalidad de los pozos supera el valor máximo permitido.

Con respecto a las muestras tomadas en el mes de octubre, en comparación con el mismo decreto se encuentra que todas las muestras de agua presentan valores menores a los límites máximos permisibles de los análisis determinados exceptuando, al igual que en las muestras del mes de julio, los metales Fe y Cu. Para el Fe, el 80% de las muestras superan los valores máximos permitidos por el decreto, únicamente no superando los límites permisivos los pozos P-Te-10 y P-Ta-12. Para el elemento Cu, la totalidad de muestras superan el máximo permitido.

Con base en párrafo 2 del presente artículo, se realizó la determinación de los siguientes indicadores (Tabla 7.8 a y b).

Tabla 7.8.a. Indicadores de calidad para riego y evolución hidroquímica julio/2014

INDICADORES	UNIDADES	AI-Te-02	P-Te-04	P-Te-05	P-Te-06	P-Te-07	P-Te-09	P-Te-10	P-Te-11	P-Ta-12	P-Ta-13
TDS	mg/L	170	94	384	615	299	59	87	268	444	340
RSC	meq-g/L	0.94	0.10	3.62	4.51	0.59	0.27	-0.06	2.15	3.01	0.72
PSP	SE	meq-g/L	1.0	0.5	3.2	7.1	1.1	0.4	3.2	4.8	2.4
	PSP	%	85.5	92.4	91.7	97.4	58.5	74.6	57.5	99.0	97.6
(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)-(HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ²⁻)	meq-g/L	-1.2	-0.8	-4.1	-5.9	-1.2	-0.5	-0.7	-2.8	-4.0	-3.2
(Na ⁺ +K ⁺)-Cl ⁻	meq-g/L	1.0	0.5	3.2	7.0	1.1	0.4	0.4	3.2	4.8	2.4
CAI-1	-	-175.2	-42.5	-378.6	-499.2	-194.4	-23.1	-21.2	-280.0	-423.1	-213.3
CAI-2	-	-0.5	-0.4	-0.7	-1.0	-0.3	-0.6	-0.3	-1.0	-0.9	-0.6
(Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +Na ⁺ +K ⁺)-Cl ⁻	meq-g/L	1.7	0.8	3.9	8.3	3.6	0.6	0.8	3.4	6.0	3.5
HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ²⁻	meq-g/L	1.9	1.1	4.9	7.2	3.7	0.7	1.2	3.1	5.2	4.3
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	meq-g/L	0.7	0.3	0.7	1.3	2.5	0.2	0.5	0.3	1.2	1.1

TDS: Sólidos totales disueltos; RSC: Carbonato sódico residual; PS: Porcentaje de Sodio posible; SE: Salinidad Efectiva; CAI: Índice cloro-alcalinos

Tabla 7.8.b. Indicadores de calidad para riego y evolución hidroquímica octubre/2014

INDICADORES	UNIDADES	AI-Te-02	P-Te-04	P-Te-05	P-Te-06	P-Te-07	P-Te-09	P-Te-10	P-Te-11	P-Ta-12	P-Ta-13	
TDS	mg/L	129	118	526	424	278	94	56	227	446	340	
RSC	meq-g/L	-0.06	0.50	3.31	2.12	1.85	0.07	0.06	1.80	3.05	0.72	
PSP	SE	meq-g/L	0.7	0.5	2.8	2.1	1.1	0.5	0.2	2.4	4.8	2.4
	PSP	%	80.4	92.4	86.3	91.1	79.4	85.6	74.9	93.1	97.6	35.9
(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)-(HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ²⁻)	meq-g/L	-0.9	-1.2	-4.5	-2.8	-2.3	-0.9	-0.2	-2.2	-4.0	-3.2	
(Na ⁺ +K ⁺)-Cl ⁻	meq-g/L	0.7	0.5	2.8	2.1	1.1	0.5	0.3	2.3	4.8	2.4	
CAI-1	-	-59.0	-42.5	-311.8	-140.2	-204.3	-30.0	-13.5	-207.8	-423.1	-213.3	
CAI-2	-	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.9	-0.9	-0.6	
(Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +Na ⁺ +K ⁺)-Cl ⁻	meq-g/L	1.4	0.8	5.0	4.3	2.3	0.8	0.6	2.6	6.0	3.5	
HCO ₃ ⁻ +SO ₄ ²⁻	meq-g/L	1.5	1.5	6.7	5.1	3.5	1.3	0.6	2.5	5.3	4.3	
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	meq-g/L	0.7	0.3	2.2	2.3	1.2	0.3	0.4	0.3	1.2	1.1	

TDS: Sólidos totales disueltos; RSC: Carbonato sódico residual; PS: Porcentaje de Sodio posible; SE: Salinidad Efectiva; CAI: Índice cloro-alcalinos

7.3.4.1. Carbonato sódico residual (RSC, por sus siglas en inglés)

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el de calcio o magnesio, existe la posibilidad que se forme carbonato de sodio soluble, aunque después que se han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones, la concentración total y relativa de sodio puede ser suficiente para desplazar el calcio y magnesio del complejo de intercambio, produciéndose la defloculación del suelo (Pérez, 2011; Jaimes, 2010). Este indicador se emplea para predecir la tendencia del calcio y magnesio a precipitar en el suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas (Laboratorio Agroambiental Fraisoro, 2002). Se calcula mediante la siguiente fórmula, expresando la concentración de los iones en meq-g/L (Ecuación 7.8.):

$$RSC = ([CO_3^{2-}] + [HCO_3^-]) - ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]) \quad Ec. 7.8.$$

Tabla 7.9. Clasificación de aguas para riego de acuerdo con el contenido de RSC

Clase	Valores de CSR (meq-g/L)
Buena	RSC < 1.25
Condicionada	1.25 < RSC < 2.50
No recomendable	2.5 < RSC

Fuente: Pérez, 2011; Jaimes, 2010; Laboratorio Agroambiental Fraisoro, 2002.

7.3.4.1.1. Muestreo julio/2014

Con base en los resultados (Tabla 7.8.a.), y en comparación con los valores de clasificación de aguas para riego (Tabla 7.9.), se establece que el agua extraída de los pozos Al-Te-02, P-Te-04, P-Te-07, P-Te-09, P-Te-10 y P-Ta-13, presentan una calificación “buena” para su utilización como agua de riego. Por su parte el agua del pozo P-Te-11 presenta clasificación “condicionada” para este uso. Por último, el agua del pozo P-Te-05, P-Te-06 y P-Ta-12 es clasificada como “no recomendable”.

7.3.4.1.2. Muestreo octubre/2014

Con base en los resultados (Tabla 7.8.b.), y en comparación con los valores de clasificación de aguas para riego (Tabla 7.9.), los pozos Al-Te-02, P-Te-04, P-Te-09, P-Te-10 y P-Ta-13 presentan una calificación “buena” para su utilización como agua de riego. Por su parte el agua de los pozos P-Te-06, P-Te-07y P-Te-11 son aguas de clasificación “condicionada” para este uso. Por último, el agua de los pozos P-Te-05 y P-Ta-12, son clasificadas como agua “no recomendable”.

7.3.4.2. Porcentaje de sodio Posible (PSP)

El peligro de desplazamiento del calcio y del magnesio por el sodio, en el complejo de intercambio, empieza cuando el contenido de sodio en solución representa más del 50%

de los cationes disueltos (Pérez, 2011). Es la cantidad de sodio que resultaría después que se precipite el CaCO_3 , MgCO_3 y el CaSO_4 (Jaimes, 2010). Se calcula mediante la siguiente fórmula, expresando la concentración de los iones en meq-g/L (Ecuación 7.9.):

$$PSP = \frac{[\text{Na}^+]}{SE} \times 100\% \quad \text{Ec. 7.9.}$$

Valores por encima del 50% en este índice hacen que el agua tenga una calidad “No recomendable” (Jaimes 2010).

Tabla 7.10. Clasificación de aguas para riego según su salinidad efectiva

Clase	Salinidad Efectiva (meq-g/L)
Buena	$SE < 3$
Condicionada	$3 < SE < 15$
No recomendable	$15 < SE$

Fuente: Pérez, 2011

El valor SE es denominado salinidad efectiva, es una estimación del peligro que representan las sales solubles del agua para riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, pues considera la precipitación ulterior de las sales menos solubles (CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4) las cuales dejan de precipitar con la elevación de la presión osmótica de la solución del suelo (Tabla 7.10). Este índice se determina a través de alguna de las siguientes fórmulas (Ecuaciones 7.10.a, b, c y d), expresando la concentración de los cationes en meq-g/L (Pérez, 2011).

$$\begin{aligned} & \text{Si } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) \therefore \\ & SE = \sum \text{Cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) \quad \text{Ec. 7.10. a.} \\ & \text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}); \text{ pero } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) \therefore \\ & SE = \sum \text{Cationes} - (\text{Ca}^{2+}) \quad \text{Ec. 7.10. b.} \\ & \text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-); \text{ pero } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) \therefore \\ & SE = \sum \text{Cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) \quad \text{Ec. 7.10. c.} \\ & \text{Si } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) \therefore \\ & SE = \sum \text{Cationes} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \quad \text{Ec. 7.10. d.} \end{aligned}$$

7.3.4.2.1. Muestreo julio/2014

En la tabla 7.8.a se presentan los valores de SE y PSP obtenidos. Con base en dichos resultados, se obtiene que los pozos Al-Te-02, P-Te-04, P-Te-07, P-Te-09, P-Te-10 y P-Ta-13 con referencia al índice de salinidad efectiva, se presenta agua recomendada para riego (Tabla 7.10.), por su parte los pozos restantes presentan aguas condicionadas para este uso. Teniendo en cuenta el porcentaje de sodio posible, se presenta que el pozo P-

Ta-13, extrae agua aptas para riego según su comparación con el índice PSP. Los restantes presentan aguas con calidad “No recomendable”.

7.3.4.2.2. Muestreo octubre/2014

En la tabla 7.8.b se presentan los valores de SE y PSP obtenidos. Se manifiesta que todas las muestras de agua extraídas a excepción del pozo P-Ta-12, con referencia al índice SE (Tabla 7.10.), son recomendadas para riego. Teniendo en cuenta el PSP, todas las muestras a excepción de la tomada en el pozo P-Te-13 son aguas con calidad “No recomendable”.

7.3.4.3. Otros indicadores

Con el fin de complementar la información respecto al uso de agua subterránea extraída de la cuenca del Río Chicú, se utilizaron la recomendación dada por Ayers y Wescot (1985) respecto al grado de restricción de uso del agua para irrigación teniendo en cuenta la concentración de TDS presente en el agua (Tabla 7.11.).

Tabla 7.11. Guía para la interpretación de la calidad de agua para irrigación¹

Problema potencial de irrigación	Unidades	Grado de Restricción de Uso		
		Nulo	Ligero a Moderado	Severo
Salinidad (afecta la productividad de los cultivos)²				
EC _w	μS/cm	< 700	700 - 3000	> 3000
TDS	mg/L	< 450	450 – 2000	> 2000

¹ Adaptado de la Universidad de California, Comité de Consultantes 1974

² EC_w significa conductividad eléctrica, una medida de la salinidad del agua, reportada en microsimens por centímetro (μS/cm) a 25°C. TDS significa sólidos totales disueltos (por sus siglas en inglés), reportado en miligramos por litro (mg/L)

Fuente: Ayers y Westcot, 1985

7.3.4.3.1. Muestreo julio/2014

Con base en los datos de TDS obtenidos (tabla 7.8.a) se obtiene que el agua extraída del pozo P-Te-06 presenta un grado de restricción ligero a moderado (tabla 7.11.) para ser usada en la irrigación de cultivos; los restantes pozos no presentan restricción para este uso.

7.3.4.3.2. Muestreo octubre/2014

Con base en los datos de TDS obtenidos (tabla 7.8.b) se obtiene que el agua extraída del pozo P-Te-05 presenta un grado de restricción ligero a moderado (tabla 7.11.) para ser usada en la irrigación de cultivos; los restantes pozos no presentan restricción para este uso.

7.3.5. HIDROQUÍMICA GENERAL

7.3.5.1. Facies Hidroquímicas

Aceptando la hipótesis que la composición química e isotópica del agua subterránea refleja la composición mineralógica de las rocas en el acuífero, en otras palabras, que la litología le proporciona al agua una huella hidrogeoquímica precisa. Es posible utilizar esta información para localizar zonas de recarga, determinar el origen del agua subterránea (e.g. meteórica, marina, fósil, magmática o metamórfica) y nos permite conocer información acerca del proceso interactivo entre el agua y la roca y los procesos hidroquímicos que se generan en esta matriz ambiental (IAEA y UNESCO, 2000).

En general, debe cumplirse que el agua subterránea asociada a acuíferos que se recargan con aguas meteóricas de origen continental, deben ser de naturaleza bicarbonatada o sulfatada producto de la composición de la precipitación en medios continentales (tendencia general $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$) (Matveyev y Bashmakova, 1967; Al-Khashman, 2005). Y una vez infiltrada, la composición química de las aguas subterráneas dependerá directamente de los minerales con que entre en contacto en el acuífero y del tiempo de interacción que tenga con ellos, que puede llegar a ser de miles de años (Custodio y Llamas, 1976). Para flujos locales o de corto tiempo de residencia, las aguas subterráneas asociadas a acuíferos calizos deben ser de naturaleza bicarbonatada cálcica; las de los dolomíticos: bicarbonatada cálcico-magnésica; las relacionadas con niveles yesíferos, sulfatadas cálcicas, y las correspondientes a areniscas cuarcíticas las menos mineralizadas (Renau, 2010). No obstante, para aguas de flujos de mayor recorrido la interacción con diversas litologías puede provocar, no sólo aportes iónicos [por procesos de intercambio iónico lo que conllevara al aumento de la cantidad de sales presentes en el agua] sino también modificaciones hidrogeoquímicas que afectan la estabilidad de ciertas especies en disolución (Renau, 2010).

La caracterización hidroquímica básica de las aguas extraídas del acuífero de los sedimentos Sabana y Chía en la cuenca del Río Chicú para el primer (julio/2014) y segundo (octubre/2014) muestreo, se refleja en los diagramas de Piper de las figura 7.8. a y b. Se encuentra que en general el acuífero estudiado presenta facies bicarbonatadas a sulfatadas sódicas, magnésicas o cálcicas según el caso. Con base en estas figura y haciendo una aproximación inicial, se generaron cuatro subgrupos G1, G2, G3 y G4 con características hidroquímicas similares.

El subgrupo G1, conglomerada aguas con facies hidroquímicas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas. En el primer muestreo se encuentra presente el pozo P-Te-10 ($\text{Mg-Na-SO}_4\text{-HCO}_3$) y para el segundo muestreo no se encuentra ningún pozo en este grupo. La presencia de esta facie en una zona cercana al área potencial de recarga, es producida por una marcada interacción de las aguas de origen meteórico con los sedimentos suprayacentes al acuífero (formaciones Labor – Tierna, Conejo y Guaduas)

que se encuentran en las faldas de la montaña, los cuales generan una modificación en la composición química de las aguas extraídas en la zona.

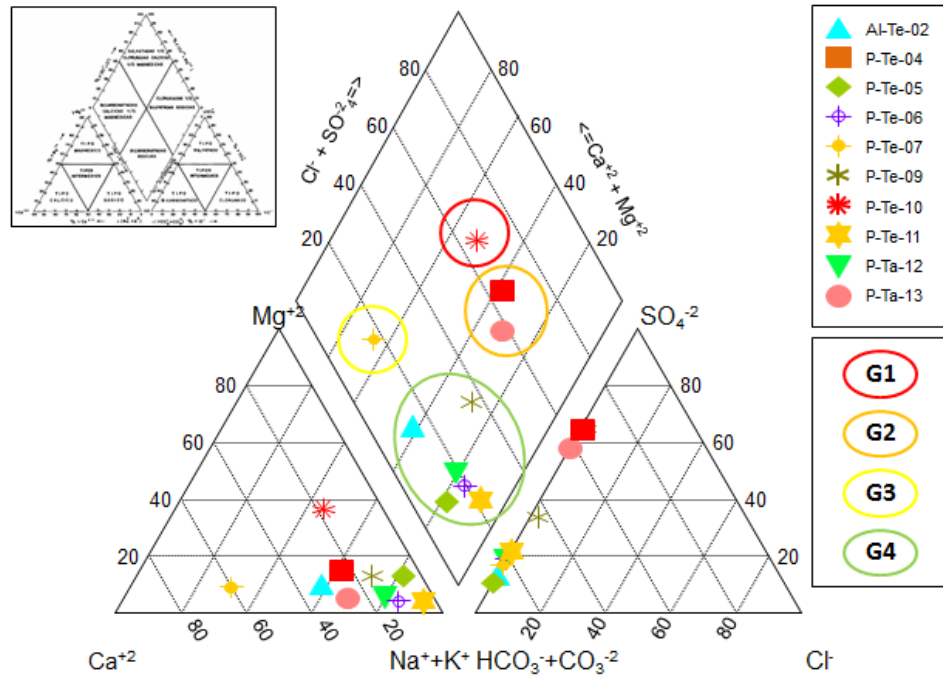


Figura 7.8.a. Diagrama de Piper para las muestras tomadas del Acuífero de Sedimentos Chía y Sabana, Cuenca del Río Chicú, Cundinamarca, Colombia (Muestreo julio/14).

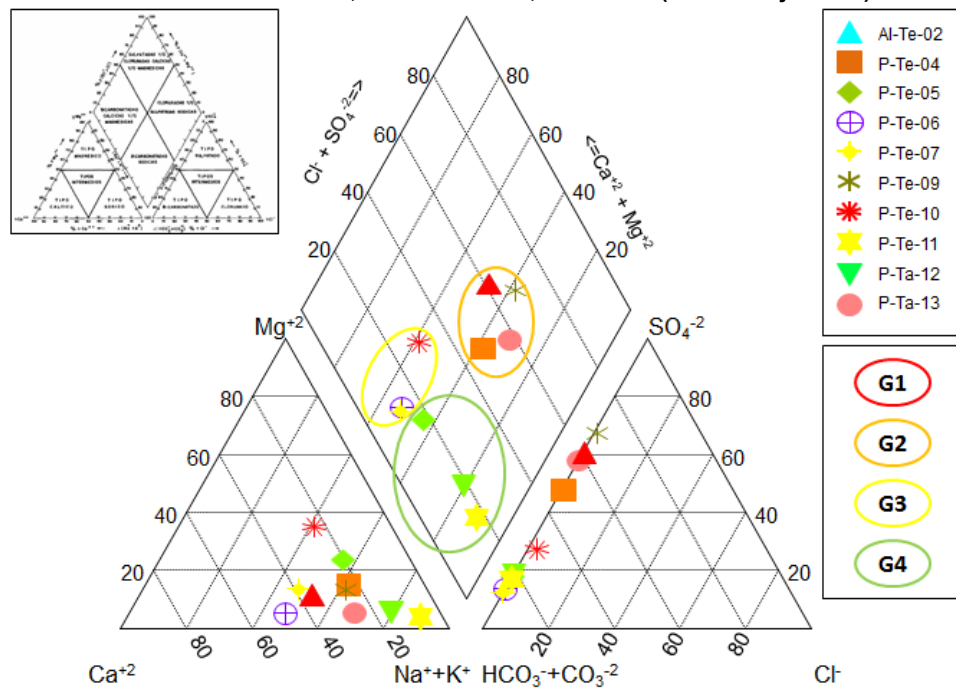


Figura 7.8.b. Diagrama de Piper para las muestras tomadas del Acuífero de Sedimentos Chía y Sabana, Cuenca del Río Chicú, Cundinamarca, Colombia (Muestreo octubre/14).

El subgrupo G2, son aguas con facie hidroquímica clorurada y/o sulfatada sódica, extraídas de los pozos P-Te-04 (Na-SO₄-HCO₃) y P-Ta-13 (K-Ca-Na-SO₄-HCO₃) (primer muestreo) y Al-Te-02 (Na-Ca-SO₄-HCO₃), P-Te-04 (Na-HCO₃-SO₄), P-Te-09 (Na-SO₄-HCO₃) y P-Ta-13 (K-Ca-Na-SO₄-HCO₃) (segundo muestreo), dichos pozos se encuentran dispersos en dos zonas mayoritariamente: la primera en la zona de descarga y la segunda en una zona cercana al área de recarga N de la cuenca. La presencia de estas facies en dichas zonas alude que estas aguas han presentado un mayor tiempo de tránsito a través de los sedimentos del acuífero lo que ha provocado una mayor interacción con el mismo y una evolución aniónica pasando de bicarbonato a sulfato mayoritariamente, siguiendo la secuencia de Chevotareb. Es importante resaltar que la facie hidroquímica presente en el agua del pozo P-Ta-13, donde se encuentra una concentración mayoritaria de K⁺, puede ser interpretada como el efecto de disolución de este por un sedimento enriquecido con este elemento o un resultado del impacto del ser humano sobre dicha zona, producto que en esta se encuentra una gran cantidad de empresas dedicadas al cultivo intensivo de flores.

El subgrupo G3, son aguas con facie hidroquímica bicarbonatada cálcica y/o magnésica a la cual pertenecen el pozo P-Te-07 (Ca-HCO₃) para el muestreo de julio/14 y los pozos P-Te-06 (Ca-Na-HCO₃), P-Te-07 (Ca-Na-HCO₃) y P-Te-10 (Mg-Na-Ca-HCO₃-SO₄) para el muestreo de octubre/14; estos pozos se encuentra al N-NE de la cuenca, sobre las zonas potenciales de recarga producto de la acumulación de gravas en la zona (Van Der Hammer, 1973; Robles *et al.*, 1991), lo cual produce que estas aguas sean ricas en iones bicarbonato, calcio y magnesio, debido a su origen por agua de precipitación y su corto tiempo de residencia en el acuífero.

El subgrupo G4, con facie hidroquímica bicarbonatada sódica, obtenida de los pozos Al-Te-02 (Na-Ca-HCO₃), P-Te-05 (Na-HCO₃), P-Te-06 (Na-HCO₃), P-Te-09 (Na-HCO₃-SO₄), P-Te-11 (Na-HCO₃-SO₄) y P-Ta-12 (Na-HCO₃) (julio/14) y P-Te-05 (Na-Mg-HCO₃-SO₄), P-Te-11 (Na-HCO₃) y P-Ta-12 (Na-HCO₃) (octubre/14); este tipo de facie se encuentran dispersa sobre la cuenca media y baja, con el predominio del ión bicarbonato producto del origen meteórico que presenta el agua subterránea analizada, a su vez se encuentra una dominancia del ión sodio dadas las características de la cuenca, que permiten el intercambio catiónico reverso entre los sedimentos arcillosos que proveen este ión y los iones calcio y magnesio presentes en el agua subterránea.

7.3.5.2. Relaciones Iónicas

Las relaciones iónicas son útiles para comparar diferentes masas de agua y trazar la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea. Con el fin de realizar una primera aproximación se generaron las relaciones iónicas entre los iones mayoritarios y minoritarios analizados (Figura 7.9. a y b), encontrando una independencia lineal entre las variables (-0.5 ≤ r ≤ 0.5) a excepción de las relaciones entre Na⁺ - HCO₃⁻ (r_{Jul} = 0.89; r_{Oct} = 0.74), K⁺ - SO₄²⁻ (r_{Jul} = 0.84; r_{Oct} = 0.89), NO₃⁻ - Cl⁻ (r_{Jul} = 0.87), Mg²⁺ - HCO₃⁻ (r_{Jul} = 0.71; r_{Oct} = 0.71) y Ca²⁺ - HCO₃⁻ (r_{Oct} = 0.75) mostrando que la hidrogeoquímica de la zona

estudiada es gobernada mayormente por los iones Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} y HCO_3^- , con presencia minoritaria de los iones Cl^- y N-NO_3^- .

Al analizar las relaciones encontradas con una mayor correlación ($r > 0.70$), y generando comparación con las líneas de relación molar, las cuales se conciben al asumir que la composición del agua analizada es formada únicamente por la disolución de la sal pura. Por lo cual, la relación molar de los iones $\text{N}^+:\text{HCO}_3^-$ es 1:1; de los iones $\text{K}^+:\text{SO}_4^{2-}$ es 2:1 y de los iones $\text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^-$ es 1:2.

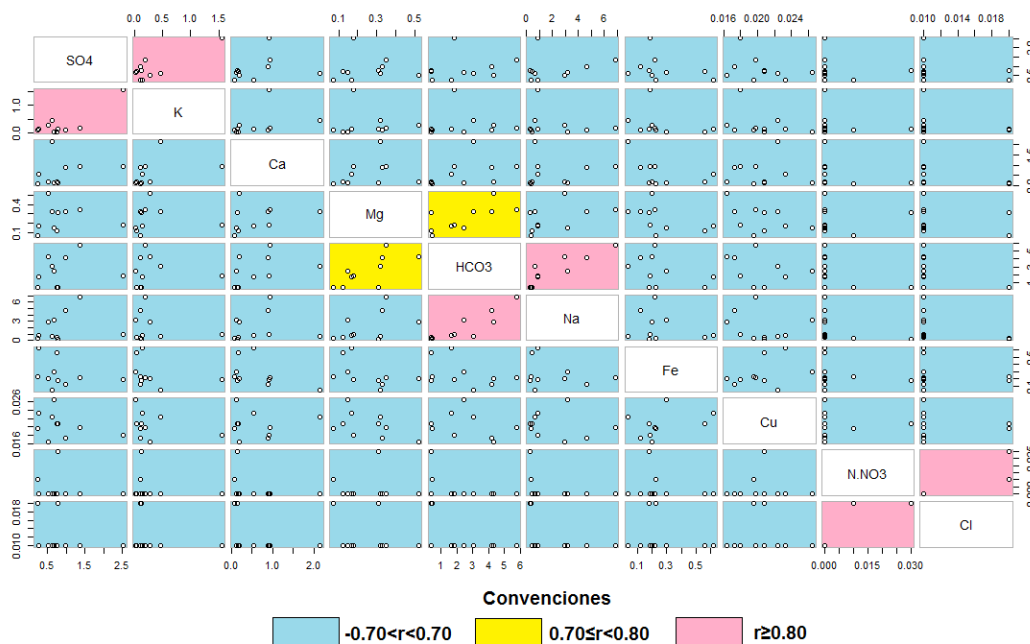


Figura 7.9.a. Relaciones Iónicas entre iones mayoritarios y minoritarios analizados (julio/14).

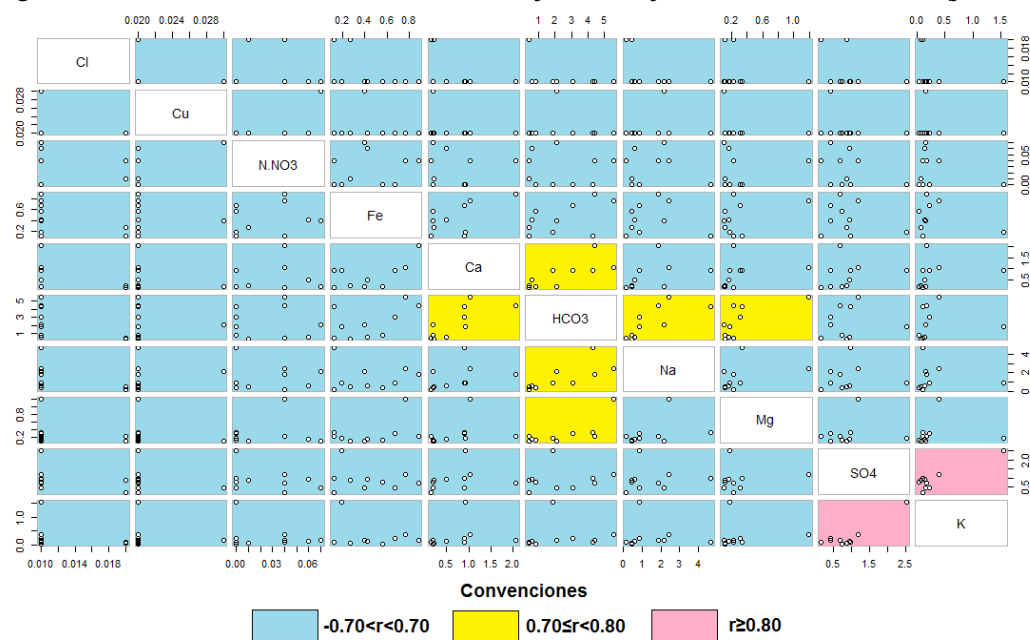


Figura 7.9.b. Relaciones Iónicas entre iones mayoritarios y minoritarios analizados (octubre/14).

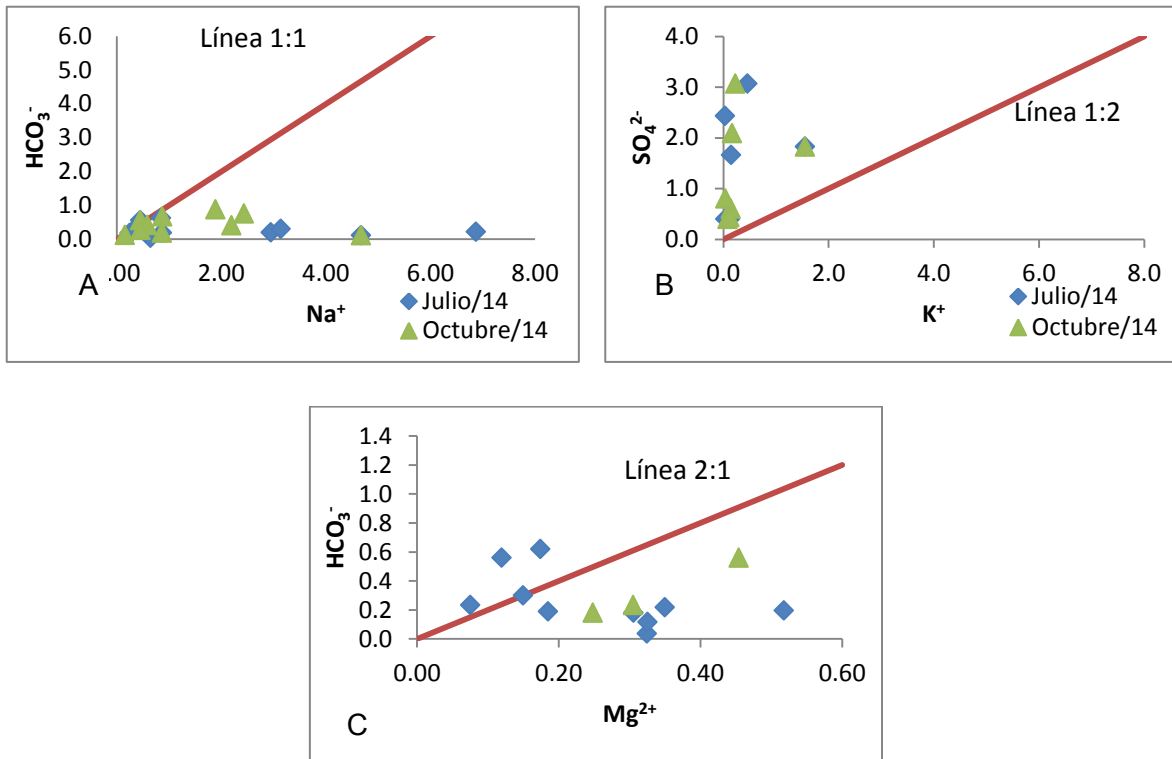


Figura 7.10. Relaciones iónicas entre iones a) Na⁺:HCO₃⁻; b) K⁺:SO₄²⁻; c) Mg²⁺:HCO₃⁻.
Al analizar las gráficas obtenidas (figura 7.10. a, b y c), se encuentra que en estas los iones en su gran mayoría no se comportan según las líneas de relación molar, exceptuando algunos puntos que se presentan en las gráficas A y C. Existe una marcada tendencia de los datos a encontrarse encima o debajo de sus respectivas equilineas, lo cual indica la existencia de procesos adicionales al de la disolución de sales que gobierna la hidroquímica del acuífero estudiado, tales como el enriquecimiento de iones Sodio, Magnesio y Sulfato, que puede ser aludida al intercambio catiónico que se produce en la

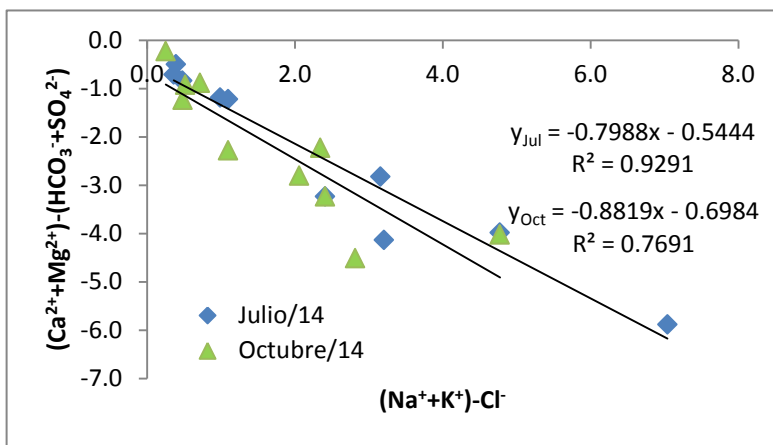


Figura 7.11. Relación iónica (Na⁺ + K⁺) - Cl⁻ : (Ca²⁺ + Mg²⁺) - (HCO₃⁻ + SO₄²⁻)

matriz mineral de carácter arcilloso con intercalaciones lenticulares de arenas y gravas que conforman los sedimentos del acuífero (Van Der Hammer, 1973; Robles *et al.*, 1991).

Con el fin de evaluar el posible rol del intercambio catiónico en la hidroquímica del agua subterránea del acuífero de formaciones Sabana y Chía, se realizó la gráfica en meq-g/L entre

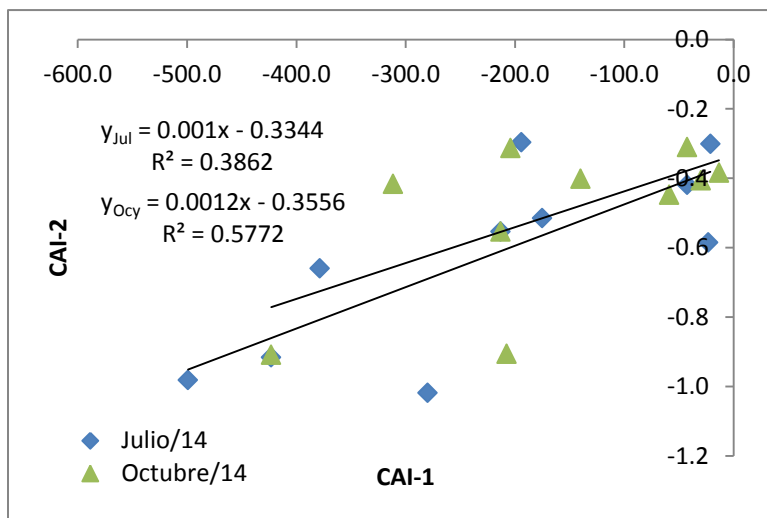
$(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})$ y $(Na^+ + K^+) - Cl^-$; el primer indicador ubicado en el eje de las ordenadas, provee la suma de los cationes Calcio y Magnesio de fuentes distintas que sus respectivos bicarbonatos y sulfatos, por su parte el segundo indicador ubicado en el eje de las abscisas provee la concentración total de cationes Potasio y Sodio de otras fuentes que sus respectivos cloruros en el sistema. Si el intercambio catiónico envuelve el ión Sodio y los otros cationes mayoritarios que se encuentran en el sistema, se puede esperar que se presente una línea de pendiente aproximada -1. En ausencia de estas reacciones en cantidades significativas para influenciar la hidroquímica del acuífero, todos los puntos se encontrarán graficados cerca al origen (Jalali, 2007; Yidana y Yidana, 2009).

La figura 7.11., muestra el gráfico de dispersión para la relación mencionada, evidenciando que el intercambio catiónico es un factor probable en la hidroquímica del acuífero estudiado.

Para constatar las posibles reacciones de intercambio iónico, que toman lugar en el sistema fueron usados los índices cloro alcalinos (CAI) usando las ecuaciones 7.11.a y b. Cuando el intercambio catiónico ocurre entre Ca^{2+} y Mg^{2+} en la roca huésped y Na^+ y K^+ en el agua, ambos indicadores se espera que sean positivos. Por otro lado, si ambos índices son negativos, este comportamiento indica un intercambio catiónico reverso. (Kumar *et al.*, 2007; Yidana y Yidana, 2009).

$$CAI - 1 = \frac{[Cl - (Na + K)]}{Cl} \quad Ec. 7.11. a.$$

$$CAI - 2 = \frac{[Cl - (Na + K)]}{(SO_4 + HCO_3 + CO_3 + NO_3)} \quad Ec. 7.11. b.$$



La figura 7.12. muestra que la totalidad de las muestras presenta valores negativos en los dos índices, sugiriendo que se produce el intercambio catiónico en el sistema, el cual es factible por la presencia de minerales arcillosos en la matriz de sedimentos del acuífero.

Figura 7.12. Relación Iónica CAI-1: CAI-2

Un gráfico de la suma de los cationes mayoritarios menos cloruros contra el ión bicarbonato y contra la suma de los iones bicarbonato y sulfato (figuras 7.13. y 7.14.) permite corroborar la idea que se produce la meteorización de silicatos presentes en la matriz arcillosa que conforma los sedimentos en el acuífero

estudiado, además de la presencia y disolución de minerales de carbonato y sulfato, los cuales juegan un rol fundamental en la hidroquímica.

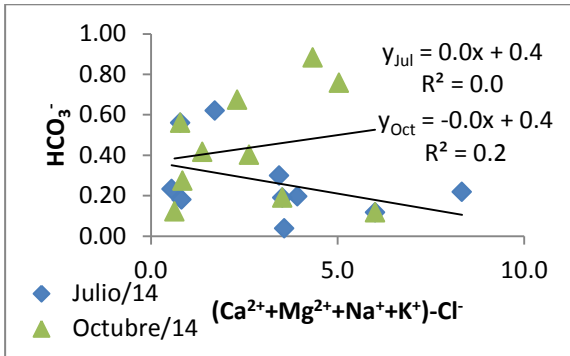


Figura 7.13. Relación Iónica Cationes mayoritarios menos cloruro: Bicarbonato

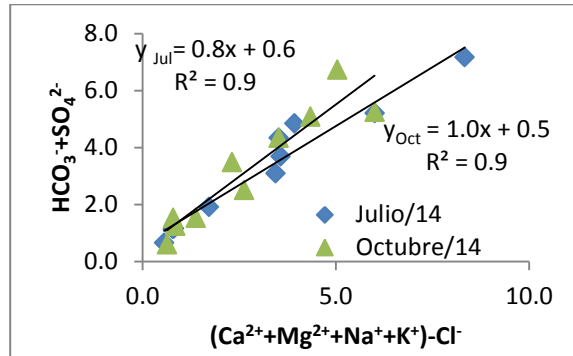


Figura 7.14. Relación Iónica Cationes mayoritarios menos cloruro: Bicarbonato más Sulfato

Con el fin de evaluar el rol de la disolución de los minerales de carbonato y sulfato en el sistema, se realizó la gráfica del $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ contra $(HCO_3^-+SO_4^{2-})$. Los puntos que están a lo largo o cerca de la línea 1:1 son atribuidos a la meteorización de los minerales de carbonato y sulfato. Los puntos que caen debajo de la equilínea son considerados que han sido resultado de la disolución de carbonatos o sulfatos. Los valores por encima de la equilínea son significantes a los efectos del intercambio catiónico y la meteorización de los minerales de silicato (Yidana y Yidana, 2009).

La figura 7.15., evidencia que el 30% de las muestras se encuentran en cercanías de la línea 1:1, lo cual indica la contribución de la disolución de los minerales de carbonato y sulfato, no obstante en terminos generales, la totalidad de estos se encuentran sobre la equilínea explicitando y confirmando los efectos del intercambio catiónico y la meteorización de los silicatos sobre la hidroquímica del acuífero objeto de estudio.

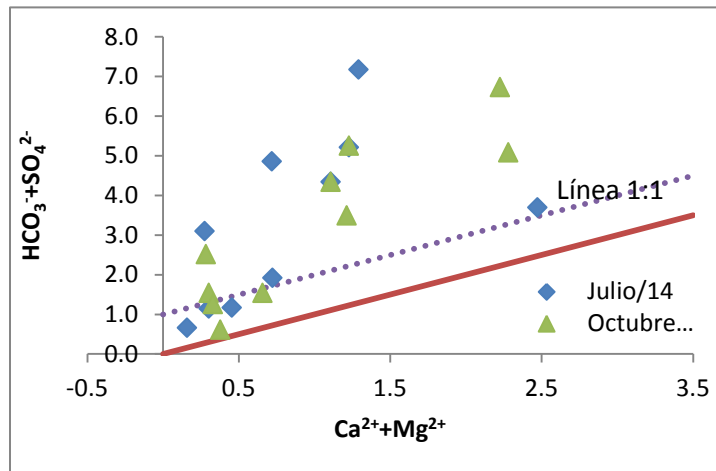


Figura 7.15. Relación Iónica $HCO_3^-+SO_4^{2-} : Ca^{2+}+Mg^{2+}$

Con relación a la disolución de los minerales de carbonato y sulfato, estos pueden ser mediados por la presencia de sus especies acidas correspondientes, el ácido carbónico (H_2CO_3) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4), las cuales facilitan las reacciones de meteorización de estos minerales. Para el caso de los minerales de carbonato tales como la calcita ($CaCO_3$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), si el ácido carbónico es el agente meteorizador, la

relación molar de los iones $\text{Ca}^{2+}:\text{HCO}_3^-$ es 1:2 para la calcita, mientras que la meteorización de la dolomita es 1:4 (Garrels y McKenzie, 1967).

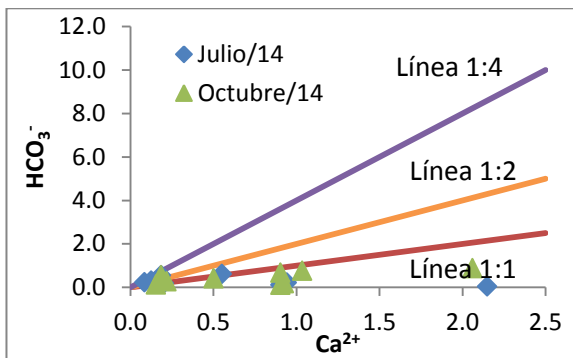


Figura 7.16. Relaciones iónicas $\text{Ca}^{2+} : \text{HCO}_3^-$

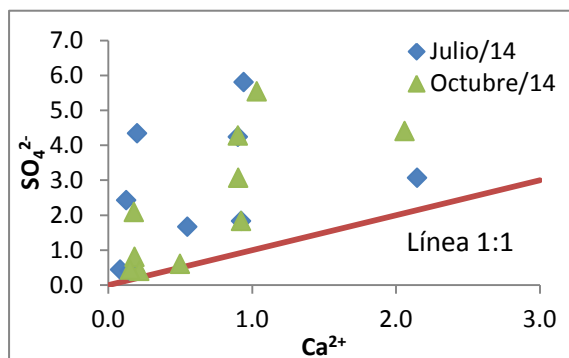


Figura 7.17. Relaciones iónicas $\text{Ca}^{2+} : \text{SO}_4^{2-}$

En la figura 7.16. se evidencia que los puntos se ubican sobre o cerca a la línea 1:1, producto del efecto de la meteorización de la calcita mediada por la formación y presencia de ácido carbonico (H_2CO_3), cuyo proceso ha sido afectado por procesos de intercambio catiónico con la matriz arcillosa presente en los sedimentos del acuífero objeto de estudio.

En el diagrama de dispersión (Figura 7.17.) que relaciona los iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} , no se establece una relación que podría sugerir la existencia de una mediación entre el ácido sulfúrico y el proceso de meteorización de calcita en el sistema. La mediación del ácido sulfúrico en la meteorización de la calcita resulta en una relación iónica $\text{Ca}^{2+}:\text{SO}_4^{2-}$ cercana al 1:1 (Garrels y McKenzie, 1967).

7.3.5.3. Análisis Multivariante

La utilización de las técnicas estadísticas, y en caso específico de las técnicas estadísticas multivariantes son herramientas cada vez más utilizadas en hidrogeoquímica, dado que estas han permitido identificar los factores más importantes que explican la variabilidad de los datos, en otras palabras, permiten explicar el comportamiento de la hidroquímica de un acuífero. Para este estudio se aplicaron dos métodos; el primero es el Análisis de Componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) y el análisis de Conglomerados (CA, por sus siglas en inglés). Con el PCA, se estudia las relaciones de interdependencia, mientras que el CA permite clasificar y agrupar las muestras de agua que presentan [características hidroquímicas similares o] que proceden del mismo sitio de extracción (Renau, 2010).

El análisis de conglomerados (CA) es el nombre dado a una variedad de técnicas que permiten la estructuración de un conjunto de unidades en grupo, permitiendo clasificar cualquier conjunto de variables y de observaciones con base en su homogeneidad. Se utilizó el análisis de conglomerados jerárquico (HCA, por sus siglas en inglés), el cual es el más popular de los dos métodos de análisis de conglomerados (Yidana *et al*, 2010). En este se divide los datos en jerarquías basadas en la similitud o discrepancia en el campo,

para ello se utiliza una matriz de similitud la cual se construye utilizando parámetros que relacionan las unidades; generalmente se utilizan las distancias o los coeficientes de correlación. Finalmente, los distintos grupos de variables u observaciones creados se representan en gráficos llamados dendogramas, que permiten visualizar qué grupos están más relacionados entre sí y cuales tiene muy poca o ninguna relación (Renau, 2010; Subyani y Al Ahmadi, 2010; Hussain *et al*, 2008). Existen dos tipos de análisis de conglomerados: modos Q y R. El modo-R se realizó con las diferentes variables de calidad del agua, por su parte el análisis en modo-Q se realizó sobre los datos de la química del agua, para agrupar las muestras en cuanto a la calidad del agua (Davis, 2002; Tabachnick y Fidell, 2006). La distancia euclidiana fue utilizada para clasificar los parámetros dentro de los conglomerados iniciales, utilizando el método de aglomeración de Ward para vincular los grupos iniciales resultantes. Estudios previos (Yidana *et al*, 2008; Yidana y Yidana, 2009; Yidana *et al*, 2010) sugieren que la combinación de la distancia euclidiana como una medida de semejanza / diferencia y el algoritmo de vinculación de Ward tienden a resultar en una clasificación óptima de los parámetros.

El análisis de componentes principales es un procedimiento estadístico multivariante diseñado para estudiar las relaciones entre las diferentes variables, la cual es utilizada para examinar los patrones o relaciones subyacentes para un gran número de variables y resumir la formación en un conjunto más pequeño de factores o componentes independientes uno del otro, para fines de predicción (Davis, 2002). El PCA se define como una transformación lineal ortogonal (i.e. rotación varimax) que transforma las variables a un nuevo sistema de coordenadas tal que la mayor varianza por cualquier proyección de las variables viene a situarse en la primera coordenada (llamado el primer componente principal, PC1), el segundo mayor varianza en la segunda coordenada (PC2), y así sucesivamente (Subyani y Al Ahmadi, 2010; Tabachnick y Fidell, 2006). Se usó el criterio de Kaiser (1960), con el fin de dimensionar el número de factores que pueden ser incluidos en el modelo final, el cual exige que los factores dignos en el modelo deban tener valores propios (Eigenvalues) no menores a 1,0 (Yidana *et al*, 2010). Usando esta metodología, las concentraciones de los diferentes elementos en el agua subterránea pueden ser relacionadas e interpretadas en función de diversos procesos fisico-químicos subyacentes como, reacciones de disolución-precipitación de carbonatos, procesos de intercambio iónico y meteorización de silicatos (Renau, 2010).

Para la realización de estos análisis, se usaron los datos estadísticos sumarios de cada parámetro fisicoquímico analizado, los cuales fueron presentados usando el diagrama de caja y bigote (Figuras 7.6. y 7.7. a, b y c), se analizó su ajuste a la distribución normal y homogeneidad usando el test de Shapiro – Wilk. Todos los parámetros fueron log-normalizados y posteriormente fueron estandarizados y homogenizados a sus correspondientes z-scores (Ecuación 7.12.).

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{Ec. 7.12.}$$

Dónde: x: Concentración ión
 μ : Media de la muestra

σ : Desviación estándar de la muestra

En el análisis estadístico multivariado, los datos censurados fueron remplazados usando la metodología propuesta por Sanford *et al* (1993). Como la concentración del ión minoritario Pb es extremadamente pequeña comparada con las restantes, estos no fueron incluidos en el análisis multivariado. El uso de estas técnicas estadísticas tienen el objetivo de confirmar las tendencias evolutivas identificadas por otros métodos anteriormente aplicados. Los análisis PCA y HCA en los modos R y Q fueron realizadas mediante el programa R y las librerías psych (Revelle, 2013) clúster (Maechler *et al*, 2014) y ade4 (Dray y Dufour, 2007).

7.3.5.3.1. Análisis de conglomerados jerárquico (HCA)

En el análisis de conglomerado jerárquico en modo-R se presenta el dendograma obtenido para los parámetros de calidad analizados en las muestras de agua tomadas del acuífero de sedimentos neógeno – cuaternario en la cuenca del Río Chicú. En modo-Q, se presenta el dendograma obtenido para las muestras de agua analizando el grado de asociación entre estas. Variables fisicoquímicas y puntos de muestreo con características y relaciones espaciales similares, se presentan conglomeradas juntas con distancias de unión pequeñas, mientras que variables diferentes se encuentran unidas a grandes distancias.

7.3.5.3.1.1. Muestreo julio/14

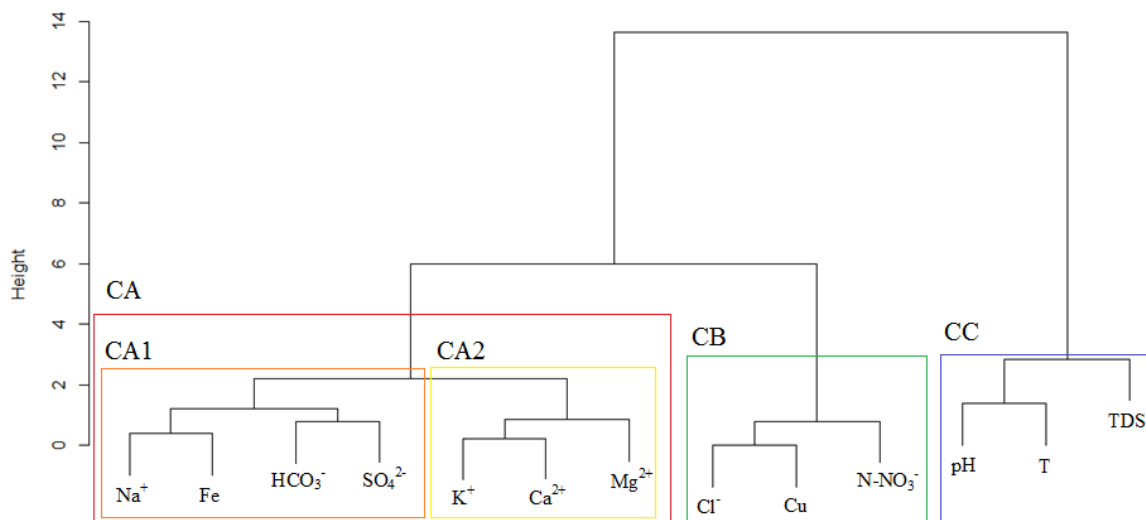


Figura 7.18. Dendograma HCA modo-R muestreo julio

En la figura 7.18. se presentan 3 grandes conglomerados. El primer clúster (CA) dividido en dos agrupaciones; la primera subdivisión denominada CA1 esta conformado por las variables Na^+ , Fe, HCO_3^- y SO_4^{2-} ordenadas de acuerdo a su distancia de correlación y la

segunda subdivisión denominada CA2 conforma por los iones K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . El segundo clúster denominado CB, lo conforman las variables Cl^- , Cu y $N-NO_3^-$, por último el tercer clúster (CC) está conformado por las variables pH, T y TDS.

El conglomerado CA se asocia a la recarga superficial del acuífero y los fenómenos de interacción entre el agua y el sedimento que conforman el acuífero. En el sub-clúster CA1 se confirma la relación que presentan los iones HCO_3^- y SO_4^{2-} en torno a la evolución hidroquímica del agua desde la zona de recarga del acuífero y los procesos de enriquecimiento del ión sulfato, debido a las interacciones entre los sedimentos y el agua por su paso a través de esta matriz hasta la zona de descarga; dicha interacción origina una ganancia de iones Na^+ y Fe, producto de los procesos de intercambio catiónico que se generan en el acuífero, lo cual es confirmado por el subclúster CA2, en el cual se asocian los iones K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} que son fuertemente adsorbidos por los sitios activos en la matriz arcillosa que conforma el acuífero, generando un intercambio catiónico con el ión Na^+ .

El conglomerado CB muestra la relación de los iones cloruro, nitrato y cobre los cuales presentan bajas concentraciones en todas las muestras analizadas; su presencia conjunta en muestras de agua puede ser relacionada a la adición de agroquímicos utilizados en la zona rural de los municipios insertos en la cuenca. Dicho comportamiento permite definir a estos iones como indicadores de impacto antrópico, donde el aumento de la concentración de alguna de estas variables resultaría en una alerta para la hidroquímica del acuífero.

Por último, el conglomerado CC relaciona los parámetros *in situ*, los cuales exhibe las propiedades físicas que presenta el acuífero, la relación entre estos se origina dado que todos los procesos de meteorización e intercambio catiónico que se generan en el acuífero son influenciados directamente por el pH y T presentes en la matriz del acuífero, que a su vez se ve reflejado en el aumento de los TDS a medida que el agua transita por los sedimentos presentes en el área de estudio.

Por otro lado, el HCA modo-Q resulta en el dendograma (Figura 7.19.), el cual presenta la asociación del agua en el área objeto de estudio. Acorde a este se observan cuatro grupos principales, el primer clúster denominado C1 relaciona los pozos que se encuentran ubicados en la zona de descarga, por lo cual se predice que este clúster relaciona pozos con aguas evolucionadas con características hidroquímicas similares. La presencia del pozo P-Te-11 en el conglomerado se alude a las características de la zona donde se ubica este punto, en ella se generan abatimientos que han provocado un descenso marcado de los niveles freáticos (>60 m) volviéndola una zona de descarga por sobre explotación, cuyo efecto ha generado que la hidroquímica en esta zona presente características similares a la zona de descarga natural del acuífero.

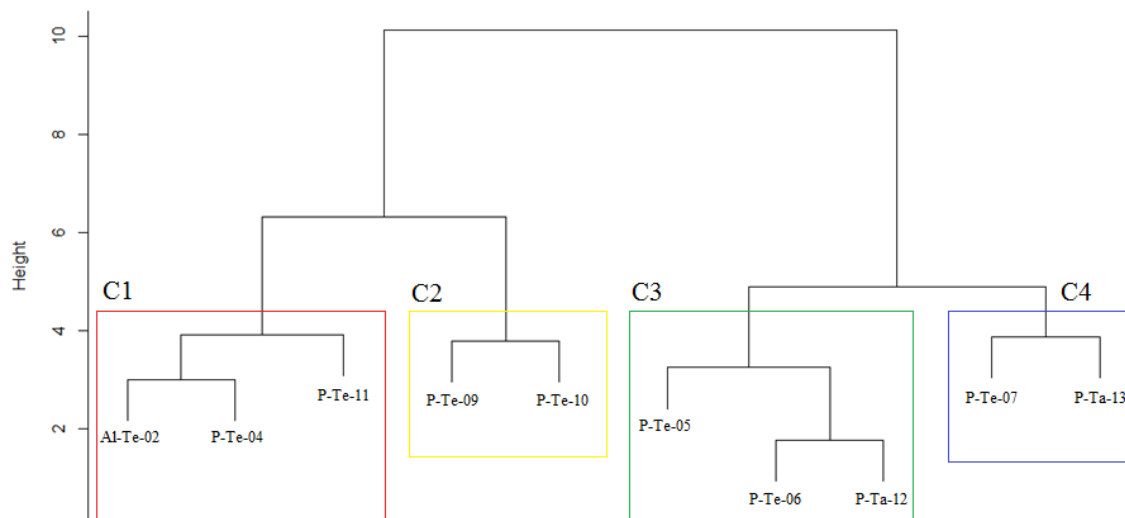


Figura 7.19. Dendrograma HCA modo-Q muestreo julio

El segundo clúster (C2) agrupa pozos que se encuentran cercanos uno del otro ubicados en la zona N de la cuenca, la cual se cataloga como zona mixta de recarga y descarga dada la gran cantidad de captaciones que se encuentran en la zona, que han generado abatimientos de gran importancia que ocasionan la modificación de la hidroquímica de la zona de bicarbonatada – sulfatada (P-Te-09) a sulfatada – bicarbonatada (P-Te-10), por los fenómenos de transporte e interacción acelerada que presenta el agua en dicha zona.

Se encontró un tercer conglomerado (C3), asociado a pozos que situados en la cuenca media, en la que se presenta la zona de tránsito entre la zona de recarga ubicada al N o NE y la zona de descarga ubicada al S de la cuenca, por ende las muestras de agua extraídas de dichos pozos son de tipo bicarbonatado, que demuestran un origen meteórico con un tiempo de tránsito que les ha permitido enriquecerse del ión Sodio por procesos de intercambio catiónico.

Por último, un conglomerado C4 se presenta en el análisis, relacionando pozos cercanos a la zona de recarga ricos en iones Ca y Mg y HCO_3^- que están iniciando procesos de interacción con la matriz sedimentaria lo cual ha permitido la ganancia de iones SO_4^{2-} .

7.3.5.3.1.2. Muestreo octubre/14

En la figura 7.20. se presentan el dendrograma en modo R. Este se dividió en 3 grandes agrupaciones que relacionan los principales fenómenos que intervienen en la hidroquímica del acuífero. En el conglomerado CA, se relacionan los iones mayoritarios los cuales caracterizan la hidroquímica del acuífero y por ende aluden a los fenómenos de intercambio catiónico inverso y la modificación en torno a la presencia de los aniones dominantes en el acuífero siguiendo la secuencia de Chevotareb (figura 7.2.). El conglomerado CA1, relaciona los iones bicarbonato y sodio, siendo estos originados por la recarga reciente de agua meteórica que se genera en el mes analizado y los procesos

de intercambio catiónico que se generan en la matriz sedimentaria del acuífero que permiten el enriquecimiento del ión sodio.

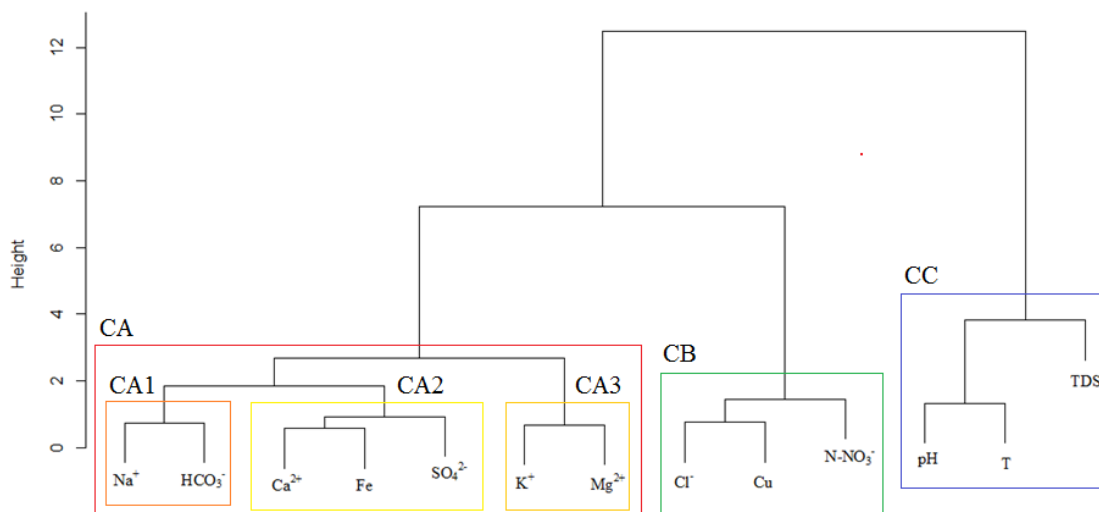


Figura 7.20. Dendrograma HCA modo-R muestreo octubre

El conglomerado CA2 se asocia con los iones secundarios que se presenta en la cuenca por infiltración vertical y lateral, así como la recarga de agua meteórica y de los efectos generados por los procesos de meteorización y disolución de los sedimentos presentes, que suscita un enriquecimiento de las concentraciones de dichos iones. Estos fenómenos responden a la presencia del Hierro en este clúster, dado su origen en los sedimentos del grupo guadalupe y obedeciendo a los procesos de dilución de minerales en el agua precipitada en la cuenca y su posterior infiltración y recarga en el acuífero, que genera un incremento en torno a la concentración de este metal desde la zona de recarga y disminuyendo el gradiente hacia la zona de descarga. También, se encuentra el clúster CA3, que agrupa los iones K⁺ y Mg²⁺, los cuales son los iones minoritarios que sufren procesos de intercambio catiónico lo que produce una reducción marcada de su concentración en el agua subterránea de la cuenca en este periodo húmedo.

Por otro lado, encontramos el clúster CB, en el cual se congregan los iones cloruro, nitrato y cobre, y al igual que en el análisis del mes de julio, este grupo presenta bajas concentraciones iónicas en todas las muestras analizadas, con un aumento en la concentración del ión nitrato y su presencia conjunta o aumento abrupto de la concentración de alguno de estos iones, sería indicador de impacto antrópico. Por último, el conglomerado CC, al igual que en el mes de julio, relaciona los parámetros *in situ* y su marcada influencia sobre el comportamiento hidroquímico del agua subterránea presente en la cuenca estudiada.

Por otro lado, el HCA modo-Q resulta en el dendrograma se presenta en la Figura 7.21. La agrupación C1 reúne a los pozos cuyas características fisicoquímicas y ubicación geográfica los cataloga como puntos que presentan aguas en fase transicional con rumbo a la zona de descarga de la cuenca estudiada. El subclúster C1A muestra los pozos

ubicados en la zona de descarga Al-Te-02 y P-Te-04 y una estrecha relación con el P-Te-09, producto de la similitud en términos fisicoquímicos que presenta el agua extraída de este pozo a aguas más evolucionadas (i.e. aguas con mayor tiempo de tránsito), causado por varios factores tales como la interacción del agua con la matriz sedimentaria y el efecto del ser humano y de las actividades económicas que se originan en el área.

El clúster C1B, agrupa los pozos P-Te-10 y P-Te-11, que se encuentran contiguos uno del otro, caracterizados por ser aguas de transición y evolución media, que presentan la mayor concentración de N-NO_3^- para la cuenca media del río Chicú, producto de las actividades agrícolas que se generan en los predios que explotan el acuífero y sus alrededores.

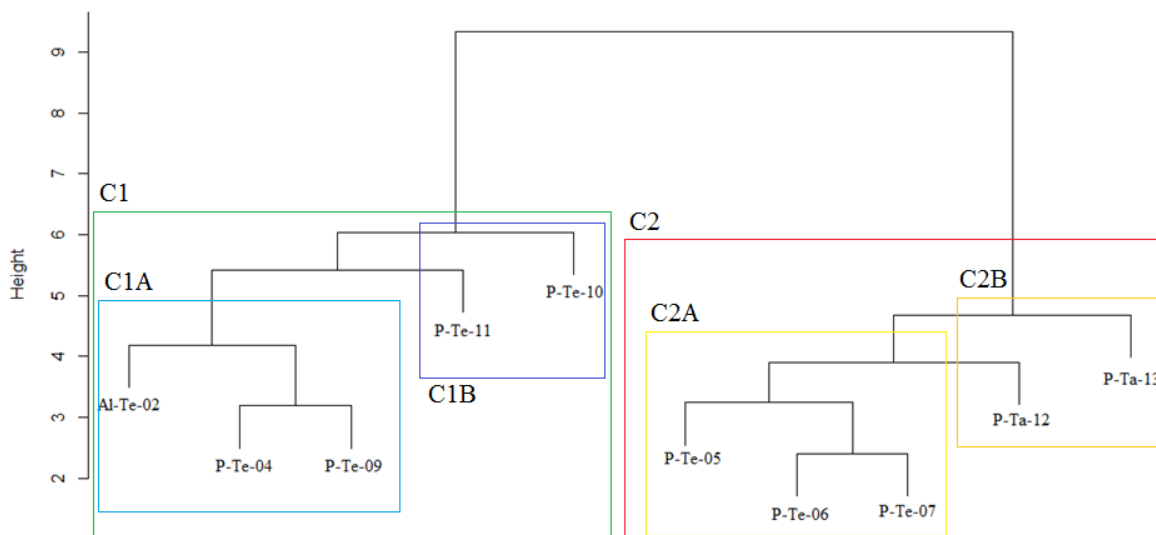


Figura 7.21. Dendrograma HCA modo-Q muestreo octubre

La agrupación C2 reúne las muestras de agua ubicadas en la cuenca media alta con poco grado de evolución dado que son producto de recarga tanto vertical como lateral con un grado de impacto antrópico leve. La agrupación C2A, reúne a puntos de muestreo cercanos a la zona de recarga N y NE cuyas aguas presentan un corto tiempo de interacción con los sedimentos del acuífero, no obstante por las actividades agrícolas que se presenta como uso de suelo en la zona, presentan impacto leve en términos de los parámetros analizados (2.4 mg $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$ P-Te-05; 2.3 mg $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$ P-Te-06). La presencia del pozo P-Te-05 en esta asociación es generada por la cercanía de este a la zona de recarga ubicada al N de la cuenca. Por último, la agrupación C2B reúne los pozos que se encuentran en zonas de recarga cuyas características fisicoquímicas permiten decir que son los pozos con menor impacto.

7.3.5.3.2. Análisis de componentes principales

7.3.5.3.2.1. Muestreo julio/14

La extracción de los factores fue realizada a través de componentes principales. Los datos de concentración de Cobre no fueron tenidos en cuenta en el análisis, debido que tras previas determinaciones, las cargas obtenidas por este parámetro fisicoquímico frente a las componentes principales eran bajas (i.e. $-0.5 \leq x \leq 0.5$). La tabla 7.12. presenta los valores propios (eigenvalues) y la varianza acumulada de cada factor; la figura 7.22. exhibe una gráfica con los sucesivos valores propios, donde los primeros tres factores comunes explican el 82.90% del total de la varianza. La tabla 7.13. indica las cargas de cada variable fisicoquímica analizada en cada factor, teniendo en cuenta para las variables analizadas que todas presentan valores altos (i.e. $x > |0.5|$) lo que genera una única contribución a la discriminación de los procesos que controlan la hidroquímica del agua subterránea en el área y el porcentaje de la varianza total contabilizada en cada factor del modelo de 3 componentes principales. Estas cargas representan la importancia de las variables para los componentes, debido que al maximizar la varianza implica maximizar el rango de las cargas, por lo cual estas tienden a ser extremadamente positivas o negativas o cercanas a cero (Davis, 2002).

Tabla 7.12. Valores propios y varianza acumulada para cada factor

Factor	Valor Propio	Varianza Acumulada
1	5.41	0.45
2	2.57	0.67
3	1.95	0.83
4	0.94	0.91
5	0.64	0.96
6	0.27	0.98
7	0.11	0.99
8	0.06	0.99
9	0.01	1.00

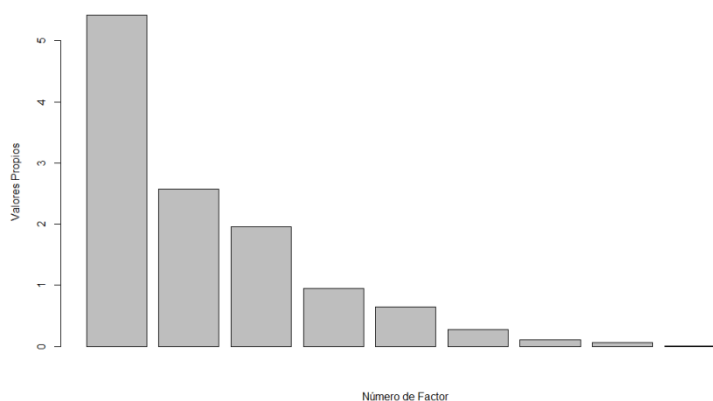
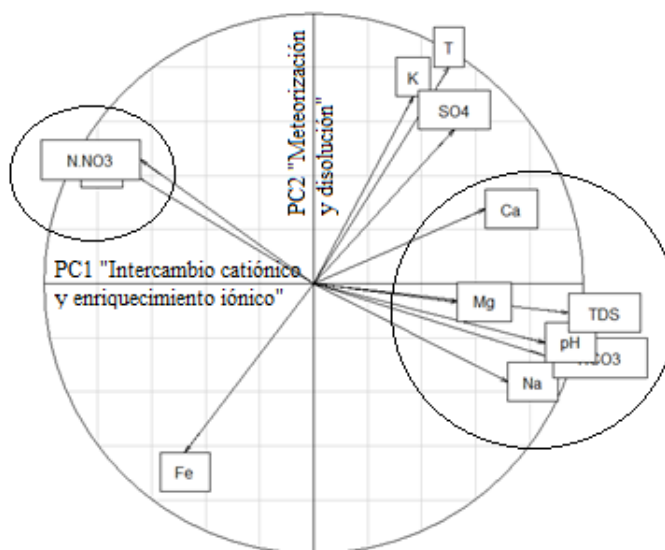


Figura 7.22. Gráfico de valores propios

El primer factor (PC1) explica el 45.13% del total de la varianza, presentando en este una fuerte asociación con cargas positivas (> 0.6) de las variables Na^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- , pH y TDS y asociación a cargas negativas (< -0.6) de las variables Cl^- y N-NO_3^- mostrando que este factor (figura 7.23) representa el intercambio catiónico que se desarrolla en la matriz sedimentaria del acuífero estudiado y la influencia que presenta el pH en dicho proceso, lo que provoca un aumento de los sólidos disueltos presentes en el agua subterránea a medida que esta transita a lo largo de la matriz sedimentaria, a su vez se considera la presencia de los aniones Cl^- y N-NO_3^- que se relacionan al enriquecimiento iónico, no obstante su comportamiento se separa de las demás variables presentes en esta componente dada su baja concentración respecto a las demás, lo que permite una posible utilización de estas como indicadores de impacto antrópico.

El segundo factor (PC2) explica el 21.49% del total de la varianza, el cual presenta una fuerte asociación con el Potasio y la temperatura (carga > 0.6) y el Hierro (carga < -0.6), representando un complemento al intercambio catiónico y a los procesos de enriquecimiento iónico por interacción entre la matriz sedimentaria y el agua meteórica que se recarga al acuífero, procesos en los cuales la temperatura juega un papel importante dado que, desde el intercambio catiónico menores temperaturas facilitan los procesos de intercambio que generan la adsorción de iones tales como el potasio; a su vez en los procesos de meteorización y dilución de sedimentos, a mayor temperatura del agua mayor es la capacidad de esta para meteorizar y diluir los minerales con los que interacciona generando un enriquecimiento por ejemplo del Hierro como ión (Fe^{2+}).



Muestreo de Agua més Julio - Círculo de correlaciones PC1 - PC2

Figura 7.23. Diagrama de dispersión PC1: PC2

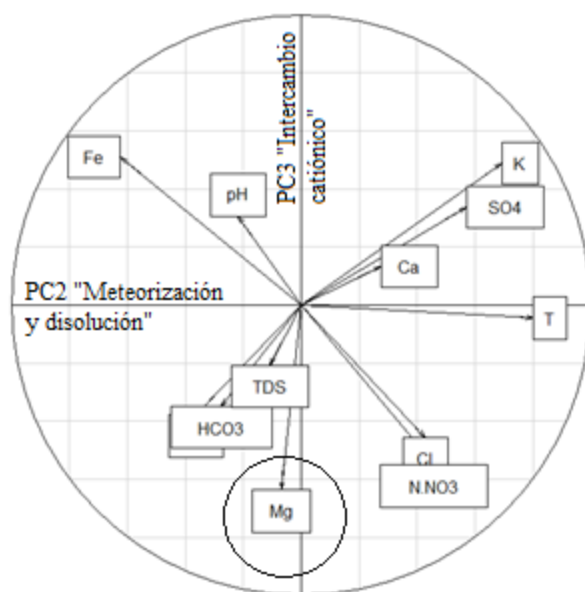
Asimismo, la presencia del tercer factor (PC3) el cual se define por la variable Mg^{2+} , se relaciona como complemento al PC1 respecto al intercambio catiónico del que este ión hace parte, y es posible relacionarlo con los iones bicarbonato (figura 7.24) y los procesos de disolución de minerales mediados por la presencia del ácido carbónico (Ec. 7.3.). Por último, pero no menos importante se observa el ión SO_4^{2-} , cuyos pesos (≈ 0.5) se reparten entre el PC1 y PC2, característica originada por el comportamiento que presenta este ión en la cuenca en términos espaciales, en zonas de recarga presenta baja concentración y gradualmente un aumento a medida que el agua transita por el acuífero, lo cual provoca que su presencia se deba a procesos de meteorización y disolución de la matriz sedimentaria presente en el acuífero, mediada por las variables pH y T presentes en los PC1 y PC2.

La figura 7.25. a y b muestra los valores de las tres componentes principales analizadas, los cuales representan la influencia de estas en el comportamiento de las muestras de agua subterránea. En las figuras 7.25. c y d se observan las muestras agrupadas según sus facies hidroquímicas obtenidas en el gráfico 7.8a, evidenciando la evolución y modificación hidroquímica de esta a lo largo del acuífero por intercambio catiónico (PC1 y PC3) y meteorización y disolución de sedimentos (PC2). Se manifiesta que el grupo G4, el cual congrega los pozos con facie bicarbonatada sódica presenta la mayor relación con el

PC1 dado los procesos de intercambio catiónico que presentaron las aguas, provocando el enriquecimiento de estas con el ión Na^+ , por otro lado se observa el grupo G2 que agrupa los pozos con facie Clorurada y/o sulfatada sódica, el cual presenta una fuerte relación con el PC2 al ser aguas con mayor tránsito de la cuenca, provocando que estas presenten procesos de meteorización y disolución de los sedimentos, generando un enriquecimiento de iones; a su vez dichos procesos de meteorización generan un aumento en el área superficial de las arcillas presentes en la matriz sedimentaria, lo cual acrecenta el intercambio catiónico, explicando la gran relación de este grupo con los PC1 y PC3.

Tabla 7.13. Matriz de coordenadas Varimax

Variables	PC1	PC2	PC3
Na^+	0.72	-0.36	-0.38
K^+	0.37	0.69	0.48
Ca^{2+}	0.64	0.27	0.13
Mg^{2+}	0.53	0.07	-0.64
HCO_3^-	0.89	-0.28	-0.35
SO_4^{2-}	0.52	0.57	0.33
Cl^-	-0.71	0.43	-0.45
N-NO_3^-	-0.64	0.46	-0.55
pH	0.86	-0.22	0.31
T	0.50	0.80	-0.04
TDS	0.94	-0.11	-0.21
Fe	-0.47	-0.62	0.51
%Varianza	45.13	21.49	16.28



Muestreo de Agua més Julio - Círculo de correlaciones PC2 - PC3

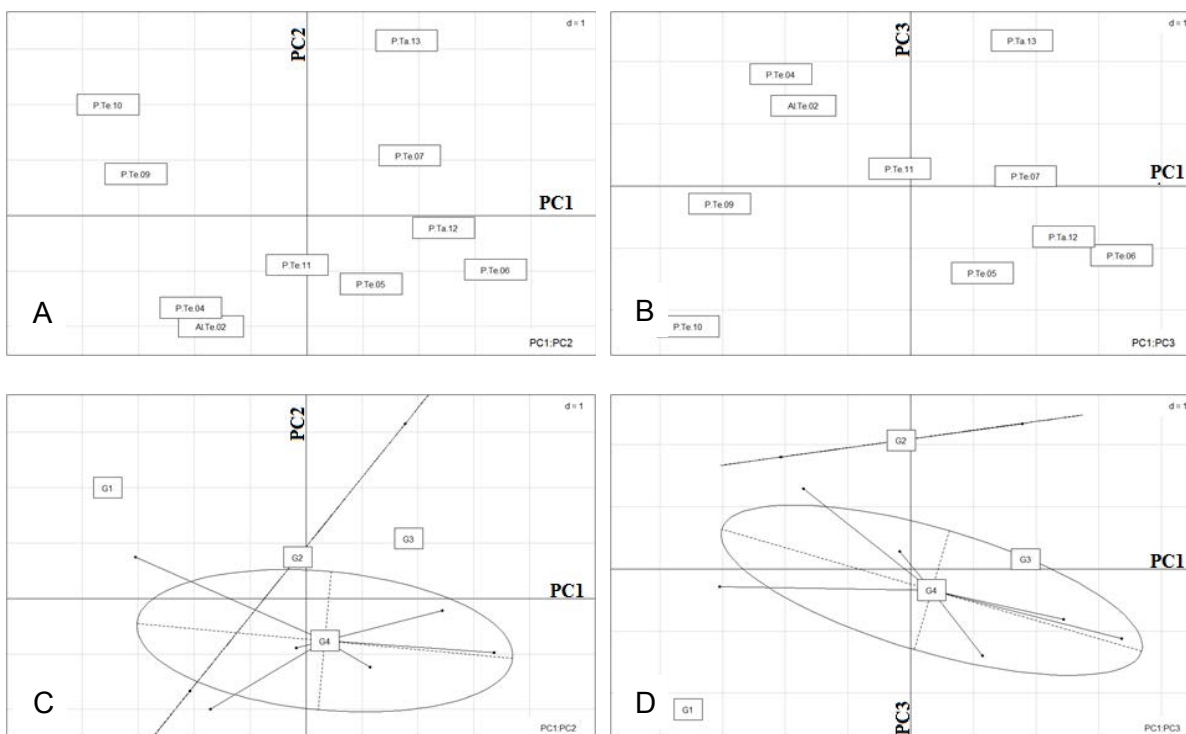
Figura 7.24. Diagrama de dispersión PC2: PC3

El grupo G1, que reúne aguas con facie Sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica se asocian al PC2, dado que estas facies se encuentran en la zona de tránsito de la matriz sedimentaria y su interacción con estos conllevan a procesos de enriquecimiento iónico, a su vez el grupo G3 al que pertenecen muestras de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica, presenta una relación mayoritaria con el PC1 al ser aguas de recarga con tránsito corto, los cuales han iniciado los procesos de interacción con los sedimentos y por ende intercambio catiónico y enriquecimiento iónico.

Las figuras 7.25. e y f presentan los valores de las tres componentes principales analizadas, en las cuales se enseñan las muestras de agua asociadas según los respectivos resultados del análisis HCA modo Q (figura 7.19.). En estas graficas se encuentran repartidos los conglomerados en los 4 sectores del análisis de componentes principales; el clúster C4 ubicado en el cuadrante I, se relaciona a las 3 componentes

principales producto que en este grupo se agrupan muestras de agua con tiempo corto de residencia en el acuífero, dada su ubicación en zona de recarga y se presume que las aguas que son extraídas de estos pozos son aguas de origen meteórico recientemente recargadas, con gran capacidad de disolución de minerales (i.e. enriquecimiento iónico) que permiten generar procesos de intercambio catiónico.

El conglomerado C3 ubicado en el cuadrante II, relaciona muestras de agua que han transitado por el acuífero, dado que son extraídas en la cuenca media del río Chicú, por lo cual presentan mayor grado de evolución en comparación al conglomerado C4, por lo que los procesos de intercambio catiónico (PC1) son los que priman en la hidroquímica de estas aguas. En adición, se encuentra la agrupación C2 cuya ubicación en el diagrama de componentes principales se correlaciona con la ubicación de los iones Cl^- y N-NO_3^- , los cuales varían entre los cuadrantes III y IV (figuras 7.25. e y f), mostrando la fuerte relación de estos puntos de muestreo al PC1; este comportamiento puede ser explicado por la región donde se extrae las muestras de caracter mixto, dado que en esta se produce la recarga del acuífero, empero por la gran explotación del recurso hídrico que se genera en la zona, esta se comporta como zona de descarga con gran presión antrópica debido a las actividades agrícolas que se generan en la superficie, lo cual puede ocasionar impacto al recurso hídrico en términos de cantidad y calidad provista por su relación con variables indicadoras de contaminación.



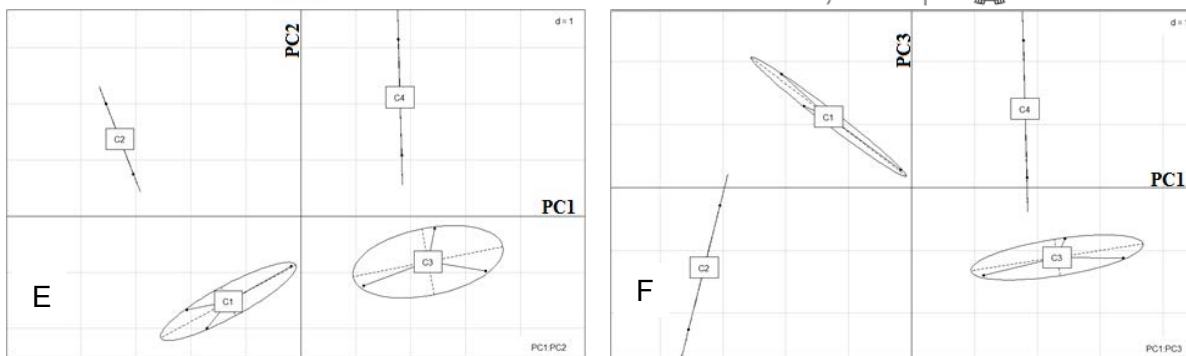


Figura 7.25. Grafica de componentes principales modo Q; a)Diagrama de dispersión PCA1: PCA2; b) Diagrama de dispersión PCA1: PCA3; c)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA2 modo Q; d)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA3 modo Q; e)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA2; f)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA3

Por último se encuentra el aglomerado C1, el cual relaciona los puntos de muestreo presentes en la zona de descarga, asociados con procesos de enriquecimiento iónico (PC2) por su avanzado tiempo de tránsito en la cuenca, por lo cual se deduce un gran desarrollo en los procesos de meteorización - disolución de minerales e intercambio catiónico y por lo tanto, una facie hidroquímica rica en sodio y sulfatos, según lo predicho por la secuencia de Chevotareb.

7.3.5.3.2.2. Muestreo octubre/14

La extracción de los factores fue realizada a través de componentes principales. Los datos de concentración de Cobre (Cu) no fueron tenidos en cuenta en el análisis debido que tras previas determinaciones las cargas obtenidas por este parámetro fisicoquímico frente a las componentes principales presentaban un valor bajo (i.e. $-0.5 \leq x \leq 0.5$). La tabla 7.14. muestra los valores propios (eigenvalues) y la varianza acumulada de cada factor.

Tabla 7.14. Valores propios y varianza acumulada para cada factor

Factor	Valor Propio	Varianza Acumulada
1	4.75	0.43
2	1.95	0.60
3	1.40	0.74
4	0.92	0.82
5	0.74	0.88
6	0.66	0.94
7	0.44	0.99
8	0.07	0.99
9	0.05	1.00

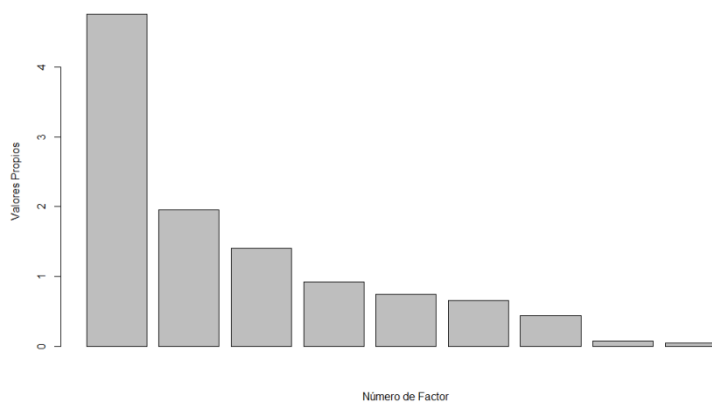


Figura 7.26. Gráfico de valores propios

La figura 7.26. exhibe una gráfica con los sucesivos valores propios. Los primeros tres factores comunes explican el 73.70% del total de la varianza. La tabla 7.15 muestra las cargas de cada variable fisicoquímica analizada en cada factor, teniendo en cuenta que las cargas de todas las variables analizadas presentaran valores altos (i.e. $x > |0.5|$) lo que genera una única contribución a la discriminación de los procesos que controlan la hidroquímica del agua subterránea en el área, y el porcentaje de la varianza total contabilizada en cada factor del modelo de 3 componentes principales.

Tabla 7.15. Matriz de coordenadas Varimax

Variables	PC1	PC2	PC3
Na ⁺	-0.66	-0.25	0.36
Ca ²⁺	-0.78	0.01	-0.00
Mg ²⁺	-0.63	-0.00	0.41
HCO ₃ ⁻	-0.95	-0.05	0.29
SO ₄ ²⁻	-0.30	-0.57	-0.47
Cl ⁻	<u>0.74</u>	-0.24	0.43
N-NO ₃ ⁻	0.07	<u>0.61</u>	0.51
pH	-0.68	0.31	-0.56
T	-0.14	-0.78	0.15
TDS	-0.95	-0.22	0.15
Fe	-0.60	0.58	-0.07
%Varianza	43.21	17.72	12.77

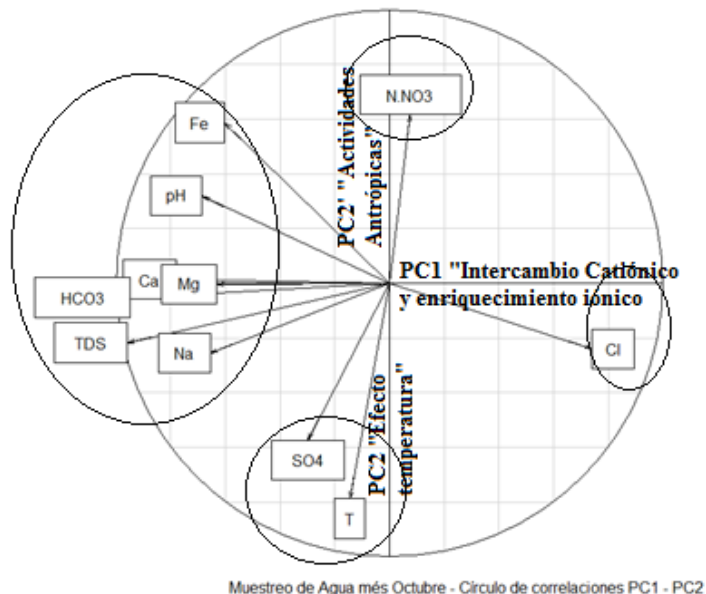
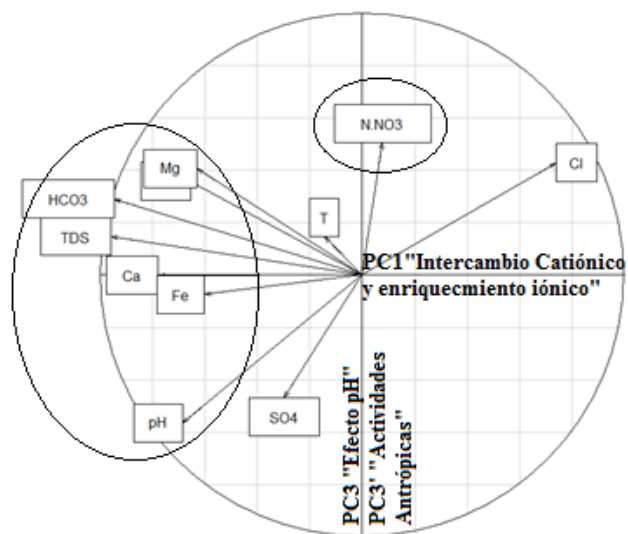


Figura 7.27. Diagrama de dispersión PC1: PC2

El primer factor (PC1) explica el 43.21% del total de la varianza, presentando en este una fuerte asociación con cargas negativas (< -0.6) de los cationes Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Fe, el anión HCO₃⁻ y los parámetros pH y TDS asociados a los procesos de intercambio catiónico y enriquecimiento iónico (Figura 7.27.). A su vez, presenta una fuerte relación positiva (>0.7) al ión cloro, que puede ser explicada por la baja concentración que presenta este ión en comparación con los demás iones mayoritarios y a su vez, esta característica genera que dicho ión pueda ser considerado como indicador de contaminación dado que su enriquecimiento en la cuenca sería explicado por la presencia de otro tipo de fuentes exceptuando las naturales.

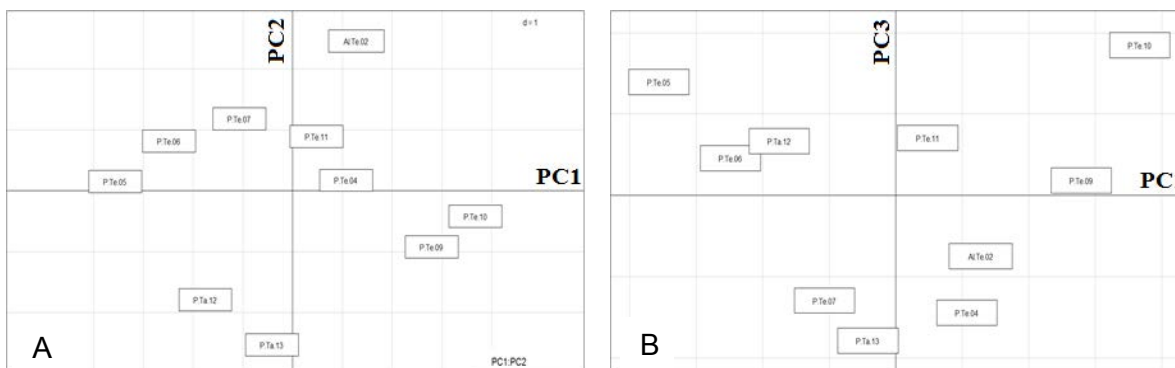
El segundo factor (PC2) explica el 17.72% del total de la varianza, presentando una fuerte asociación con la T (carga $< \approx -0.7$) reflejando la influencia de esta en los procesos de meteorización y disolución de los minerales presentes en la matriz sedimentaria del acuífero que provocan el aumento en la concentración de sólidos en disolución. A su vez, la presencia de una relación positiva del PC2 (carga > 0.5) con el ion $N-NO_3^-$ manifiesta los efectos que sufre el acuífero respecto a la ganancia y enriquecimiento de estos iones por efectos antrópicos que suprayacen el acuífero estudiado. Por último, el tercer factor (PC3), representa el 12.77% de la varianza, se asocia al parámetro pH (carga < -0.5) y al anión $N-NO_3^-$ (carga > 0.5), el primero relacionado el efecto marcado que presenta el pH en los fenómenos de meteorización, disolución de minerales e intercambio catiónico que sufre el agua subterránea a lo largo de su tránsito por el acuífero en estudio (Figura 7.28.).



Muestreo de Agua mes Octubre - Círculo de correlaciones PC1 - PC3

Figura 7.28. Diagrama de dispersión PC1: PC3

El anión SO_4^{2-} presenta una carga ≈ 0.5 asociada a los componentes PC2 y PC3 cuyo comportamiento puede responder al origen que pueden presentar este ion en el agua, dado el proceso natural de enriquecimiento iónico por la evolución del agua a su paso por la matriz sedimentaria del acuífero ayudado por la influencia de la temperatura y pH (i.e. mediación acida) la cual permite que los procesos de disolución mineral en el acuífero sea más eficiente.



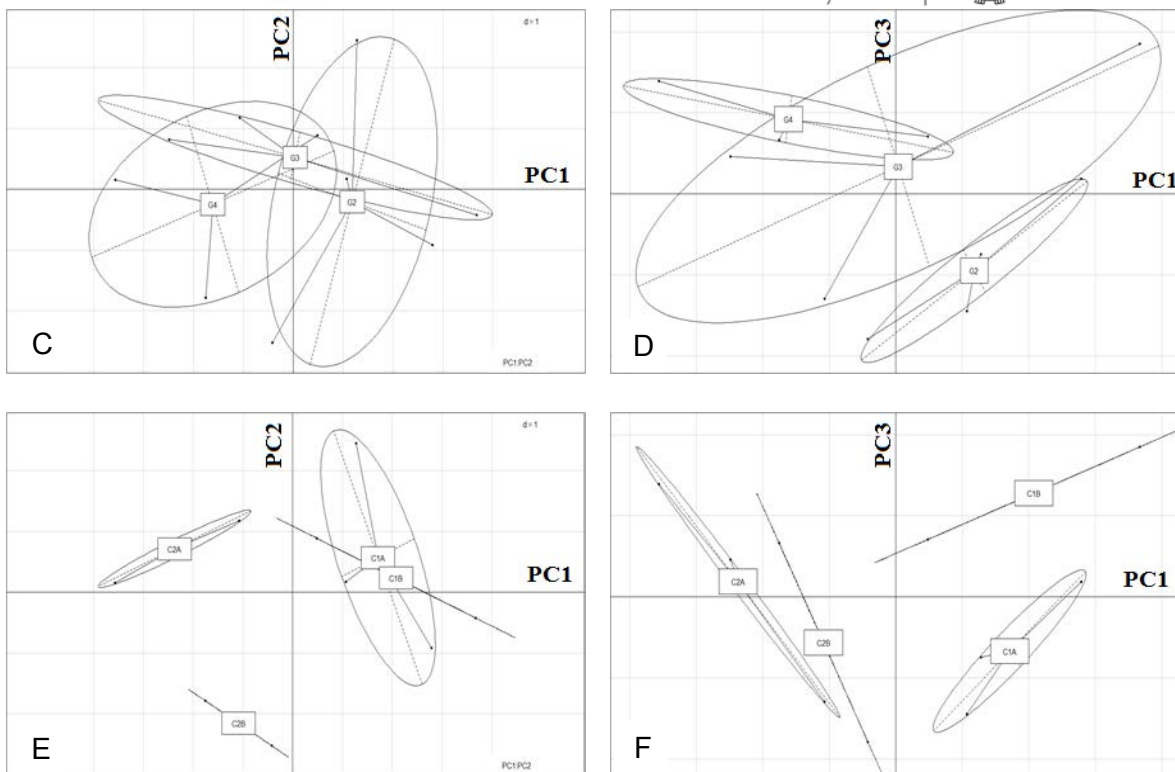


Figura 7.29. Grafica de componentes principales modo Q; a)Diagrama de dispersión PCA1: PCA2; b) Diagrama de dispersión PCA1: PCA3; c)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA2 modo Q; d)Agrupación según facies químicas PCA1: PCA3 modo Q; e)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA2; f)Agrupación según conglomerados HCA modo Q PCA1: PCA3

La figura 7.29. a y b muestra los valores de las tres componentes principales analizadas, los cuales representan la influencia de estas en el comportamiento de las muestras de agua subterránea. En las figuras 7.29. c y d se observan las muestras de agua agrupadas según sus facies hidroquímicas y su comportamiento frente a las componentes principales analizadas.

Se evidencia la evolución de las muestras dependiendo de su zona de extracción (i.e. recarga, tránsito y descarga) influenciado por los procesos de intercambio iónico, meteorización y disolución de minerales (PC1 y PC2), donde los grupos de facies más influenciados son los pertenecientes a la agrupación G4 (facie Bicarbonatada sódica), que al ser muestras de agua extraídas en la cuenca media manifiestan un grado de evolución que ha permitido auspiciar los procesos de meteorización y disolución de minerales, lo cual trae consigo el favorecimiento de los procesos de intercambio catiónico, generando que dichas aguas sean ricas en iones sodio y manifiesten un aumento progresivo en la presencia de TDS. Al continuar a lo largo del PC1, se observa la agrupación G3 (facies bicarbonatada cálcica y/o magnésica), la cual congrega muestras de agua en zona de recarga, que presentan una concentración mínima de iones y gran capacidad de solubilidad, lo que permite que las transformaciones hidroquímicas que trae consigo la interacción con la matriz sedimentaria sean más eficientes.

A partir de dicha interacción, estas muestras han iniciado un enriquecimiento iónico y por lo tanto su hidroquímica ha iniciado una transformación siguiendo la secuencia de Chevotareb; a su vez este grupo presenta la mayor relación con el PC3, dada su ubicación en la cuenca, producto que sobre esta zona suprayace gran cantidad de actividades antrópicas (e.g. ganadería y agricultura), que originan gran presión sobre el recurso hídrico y a su vez puede ser traducido como el inicio del enriquecimiento de estas aguas por iones nitrato. Por último el G2 concentra aguas evolucionadas con un tiempo de tránsito mayor no presentando una fuerte relación con el PC1, no obstante con relación al PC2 y PC3 se advierte una marcada correspondencia dado que el agua presente en esta zona se encuentra en fase de enriquecimiento iónico favorecido por las condiciones de T y pH (PC2 y PC3) lo que suscita una modificación en la hidroquímica de la zona pasando de ser aguas bicarbonatadas (zona de recarga) a sulfatadas (zona de descarga).

Las figuras 7.29. e y f presentan los valores de las tres componentes principales analizadas en las cuales las muestras de agua reflejan su comportamiento, siendo categorizadas según los respectivos conglomerados definidos anteriormente a través del HCA modo Q (figura 7.21.). Se observa una división entre los clúster C1 y C2 a lo largo del PC1, dado su origen y características particulares; el primero agrupa aguas en zona de tránsito con rumbo a la zona de descarga y el segundo, una agrupación de muestras de agua ubicadas en la cuenca media alta con escasa evolución en la matriz sedimentaria del acuífero, al ser producto de recarga tanto vertical como lateral que presentan un grado leve de impacto antrópico.

Al analizar el comportamiento del clúster C1, se observa sus respectivas subdivisiones (C1A y C1B) ubicadas en el cuadrante I (figura 7.29. e) y en cuadrante I y II (figura 7.29. f). Este proceder se explica por el origen y el comportamiento hidroquímico que las caracteriza y las variables que se asocian a las componentes principales analizadas. Los subclúster C1A y C1B se relacionan a aguas que han sufrido un proceso evolutivo a lo largo de su tránsito por los sedimentos Sabana y Chía, que ha generado que estas presenten un avanzado grado de intercambio catiónico, con lo cual la manifestación del ión Sodio es dominante, por ende su relación con el PC1 no es marcada. No obstante por los procesos evolutivos ya mencionados, su relación en torno a los PC2 y PC3 es evidente, debido que las actividades antrópicas que suprayacen el acuífero estudiado afectan la hidroquímica de las muestras estudiadas. El clúster C1A presenta la menor relación con los PC2 y PC3, al no encontrarse tan fuertemente impactadas por las actividades económicas que se desarrollan como uso de suelo en la zona por los sedimentos arcillosos que retienen y limitan la recarga vertical en esta zona. Por su parte, el subclúster C1B contrario a lo anteriormente mencionado, presenta fuerte relación con los PC2 y PC3, dado que este clúster agrupa los pozos con la mayor concentración de ión N-NO_3^- , y por ende concentra los puntos de muestreo con mayor impacto antrópico en la cuenca estudiada (PC3).

Por otro lado, las divisiones del clúster C2: C2A y C2B se agrupan en los cuadrantes III y IV, respectivamente (figuras 7.29. e y f). Su gran afinidad con el PC1 es producto de su

reciente recarga al acuífero, lo que genera que los procesos de intercambio catiónico y enriquecimiento iónico sean acelerados en términos de cinética química. En torno al PC2 y PC3, se observa una división en esta agrupación, el subclúster C2A no se corresponde con estas componentes principales dado que las aguas que este agrupa, se encuentran en zonas de recarga N y NE de la cuenca, las cuales presenta un corto tiempo de interacción con los sedimentos del acuífero y por lo tanto el efecto de las actividades antrópicas y su impacto también es leve. Por otro lado, el C2B presenta una fuerte correlación con el PC2 y PC3 en su zona negativa dado que en su tránsito por la matriz sedimentaria ha iniciado los procesos de enriquecimiento iónico en el cual se ha generado un enriquecimiento de los iones sulfato siguiendo la secuencia de Chevotareb.

CAPÍTULO 8. HIDROGEOQUÍMICA II

- 8. HIDROGEOQUÍMICA II
 - 8.1. METODOLOGÍA
 - 8.2. MARCO TEÓRICO
 - 8.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL
PARA LAS VARIABLES
FISICOQUÍMICAS



8. HIDROGEOQUÍMICA II

8.1. METODOLOGÍA

Se tomaron los datos fisicoquímicos obtenidos en las campañas de muestreo de agua subterránea del acuífero de sedimentos del cuaternario – neógeno realizadas en los meses de julio y octubre del 2014, y con base en esta información se realizaron mapas de variación hidrogeoquímica para cada variable fisicoquímica determinada, con el fin de realizar la comparación entre los comportamientos que presenta la cuenca en dos estaciones hidrológicas diferentes (i.e. lluvia – sequía).

Para ello se ingresó la información en ArcGis® 9.3, y empleando la librería Geostatistical Wizard se generaron los mapas de isoconcentración a través del uso de la técnica geoestadística denominada Kriging y su variante el Kriging Ordinario en modo esférico. A su vez, para demostrar si existen diferencias entre las variables hidroquímicas determinadas entre los dos periodos de muestreo, se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney; para ello se empleó el programa R® y la librería psych (Revelle, 2013); no se tuvo en cuenta para la elaboración de estos mapas el elemento Pb y Cl⁻, dado que las concentraciones para los meses estudiados presentan concentraciones homogéneas menores a 0.5 mg/L.

Por otra parte, con el fin de evidenciar las facies hidroquímicas y su distribución espacial en el acuífero estudiado, se realizaron los gráficos de Stiff con ayuda del programa AquaChem® 2011.1 y representados gráficamente usando el ArcGis® 9.3.

8.2. MARCO TEÓRICO

8.2.1. KRIGING

Kriging es una técnica de interpolación, la cual incorpora la dependencia espacial y el factor de proximidad en la predicción de una variable regionalizada. En kriging, el valor de la variable desconocida $Z(x)$, es interpolada como función de la localización geográfica, x , como una ubicación sin observar usando valores medidos de la variable en una ubicación cercana. El mejor estimador lineal es computado usando un modelo estocástico para la dependencia espacial; usualmente la dependencia espacial es especificada a través de un variograma o covarianza de los datos de la variable, siendo este un método muy similar a una regresión lineal múltiple aplicada a un contexto espacial, en donde las variables aleatorias $Z(x)$ funcionan como variables regresoras, y la variable aleatoria en el punto donde interesa la predicción, $Z(x_0)$, funge como la variable dependiente (Caballero, 2011; Yidana *et al*, 2010).

La metodología kriging ordinario se basa en la suposición de la estacionalidad intrínseca de los datos, y de la disponibilidad de suficientes datos para realizar un modelo de autocorrelación espacial. Propone que el valor de la variable en el sitio no muestreado

puede predecirse como una combinación lineal de las n variables aleatorias. Su propiedades son: estimadores/predictores insesgados, honor a los datos medidos/observados, y que son los mejores estimativos del parámetro si las suposiciones declaradas anteriormente son válidas. La confiabilidad de la predicción del kriging ordinario se incrementa con el incremento de la densidad del muestreo, y de la distribución uniforme de los datos medidos (i.e. distribución normal).

La predicción del parámetro regionalizado en una ubicación x usando datos medidos del mismo parámetro se basa en la proximidad de los valores obtenidos en esta localización, y el número de mediciones locales próximas a esta. Las ubicaciones medidas cercanas tendrán una gran influencia a x , que los puntos lejanos. Esta relación se encuentra contenida en la ecuación 8.1.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^k \lambda_i Z(x_i) \quad \text{Ec. 8.1.}$$

Donde $Z(x_i)$ es la medida del parámetro en cuestión en la localización i , λ_i representan los pesos o ponderaciones de los valores de las variables en los sitios muestreados. Dichos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a llevar a cabo la correspondiente predicción. La suma de los pesos debe ser igual a uno para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable (Caballero, 2011).

Existen al menos 4 modelos de semivariogramas teóricos que pueden ser usados para medir la dependencia espacial o autocorrelación, dependiendo de la distribución de los datos. La selección es hecha basándose en el mejor modelo teórico basado en ensayo y error. En este estudio, el modelo de semivariograma esférico (Ecuación 8.2.) se ajustó mejor a los datos.

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h^3}{2a^3} \right) \right] \quad \text{para } h \leq a \\ \gamma(h) &= C \quad \text{para } h > a \end{aligned} \quad \text{Ec. 8.2.}$$

Donde C y a , son respectivamente definidas como la meseta (sill) y el rango del semivariograma de lag h (Yidana *et al*, 2010).

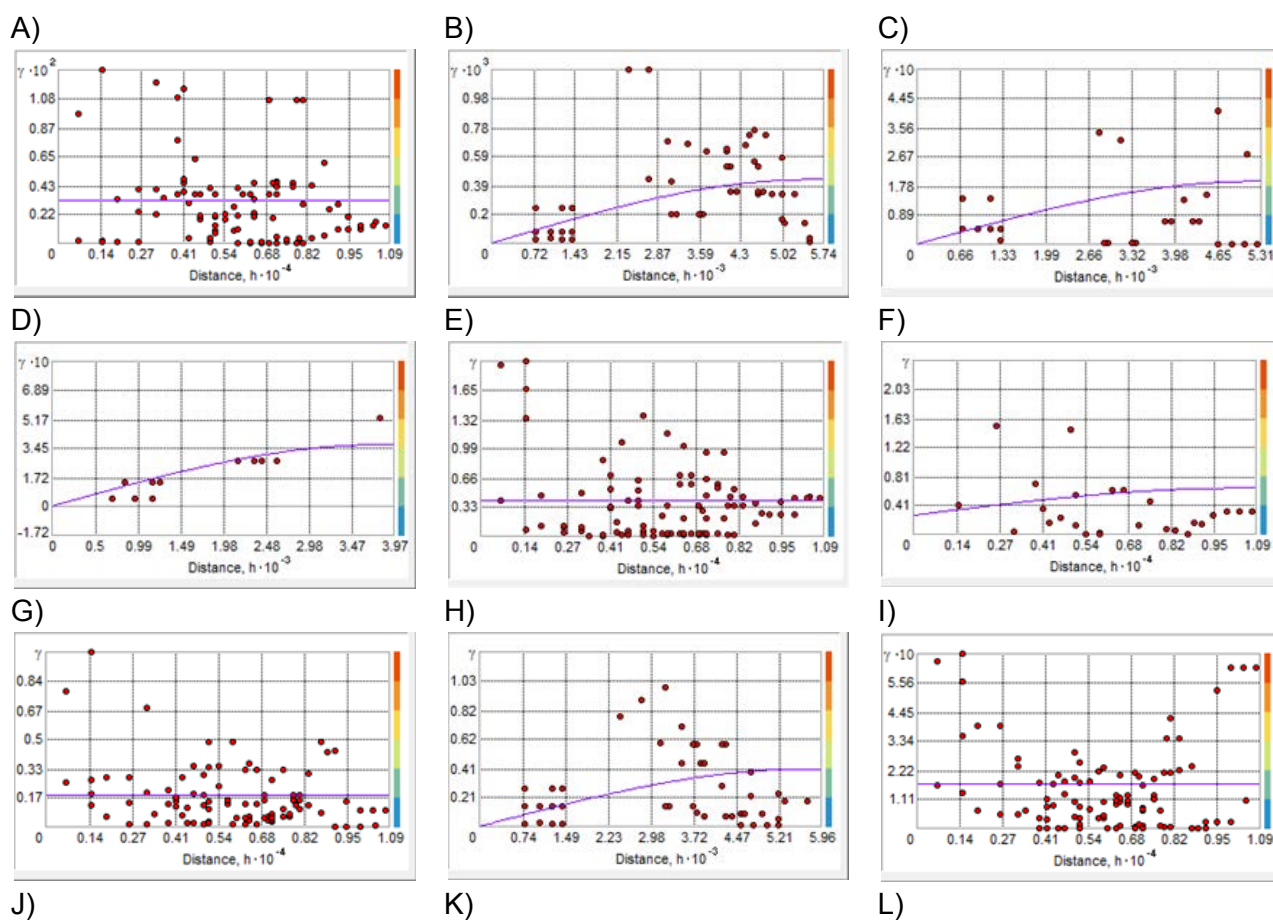
8.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL PARA LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS

La confección de los mapas de distribución de los diferentes parámetros es uno de los principales procedimientos de representación para la interpretación de las características físico-químicas del agua, dado que permite reconocer las características básicas del comportamiento del sistema, así como la posibilidad que existan diferentes áreas con comportamiento hidrogeoquímico distinto (Renau, 2010). En los mapas realizados se

representa la variación espacial de las variables físicas y las concentraciones de los iones mayoritarios y minoritarios determinados en los muestreos realizados, con el fin de caracterizar los procesos anteriormente identificados (capítulo 7) y encontrar puntos críticos frente a los impactos antrópicos.

8.3.1. PARÁMETROS PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Con base en los datos obtenidos en los muestreos del mes de julio y octubre del año 2014, se generaron los semivariogramas experimentales de los datos y se ajustaron los variogramas teóricos, obteniendo los siguientes parámetros de ajuste (Tabla 8.1. y 8.2.). Los semivariogramas obtenidos y ajustados al modelo teórico esférico se observan en las figuras 8.1. y 8.2 y con base en estos se procedió a realizar la interpolación espacial de los datos a través del método de Kriging Ordinario, obteniendo los mapas de variación hidroquímica espacial de los parámetros fisicoquímicos analizados para la región en estudio (Planos 21 a 32).



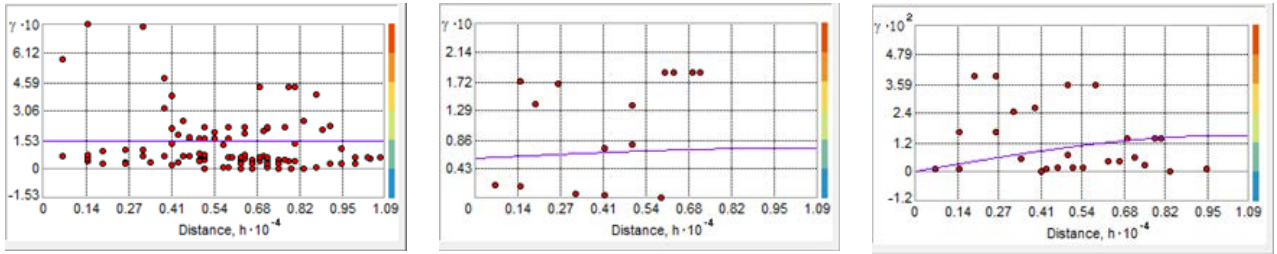


Figura 8.1. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de variación hidrogeoquímica julio/14: A) pH; B) T; C)TDS; D) Na⁺; E) K⁺; F)Ca²⁺; G) Mg²⁺; H) HCO₃⁻; I) SO₄²⁻; J) N-NO₃⁻; K) Fe; L) Cu

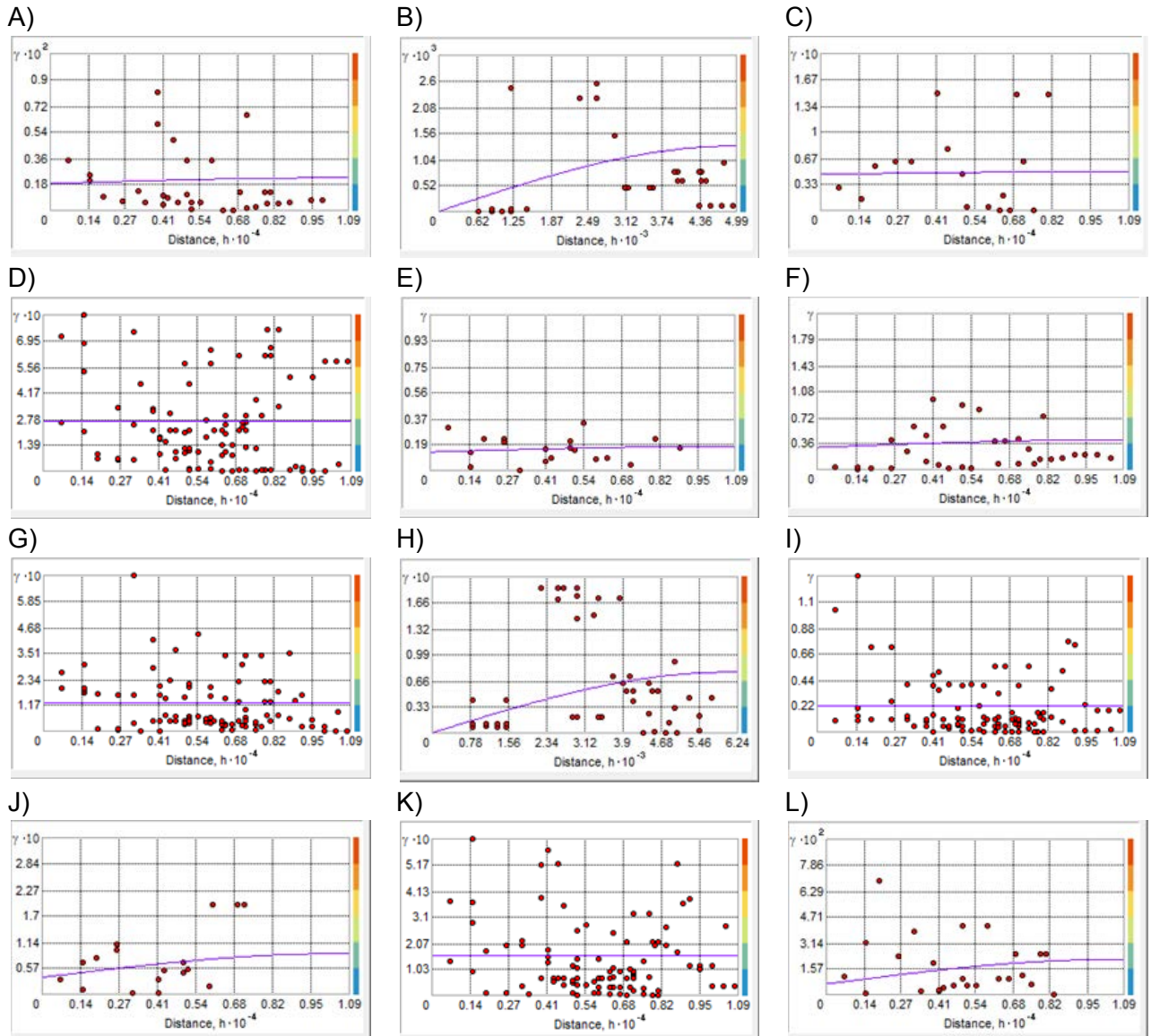


Figura 8.2. Semivariogramas experimentales y ajuste del modelo teórico para mapas de variación hidrogeoquímica octubre/14: A) pH; B) T; C)TDS; D) Na⁺; E) K⁺; F)Ca²⁺; G) Mg²⁺; H) HCO₃⁻; I) SO₄²⁻; J) N-NO₃⁻; K) Fe; L) Cu

A continuación se presentan los mapas de distribución de las variables fisicoquímicas estudiadas, donde se pueden advertir las diferencias de repartición de estas en términos espaciales y temporales.

8.3.2. EVOLUCIÓN DE LAS FACIES HIDROQUÍMICAS

En el plano 20 se puede observar la variabilidad de las facies Hidroquímicas en la cuenca. En general se encuentra que las facies bicarbonatadas se encuentran en las zonas de recarga ubicadas en el sector N y NW de la cuenca, sobre la falda de la serranía de Tabío - Tenjo. A su vez, se presentan facies sulfatadas bicarbonatadas en la zona plana de la cuenca, región donde se produce el tránsito de las aguas hacia la zona de descarga. El comportamiento específico de los pozos P-Te-09 y P-Te-10 cuyas facies oscilan entre sulfatadas y bicarbonatadas cálcicas a sódicas, es producto de los efectos de la sobreexplotación de agua y modificación del régimen hídrico que se produce sobre la zona.

El aumento de la concentración de iones sobre los pozos P-Te-06, P-Te-11, P-Ta-12 y P-Ta-13 (facies bicarbonatadas sulfatadas sódicas), es efecto de la dirección de flujo del agua subterránea que genera sobre la zona una acumulación y tránsito lento del agua, ocasionando que está presente un mayor tiempo de contacto con la matriz sedimentaria que conforma el acuífero, permitiendo que los procesos de intercambio catiónico y enriquecimiento iónico se produzcan con mayor facilidad.

Sobre el pozo P-Te-05, su comportamiento hidroquímico es producto de la mezcla de aguas de recarga que se producen en las cercanías (P-Te-07) con aguas de mayor recorrido, lo que genera sus características bicarbonatada sódica con una concentración iónica similar a las aguas en la zona de descarga.

Los puntos de muestreo Al-Te-02 y P-Te-04 presentan aguas sulfatadas bicarbonatadas sódicas cálcicas con una baja concentración iónica que puede ser producto de una mezcla de aguas de mayor tránsito que han sufrido procesos de intercambio iónico con aguas de recarga lateral cuya concentración iónica es reducida al ser aguas de origen meteórico.

Tabla 8.1. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de variación hidrogeoquímica para el mes de julio/14

	pH	T	TDS	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	Fe	Cu
Orden de remoción de tendencia	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°
Transformación	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10
Pepita (Nugget)	3.231 8 x 10 ⁻³	0	0	0.3659	0.4072 8	0.2640 6	0.184 5	0	0.1699 8	0.1484 5	5.7933 x 10 ⁻²	0
Tamaño de Lag	906.1 8	478.15	442.72	330.74	906.18	906.18	906.1 8	496.46	906.18	906.18	906.18	906.18
Meseta (Sill)	0	4.3014 x 10 ⁻⁴	0.1920 1	0.3659	0	0.3817 2	0	0.4064 3	0	0	1.525 x 10 ⁻²	1.4743 x 10 ⁻²
Número de Lags	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Anisotropía	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	No	No	Sí	Sí
Dirección [Grados]	-	76.0	75.1	302.2	-	69.7	-	76.2	-	-	277.9	14.0
Tolerancia [Grados]	-	67.5	61.4	55.7	-	20.3	-	66.0	-	-	44.8	45.0
Ancho de banda (Lags)	-	5.6	5.6	4.0	-	1.9	-	5.0	-	-	1.8	2.2
Rango Mayor	-	5516.2 9	5247.6 8	3807.1	-	10305. 5	-	5714.6 8	-	-	10291. 3	10318. 2
Rango Menor	-	2641.3 3	2498.6 3	1406.8 8	-	1650.8 1	-	2467.8 3	-	-	1650.8 1	1955.2 8
RMSS	2.47	2.557	6.416	15.58	3.806	18.74	2.205	22.41	2.772	2.823	3.685	2.597

pH: Potencial de hidrógeno; T: Temperatura; TDS: Sólidos Totales Disueltos; Na⁺: Sodio; K⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio; HCO₃⁻: Bicarbonato; SO₄²⁻: Sulfato; N-NO₃⁻: Nitrato; Fe: Hierro; Cu: Cobre; RMSS: Root-Mean-Square Standardized

Tabla 8.2. Parámetros de Ajuste del modelo teórico del semivariograma experimental para mapas de variación hidrogeoquímica para el mes de octubre/14

	pH	T	TDS	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	Fe	Cu
Orden de remoción de tendencia	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°	2°
Transformación	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10	Log10
Pepita (Nugget)	1.8606 x 10 ⁻³	0	4.625 x 10 ⁻²	0.26628	0.13266	0.30315	0.12654	0	0.21556	3.6688 x 10 ⁻²	0.15886	6.3728 x 10 ⁻³
Tamaño de Lag	906.18	415.62	906.18	906.18	906.18	906.18	906.18	519.73	906.18	906.18	906.18	906.18
Meseta (Sill)	3.9124 x 10 ⁻⁴	1.3072 x 10 ⁻³	3.3624 x 10 ⁻³	0	3.9164 x 10 ⁻²	0.10408	0	7.7134 x 10 ⁻²	0	5.1569 x 10 ⁻²	0	1.4849 x 10 ⁻²
Número de Lags	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Anisotropía	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	No	No
Dirección [Grados]	15.6	87.0	335.4	-	83.9	27.9	-	83.5	-	92.9	-	13.7
Tolerancia [Grados]	41.3	57.9	42.0	-	48.3	43.7	-	69.1	-	46.9	-	45.0
Ancho de banda (Lags)	2.8	5.0	2.0	-	2.0	2.0	-	5.0	-	2.2	-	2.0
Rango Mayor	10354.2	4926.46	10315.5	-	10306.6	10299.6	-	5982.54	-	10320.7	-	10312.5
Rango Menor	2496.42	2151.4	1650.81	-	1650.81	1650.81	-	2524.86	-	1984.49	-	1650.81
RMSS	2.414	3.062	3.682	6.687	4.165	7.098	2.778	5.179	2.56	5.482	2.921	2.368

pH: Potencial de hidrógeno; T: Temperatura; TDS: Sólidos Totales Disueltos; Na⁺: Sodio; K⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio; HCO₃⁻: Bicarbonato; SO₄²⁻: Sulfato; N-NO₃⁻: Nitrato; Fe: Hierro; Cu: Cobre; RMSS: Root-Mean-Square Standardized

8.3.3. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

En el plano 21 se puede observar la variabilidad del pH en la cuenca. Se encuentra que sobre las zonas de recarga la concentración para los muestreos oscila entre 5.2 y 6.1 unidades, concordante con aguas de recarga con una concentración mayoritaria de iones bicarbonato en equilibrio con el ácido carbónico (figura 7.3. y ecuación 7.3.), los cuales provocan una reducción en el pH por liberación de iones hidronio (H_3O^+). Sobre la zona de tránsito y descarga el pH aumenta hasta un pH 6.5-7, concordante con el tránsito del agua donde las interacciones entre esta y la matriz sedimentaria ocasionan la disociación y precipitación del ión bicarbonato. En torno a la variación temporal se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) aludidas a las diferencias del comportamiento hidrológico que se presentan en la zona, combinadas con los procesos de explotación que se generan en la zona.

En el mes de julio con un periodo de régimen seco y la sobreexplotación del acuífero se presenta una zona con pH menores a 6.1, relacionados a aguas de origen meteórico en el sector N de la cuenca y un aumento gradual de esta variable con rumbo N – SW a favor de los potenciales hidráulicos que se generan, los cuales originan dos zonas con $pH > 6.8$, la primera en el flanco NE de la serranía de Cota producida presuntamente por un flujo lento de agua cuya dirección provoca una acumulación de agua y la segunda ubicada en la zona NW de la cuenca en dirección a la zona de descarga; la presencia de estas zonas se debe a los procesos de intercambio catiónico y enriquecimiento iónico que provoca una variación en la hidroquímica de la cuenca y por ende una variación en el pH. A su vez, en el mes de octubre se presenta un comportamiento similar en torno a la evolución espacial de esta variable, no obstante el aumento en la precipitación y la recarga en el acuífero tanto vertical como lateral (P-Te02 y P-Te-04), genera un aumento en tamaño de la zona con pH menores a 6.1 cubriendo parte de la zona de transición, reduciendo considerablemente las zonas donde se presenta los valores mayores de pH.

8.3.4. TEMPERATURA (T)

En el plano 22 se puede observar la variabilidad de la T en la cuenca. En el mes de julio, sobre las zonas de recarga se presentan los valores de T mayores oscilando entre 17.4 y 19.0 °C decreciendo a medida que el agua transita a través de la matriz sedimentaria del acuífero llegando a presentar temperaturas entre 16 y 15 °C en la zona de descarga. En octubre, la temperatura media del agua subterránea es de 19 ± 1.3 °C con un gradiente que parte desde el NE de la cuenca en dirección S. Este gradiente es explicado como consecuencia de los fenómenos de mezcla que se dan entre las aguas de recarga y de flujo lento que se encuentran estacionadas en la zona NE de la serranía de Cota: lugar donde inicia el gradiente de temperatura y como consecuencia del gradiente hidráulico que presenta la cuenca, se inicia un proceso de enfriamiento por el tránsito del agua a través de la matriz sedimentaria. Al comparar el comportamiento de la T entre los meses estudiados, se encuentra una diferencia

estadísticamente significativa ($p < 0.05$) que se debe, al igual que la variable pH a las condiciones hidrogeológicas y de explotación que gobiernan en la zona.

8.3.5. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (TDS)

En el plano 23 se puede observar la variabilidad de los TDS en la cuenca. El comportamiento en los meses de muestreo estudiados no presenta diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) producto de su similaridad en torno al gradiente de concentración, con una ligera disminución de esta entre los periodos estudiados (Concentración máxima: 615.3 mg TDS/L julio; 525.9 mg TDS/L octubre). En general se observa sobre la cuenca la presencia de dos zonas con una baja concentración de TDS (< 265 mg/L) al N y S de la cuenca sobre los bordes de la Serranía de Tabio – Tenjo y la Serranía de Cota respectivamente, siendo estos lugares donde se manifiesta recarga vertical y lateral del acuífero. A su vez se presentan dos zonas con la mayor concentración de TDS, ubicadas en el sector NE y el sector SW de la cuenca.

La concentración de TDS en las zonas supera los 430 mg TDS/L promedio para los dos periodos estudiados. La aparición de estas dos zonas se debe al gradiente hidráulico generado por la sobreexplotación en el sector N de la región estudiada, el cual produce un flujo lento de agua en dirección N-NE que permite que los procesos de intercambio iónico y meteorización y disolución de minerales sea más efectivo, aumentando la concentración de TDS en las aguas ubicadas en esa región. Por su parte en la zona SW, la concentración de esta variable se produce por el grado de evolución y tiempo de tránsito que ellas presentan dado que en esta región se produce la descarga de la cuenca.

8.3.6. SODIO (Na^+)

En el plano 24 se puede observar la variabilidad del ión mayoritario Na^+ en la cuenca. Su comportamiento en términos temporales no presenta diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$); se genera un enriquecimiento de este ión a medida que el agua se dirige desde la zona de recarga hasta la zona de transición y posterior a la zona de descarga del acuífero, producto que el agua subterránea a lo largo de su recorrido e interacción con los sedimentos arcillosos permite los procesos de intercambio iónico entre los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} por Na^+ .

En el mes de julio, la concentración en la zona de recarga presenta valores menores a 37 mg/L que parten desde el flanco E de la serranía de Tabio – Tenjo y aumentan gradualmente a medida que se dirige al centro y a la zona de descarga de la cuenca alcanzando valores mayores a 96 mg/L. Por su parte en el mes de octubre, en la zona de recarga se presentan valores menores a 18 mg/L en la zona de recarga llegando a tener valores mayores a 87 mg/L en la zona de descarga.

Las mayores concentraciones de Na^+ obtenidas para el mes de julio en comparación con el mes de octubre se debe a que la recarga vertical y lateral que se produce en el acuífero es menor en

comparación con los meses lluviosos, lo que origina que el agua que se encuentra inmersa en los sedimentos del acuífero en estudio presente un mayor tiempo de contacto con los minerales arcillosos, generando que el intercambio catiónico se produzca con mayor eficiencia al estar favorecido por la presencia de temperaturas más bajas ($<17^{\circ}\text{C}$) en este mes, lo que beneficia los procesos de adsorción e intercambio iónico con los sedimentos arcillosos, debido que las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas y por tanto, el grado de adsorción será presumiblemente mayor al disminuir la temperatura, aunque las variaciones normales de temperatura sólo tienen pequeños efectos sobre el proceso de adsorción (Grupo de gestión de recursos hídricos, s.f.).

8.3.7. POTASIO (K^+)

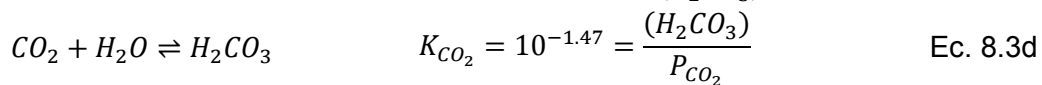
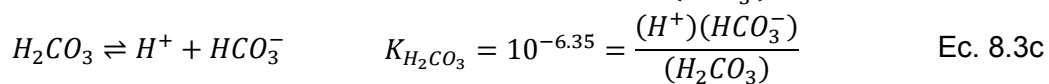
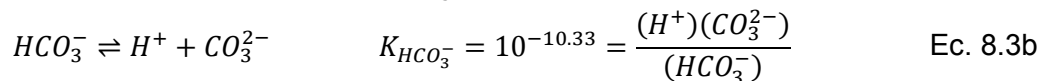
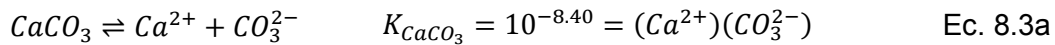
En el plano 25 se puede observar la variabilidad del ión mayoritario K^+ en la cuenca. En ambos periodos de estudio se observa una acumulación de este ión en la zona N y SW de la cuenca (>30 mg/L) y una marcada zona central donde la concentración de este ión se reduce considerablemente (<6 mg/L). Dicho descenso se produce por la interacción entre el agua y los sedimentos arcillosos de alta capacidad de intercambio iónico que se ubican en la cuenca media los cuales fijan irreversiblemente este ión, provocando su reducida disponibilidad. Por su parte, la marcada acumulación en las zonas de recarga y descarga de la cuenca puede ser producto de la presencia de sedimentos ricos en este ión así como de las actividades antrópicas que suprayacen el acuífero las cuales pueden ser fuente artificial de este. En el mes de octubre, el aumento de la concentración de ión K^+ en la cuenca media es explicada por el movimiento del agua con alta concentración de este elemento que se encontraba acumulada en la zona NE en dirección a la zona de descarga, por acción del aumento en la recarga vertical y del potencial hidráulico en la cuenca. Estadísticamente no se encuentran diferencias significativas ($p>0.05$).

8.3.8. CALCIO (Ca^{2+})

En el plano 26 se puede observar el comportamiento del ión mayoritario Ca^{2+} en la cuenca. En torno a la variabilidad temporal no se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$). En general, para los dos periodos analizados la concentración en las zonas de recarga oscila aproximadamente entre 4 y 8 mg/L, producto del origen meteórico de estas aguas y de su recorrido de corta duración en el acuífero que gradualmente aumenta hasta alcanzar valores cuyo rango fluctúa entre 18 - 43 mg/L en el mes de julio y 30 - 40 mg/L en el mes de octubre. El aumento de la concentración (i.e. enriquecimiento iónico) es el sector NE y SW se debe a la interacción entre el agua y la matriz sedimentaria que ocasiona la disolución de este catión mediado por la presencia de especies ácidas tales como el ácido carbónico (H_2CO_3), la cual facilita los procesos de meteorización de minerales tales como la calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Garrels y McKenzie, 1967).

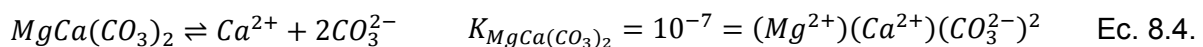
Estos procesos de enriquecimiento iónico del Calcio son dependientes del pH, lo cual se justifica al comparar los planos 21 y 26 que reflejan un comportamiento similar. Para los meses

de julio y octubre, el gradiente de concentración de este catión y su distribución espacial corresponden al comportamiento espacial del pH. En ellos, la meteorización y disolución de especies calcicas tales como la Calcita se controla a través del equilibrio ácido-base y de la presencia de ión bicarbonato en el sistema, el cual desplaza el equilibrio a la izquierda en la Ecuación 8.3c., lo cual induce una reducción del H^+ generando un aumento del pH y la concentración del H_2CO_3 en el sistema, siendo esta última sustancia, la que media la disolución de la calcita hasta que el sistema se encuentre saturado de este mineral.



8.3.9. MAGNESIO (Mg^{2+})

En el plano 27 se puede observar la variabilidad del ión mayoritario Mg^{2+} en la cuenca. En torno a la variabilidad temporal no se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). En general la concentración en las zonas de recarga oscilan entre 1.00 y 3.00 mg/L, producto del origen meteórico de estas aguas (i.e. que presenta una baja concentración de este ión) y de su recorrido de corta duración en el acuífero, que gradualmente aumenta hasta alcanzar valores mayores a 4.00 mg/L en zonas de tránsito, llegando hasta valores máximos de 6.29 (julio) y 14.47 (octubre) mg Mg^{2+} /L en la zona de descarga. El aumento de la concentración (i.e. enriquecimiento iónico) en el sector de descarga es producto de la disolución secuencial e incongruente (i.e. disolución de un mineral da lugar a especies iónicas y moléculas no solubles), donde primero se desarrolla la disolución y posterior saturación de la calcita producto de su K_{ps} menor en comparación al de la dolomita (Ecuación 8.3a y 8.4), y ulterior disolución de la dolomita generando el enriquecimiento del catión Mg^{2+} y de iones bicarbonato (Ecuaciones 8.4 y 8.3.b) en la zona de descarga.



8.3.10. BICARBONATO (HCO_3^-)

En el plano 28 se puede observar la variabilidad del ión mayoritario HCO_3^- en la cuenca y al comparar el comportamiento de esta variable entre los meses de julio y octubre no se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). En la zona de recarga se advierten concentraciones menores a 170.0 mg/L para el mes de julio y 97.0 mg/L para el mes de octubre. La concentración de esta variable fisicoquímica aumenta a medida que el agua se

dirige a la zona de transición y descarga llegando a obtener concentraciones mayores a 300.0 mg/L para los meses estudiados.

La localización de los puntos de mayor concentración de este ión ubicados en la zona NE y SW de la cuenca es producto de los procesos de disolución de minerales carbonatados presentes (e.g. calcita y dolomita). Por otra parte, la presencia de concentraciones similares a las encontradas en las zonas de recarga en la zona SE sobre la falda de la Serranía de Cota donde se ubican los puntos de muestreo Al-Te-02 y P-Te-04, exponen que sobre esta zona hidroquímicamente se pueden encontrar una franja de recarga de tipo lateral.

8.3.11. SULFATO (SO_4^{2-})

En el plano 29 se puede observar la variabilidad del ión mayoritario SO_4^{2-} en la cuenca. En el mes de julio se distingue una zona de alta concentración ubicada al NE de la cuenca, ocasionada por un flujo lento y un aumento del tiempo de tránsito del agua subterránea, que permite una mayor interacción con los sedimentos que conforman el acuífero estudiado enriqueciendo estas aguas con iones sulfato. El enriquecimiento se ve depreciado a medida que el agua se dirige hacia la zona de transición y descarga en dirección del potencial hidráulico. El rango de concentración varía desde la zona de recarga con valores menores a 28 mg/L hasta la zona NE con valores mayores a 70 mg/L.

Para el mes de octubre, se observan dos zonas de alta concentración (>70 mg/L) de sulfatos ubicadas al NE y al SW de la cuenca, concordante con áreas de flujo lento de agua subterránea y la zona de descarga de la cuenca, respectivamente. La aparición de una franja intermedia originada por la recarga al N de la cuenca, donde se evidencian concentraciones menores a 33 mg/L producidas por el efecto de la recarga vertical y lateral de agua meteórica que se acrecienta en el periodo de estudio. Al comparar el comportamiento de esta variable entre los meses de julio y octubre no se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), no obstante se evidencia la influencia que presenta la hidrología de la zona sobre el comportamiento de este ión. Para los periodos estudiados, la reducción en la concentración de sulfato sobre el área de descarga (julio) y sobre el área de transición (octubre) se debe a la mezcla entre agua enriquecida con este ión y agua de origen meteórico que ha recargado el acuífero por la zona NW de la cuenca.

8.3.12. CLORURO (Cl^-)

Sobre este ión no se generó un mapa de distribución espacial dada la homogeneidad en torno a su concentración en la totalidad de los puntos estudiados (julio y octubre 0.4 ± 0.1 mg Cl^-/L), a su vez por la problemática generada en torno a su determinación en el laboratorio.

Al comparar el comportamiento de esta variable entre los meses de julio y octubre se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), lo cual se debe a la gran

influencia que presenta el régimen hídrico sobre el comportamiento del acuífero. Con el fin de determinar la variación espacial y confirmar la diferencia en términos temporales de este elemento en la cuenca, se hace necesario realizar nuevos muestreos donde se certifique la correcta obtención de este ión.

8.3.13. NITRATOS (NO_3^-)

En el plano 30 se puede observar la variabilidad del ión NO_3^- en la cuenca. Al comparar el comportamiento de esta variable fisicoquímica en términos temporales se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Para el mes de julio, se presenta una concentración homogénea menor a 0.5 mg/L en la totalidad de la cuenca, no obstante para el mes de octubre el comportamiento de esta variable se modificó notablemente. En la zona de recarga la concentración varía entre la zona N con valores mayores a 4.0 mg/L manteniéndose constante a lo largo de la cuenca en dirección N-SSW en dirección a la zona de descarga, a su vez se observa una reducción de la concentración hacia los flancos de la cuenca llegando a valores menores a 1.0 mg/L. El aumento de la concentración de esta variable de carácter no puntual, es concordante con la zona plana de la cuenca del Río Chicú, lugar donde se desarrollan actividades urbanas, ganaderas y agrícolas que pueden ser las causantes de este suceso, sin embargo al no presentarse concentraciones mayores a 10 mg/L (EPA, 2006), el agua subterránea explotada por este acuífero no presenta riesgo para la comunidad que la consume. Sin embargo, la variabilidad de este ión puede ser usado como indicador de impacto antrópico.

8.3.14. HIERRO (Fe)

En el plano 31 se puede observar la variabilidad del Fe en la cuenca. Para el mes de julio, sobre la zona de recarga se presentan dos regiones con diferentes concentraciones; sobre la zona N la concentración es mayor a 9.00 mg/L, mientras que en la zona NW la concentración es menor a 6.00 mg/L. La concentración de este elemento gradualmente aumenta en dirección del flujo regional llegando a tener concentraciones mayores a 14.00 mg/L en la zona de descarga. Para el mes de octubre, sobre la zona de recarga se presentan concentraciones menores a 11 mg/L que aumentan gradualmente hasta concentraciones mayores a 20 mg/L en la zona de tránsito y descarga.

Al comparar el comportamiento de esta variable entre los meses de julio y octubre no se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), dado que el proceder de esta se encuentra influenciado por el pH en la cuenca; las mayores concentraciones de hierro se encuentran en zonas de aguas evolucionadas donde el pH no supera las 6.5 unidades siendo este el límite (Figura 7.4) donde se encuentran las especies solubles de este elemento (e.g. Fe^{2+} , FeOH^- , entre otros).

8.3.15. COBRE (Cu)

En el plano 32 se puede observar la variabilidad del Cu en la cuenca. Al comparar el comportamiento de esta variable entre los meses de julio y octubre no se encuentran diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Sobre la zona de recarga se encuentra la mayor concentración de este metal encontrando valores mayores a 0.80 mg/L cuya concentración disminuye paulatinamente formando una pluma con dirección N-S que atraviesa la cuenca por el sector donde el pH no excede las 6.5 unidades, llegando a concentraciones no menores a 0.70 mg/L. Para el resto de la cuenca, la presencia de este ión no supera los 0.60 mg/L encontrando que espacialmente la concentración de este ión es homogénea con su origen en la serranía de Tabío -Tenjo; su baja concentración y homogeneidad en la cuenca, lo hacen ideal como indicador de contaminación para futuros estudios.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

9. CONCLUSIONES



9. CONCLUSIONES

La Cuenca del Río Chicú se encuentra ubicada en el departamento de Cundinamarca, Colombia, entre los municipios de Tabio y Tenjo y una pequeña porción en el municipio de Cota. Sobre la cuenca habita una población proyectada para el año 2014 de 33.340 habitantes, existiendo un aumento del 119% desde el último censo realizado por el DANE (2005). Las actividades económicas que se encuentran en la zona son la agricultura de papa, la floricultura, cebada, hortalizas y la ganadería lechera. Las dos primeras actividades mencionadas son las más comunes cubriendo entre las dos aproximadamente el 7% del territorio.

Esta región en estudio, se encuentra ubicada entre $74^{\circ}7' \text{ O} - 4^{\circ}45' \text{ N}$ y $74^{\circ}5' \text{ O} - 4^{\circ}54' \text{ N}$, su elevación está comprendida entre 2550 y 3100 m.s.n.m., presentando un clima frío semihúmedo con temperatura media de 13.7°C y una precipitación media anual de 853 mm. La distribución temporal de la precipitación presenta carácter bimodal, influenciado por la Zona de Confluencia Intertropical (ITC) que determina las condiciones atmosféricas y climáticas de la zona, provocando dos periodos secos entre los meses de junio a septiembre y otro de diciembre a marzo y dos periodos lluviosos entre los meses de abril – mayo y octubre y noviembre.

Al analizar espacialmente las precipitaciones para los meses de julio y octubre, periodos en los cuales se realizaron los muestreos de agua subterránea para este proyecto, se encontró que para el mes de julio se genera el segundo periodo de déficit hídrico donde espacialmente la precipitación aumenta gradualmente en dirección de los vientos dominantes (S – N), encontrando las mayores valores de precipitación para el mes en los límites orogénicos de la cuenca ($57.0 \pm 3.1 \text{ mm}$) y los menores valores hacia el interior del valle intramontano ($45.5 \pm 22.0 \text{ mm}$); para el mes de octubre las precipitaciones presentan un aumento gradual del volumen en dirección de los vientos dominantes (NE – SW) que causan que los máximos de lluvia se generen en el valle intramontano ($103.1 \pm 8.2 \text{ mm}$) y sobre la cuenca alta los valores mínimos. ($83.6 \pm 23.9 \text{ mm}$).

Estacionalmente, la Temperatura (T) y la Evapotranspiración potencial (ETP) muestran un comportamiento uniforme a lo largo del año ($14.0 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$; $56.5 \pm 1.6 \text{ mm}$), presentando los valores máximos en los meses de abril y mayo ($14.2 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$; $60.1 \pm 2.3 \text{ mm}$) y valores mínimos en enero para la T (13.3°C) y febrero para la ETP (50.9 mm).

Los suelos que conforman la cuenca se dividen en suelos de planicie y montaña. Los primeros de relieve plano con pendientes entre 1-5% están conformados por suelos pertenecientes al Complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts (RLQa) y a la asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – haptic Hapludands (RLOa), caracterizados por ser de origen fluvio lacustre ordenado en terraza con variaciones en los contenidos litológicos, con mediana a alta capacidad de intercambio catiónico, bien a pobremente drenados, de texturas finas a medias y baja a moderada evolución.

El suelo de montaña, ubicado a alturas mayores a 2800 m.s.n.m. presenta pendientes variables que oscilan entre 12% y mayor a 75%, conformado por la Consociación Typic Eutrudepts. (MLSg), la Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts (MLVe y MLVf), el Complejo Pachic Melanudands - Typic Hapludands – Andic Dystrudepts (MLKc y MLKd) y la Asociación Typic Hapludands – Pachic Melanudands- Humic Lithic Dystrudepts (MGTd). Están constituidos en general por rocas clásticas limoarcillosas y depósitos de ceniza volcánica de espesor variable con texturas finas a moderadamente gruesas cuyo drenaje es bueno a moderado y con una media a alta capacidad de intercambio catiónico y contenidos de nutrientes (Ca, Mg, K, P).

Refiriéndose al uso y cobertura de suelos, la cuenca se encuentra dividida en dos sectores: la zona urbana (i.e. cabecera de los municipios), caracterizada por espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada con una escasa presencia de vegetación y suelo desnudo, por otro lado la zona rural, sobre la cual se generan diversos usos de suelo todos ubicados entre 2000 y 3000 m.s.n.m. con climas frío a muy frío entre los que se encuentran zonas agrícolas y ganaderas (T) ocupadas por cultivos comerciales o no, en un 25 a 50% del área y el resto en pastos semitecnificado y/o rudimentario (TF2-y). También se encuentran zonas esencialmente agrícolas (C) que presentan uno o dos cultivos dominantes tecnificados y/o semitecnificados (CF1-x) o que presentan suelos ocupados por pastos y cultivos de tipo transitorio y permanente (CF2-s).

En la zona rural además se localizan zonas esencialmente de pastoreo (P) en las cuales se presentan prácticas de manejo como riego suplementario, fertilización y otras rutinas que permiten que estén libres de maleza. En algunos de estos tipos de cobertura se encuentran suelos con técnicas de cultivo tecnificadas (PF1-t) o técnicas de cultivo rudimentarias (PF2-r). Por último se sitúa la zona de vegetación natural o artificial (B, V, RF) donde se emplazan dos categorías: la BF1 que son bosques primarios y/o secundarios, dispuestos en una pequeña fracción sobre los cerros de Cota y el anticlinal de Tabio y, la VN1 son zonas con presencia de matorrales con vegetación natural de porte bajo con un dosel irregular producto de las condiciones naturales o la acción antrópica.

Con base en los datos hidrometeorológicos obtenidos de la estación Providencia Gja. y las características de los suelos de la zona en estudio, se generó el balance hídrico según Thornthwaite-Mather, determinando que la zona se encuentra sometida a condiciones variables de exceso hídrico ($\Delta P > 0$) entre los meses de marzo – julio y septiembre – diciembre, y déficit hídrico ($\Delta P < 0$) en los meses restantes. A su vez existe un balance a favor ($P > ETP + Ro$) en términos de agua disponible que permite la recarga de los acuíferos y la disponibilidad del recurso en los meses de exceso hídrico, lo que se traduce en humedad que favorece las prácticas agrícolas que se generan en la región. Al comparar las variables ETr , Ro e Inf en cada serie de suelos analizada para los meses de julio y octubre no se determinaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.01$).

El proceso de recarga al acuífero (Inf), ocurre en los meses de exceso hídrico (i.e. marzo – abril, septiembre – octubre obteniendo valores para suelo urbano de 60.3 mm/año; 12.1 ± 8.9 mm/mes y para el rural 95.2 mm/año; 23.8 ± 15.8 mm/mes. Espacialmente, en la zona montañosa se produce la mayor infiltración en la cuenca producto de sus características texturales y de porosidad (octubre: 17.8 ± 0.2 mm/mes). Por su parte en la zona plana (octubre: 14.7 ± 5.3 mm/mes), la infiltración se reduce debido a la impermeabilidad que le provee los estratos arcillosos que conforman los sedimentos y el suelo en esta zona

En términos de la escorrentía superficial, se produce en los meses de exceso hídrico, con alturas de lámina de escorrentía estimadas en suelo urbano (261.3 mm/año; 32.7 ± 17.9 mm/mes) y en suelo rural (219.0 mm/año; 36.5 ± 10.1 mm/mes). Espacialmente, las zonas de mayor escurrimiento se presentan en la planicie de la cuenca (julio: 19.0 ± 0.5 mm/mes; octubre: 37.7 ± 2.0 mm/mes), producto de las características texturales finas de la zona (i.e. arcillas intercaladas con arenas y gravas). En la región montañosa que emplaza a la cuenca, se observan valores menores de escorrentía (julio: 18.6 ± 0.0 mm/mes; octubre: 36.4 ± 0.0 mm/mes) causadas por las características texturales de la zona y la presencia de porosidad secundaria. En síntesis, se estimó el valor de la recarga anual para el acuífero de sedimentos del Neógeno – Cuaternario en 1.11×10^7 m³ para 109.72 km². También se obtiene 4.03×10^6 m³ de recarga para los afloramientos del Grupo Guadalupe para 38.21 km². Entonces, la recarga total anual para un área de 147.93 km² pertenecientes a la cuenca en estudio es de 1.52×10^7 m³ sobre el área plana y montañosa.

Geológicamente, la cuenca se encuentra enmarcada dentro de la Sabana de Bogotá, ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental, considerada un sinclinorio fallado con rumbo SSW – NNE en el centro y en la cresta de la Cordillera Oriental, conformada por rocas y sedimentos en diversas condiciones, con características consolidadas y no consolidadas, y edades desde el Cretáceo Medio hasta el Cuaternario. En específico, el área de estudio presenta una zona plana constituida por depósitos cuaternarios que forman un valle intramontano, extenso y plano con espesor variable, con menor profundidad en los bordes, aumentando hacia el centro de la cuenca, una zona montañosa conformada por formaciones rocosas del grupo Guadalupe, que bordea al valle, de dirección NE, la cual presenta relieves abruptos, pendientes fuertes, con rocas de gran dureza y una zona de colinas suaves ubicada en la zona NW de la cuenca, compuesta por gravas y arenas de los Depósitos de Terraza alta y en el piedemonte de los cerros por material fino de la Formación Chipaque y la Formación Guaduas.

Estratigráficamente y en orden cronológico, las unidades presentes en el área estudiada son la formación Chipaque (K₂cp), el grupo Guadalupe conformado por arenas con intercalaciones de liditas, limolitas y arcillolitas, en el cual se encuentran las unidades, formación Arenisca Dura (K₂d), formación Plaeners (K₂p) y formación Labor y Tierna (K₂t). Suprayaciendo a este grupo se presenta la formación Guaduas (K₂E₁g), la formación Bogotá (E₁₋₂b) conformada por el conjunto inferior (Tebi – E₁b) y el conjunto superior (Teb_s – E₂b). Por último se encuentran los depósitos Cuaternarios, constituidos principalmente por arcillas con intercalaciones lenticulares de sedimentos arenosos de grano fino y gravas. A estos pertenecen los depósitos de Terraza Alta

(Qta) relacionados con la formación Sabana (Q1sa), los depósitos Aluviales (Qal) asociados con la formación Chía, (Q₂ch) y los depósitos Coluviales (Q₂c).

Estructuralmente la cuenca presenta en el sector NE una serie de fallas cabalgantes semiparalelas entre sí y la falla Chital, la cual bordea el flanco Este de la Serranía de Tabio – Tenjo. También, se presenta una estructura anticlinal, denominada Anticlinal de Tabio, localizada sobre la Serranía de Tabio – Tenjo, que presenta su término al Norte sobre la falla Chital y al Sur presenta un hundimiento dentro de los depósitos del Neógeno - Cuaternarios (Formación Sabana). También, en el sector SE el cual se caracteriza por tener fallas cabalgantes semiparalelas entre sí, además está la Falla El Porvenir, estructura de falla inversa que es la continuación por debajo de los depósitos cuaternarios de la falla que bordea por el occidente a la Serranía de Chía – Cota y que se extiende hacia el Norte hacia Zipaquirá.

Sobre la cuenca del Río Chicú se genera la explotación de materiales de construcción extrayendo arcillolitas de la Formación Guaduas en las laderas de la Serranía de Tenjo al Norte y la explotación de agua subterránea, encontrando para el 2102, 1178 pozos en total, distribuidos en los municipios de Tenjo (1009 pozos, 85.6%), Tabio (68 pozos, 5.8%) y Cota (101 pozos, 8.6%), que en general extraen el agua por medio de compresor o bomba sumergible, los cuales son generalmente diseñados sin cumplir las normas técnicas y en consecuencia producen grandes cantidades de sedimento, provocando un detrimento de la calidad y cantidad de agua extraída de los acuíferos captados. Como consecuencia del mal diseño y deficiente operación, se encuentran 351 pozos (29.8%) abandonados u obstruidos y 70 pozos (5.9%) por sobreexplotación y abatimiento en los niveles freáticos no son utilizados debido que se encuentran “secos”.

Los pozos activos (583 pozos, 49.5%) presentan como principal uso del agua su utilización en actividades de ganadería (326 pozos, 55.9%), irrigación de cultivos (149 pozos, 25.6%), abastecimiento doméstico (96 pozos, 16.5%) y otras actividades tales como el uso industrial. También en la zona se presentan aljibes, catalogados como excavaciones hasta de 36 m de profundidad, usados en actividades de abastecimiento doméstico (9.2%), irrigación (9.2%) y ganadería (6.6%), en su mayoría los aljibes se encuentran inactivos. Por último, para el año 2012 se encontró únicamente 1 manantial ubicado en zona de piedemonte, en la vereda Santa Cruz, municipio de Tenjo, no obstante, dicho manantial al momento de la realización del censo se encontraba seco. En campañas anteriores se tenían en inventario 12 manantiales distribuidos en la zona de piedemonte.

Con respecto a la explotación de agua subterránea, la Sabana de Bogotá presenta varios complejos hidrogeológicos producto de su complejidad tectónica, representada por su alto grado de fracturamiento, considerando que todas las unidades hidrogeológicas están relacionadas y forman una unidad hidráulicamente conectada. De lo cual se estableció dentro de la cuenca dos zonas de interés donde los procesos de recarga y descarga de las aguas subterráneas están determinados por procesos y mecanismos distintos. Una zona interior que corresponde a la

superficie de la cobertura de la cuenca, conformada por los acuíferos neógeno-cuaternarios y del paleógeno que reciben recarga por la infiltración de las aguas lluvias en áreas muy limitadas ubicadas hacia los bordes internos de la cuenca, donde afloran depósitos más permeables

En el resto del área la recarga por precipitación se dificulta debido a los niveles arcillosos aflorantes, aunque ésta puede tener importancia para los acuíferos superficiales de carácter local. Otra fuente de recarga en la zona Interior proviene de las corrientes superficiales durante los períodos húmedos.

La segunda zona denominada zona exterior, corresponde a las cadenas montañosas, donde se alimentan directamente los acuíferos del Complejo Guadalupe. La principal fuente de recarga es la infiltración de las precipitaciones; después, la condensación del vapor de agua contenido en los poros y fisuras de las rocas aflorantes. Las aguas infiltradas se descargan en las vertientes en forma de manantiales o se dirigen hacia los valles como flujos subsuperficiales.

En el área de estudio, como cuenca hidrogeológica intramontana, está conformada por los complejos acuífero Neógeno-Cuaternario (Formación Sabana y Chía y depósitos de pendiente) y acuitardo paleógeno (Formación Guaduas) que constituyen la cobertura de la cuenca, mientras que el acuífero Guadalupe (formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna), se considera como piso intermedio de la cobertura y el basamento, representado por la formación Chipaque.

Hidrogeológicamente las formaciones geológicas se clasificaron en

- A. Rocas porosas/fracturadas con gran a moderada importancia hidrogeológica
- B. Sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica
- C. Rocas porosas/fracturadas con poca importancia hidrogeológica
- D. Sedimentos y rocas porosas/fracturadas sin importancia hidrogeológica

El acuífero estudiado (i.e. Acuífero de formación sabana y chía) presenta características de sedimentos no consolidados con moderada importancia hidrogeológica; sus parámetros hidráulicos determinan que este acuífero presenta características de poca permeabilidad ($T: 5 - 52.45 \text{ m}^2/\text{día}$) presentando un funcionamiento de libre a semi-confinado ($S: 4.5 \times 10^{-5} - 2.8 \times 10^{-3}$).

El acuífero Formación Sabana (Q1sa) presenta características de tipo confinado, semi-confinado por la Formación Chía y depósitos coluviales y libre en el resto del área que se presenta a lo largo de la zona plana de la cuenca, con espesores de 50 m aproximados en los bordes, aumentando hasta 250 m en la zona central encontrándose estratigráficamente suprayaciendo la Formación Bogotá y Guaduas los cuales presentan características de Rocas porosas/fracturadas con poca importancia hidrogeológica. Su recarga se debe a la percolación del agua precipitada en el área plana, en las zonas de contacto con el Acuífero Grupo Guadalupe, principalmente en el borde Oriental de la Serranía de Tenjo – Tabio y de manera

lenta en forma vertical ascendente, de las aguas de acuíferos que la infrayacen (i.e. acuíferos formación Guadalupe). La descarga se realiza a través de los pozos y aljibes que lo explotan distribuidos a lo largo de toda la zona plana y finalmente la descarga directa hacia el río Bogotá.

El acuífero Formación Chía (Q_{2ch}) presenta poca importancia hidrogeológica principalmente por su escasa distribución, poco espesor y debido a que se utiliza para pozos pequeños y aljibes; es de tipo libre, suprayaciendo al acuífero Formación Sabana y espesor variable menor a 30 m. Se recarga directamente por percolación de la precipitación y de las aguas corrientes superficiales. La descarga tiene lugar solamente a través de los aljibes que lo explotan. El flujo subterráneo en general es de NE – SW igual que la dirección del río Bogotá y siguiendo la dirección de los afluentes hasta llegar al río Bogotá.

Al analizar espacial y temporalmente los niveles freáticos que explotan el acuífero Sabana – Chía para los años 1998, 2007, 2011 y 2012, se obtienen valores medios de 2569.8 ± 37.5 m, 2561.2 ± 37.1 m, 2563 ± 33.7 m y 2566.0 ± 32.11 m, respectivamente, los cuales al ser comparados estadísticamente usando la prueba U de Mann-Whitney para muestras pareadas, presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para la totalidad de los años analizados.

Espacialmente, para el año 1998 sobre la zona de recarga se presentan alturas de nivel freático mayores a 2618 m.s.n.m., con una dirección de flujo con dirección N-SE en dirección del sistema superficial hacia el Río Bogotá, no evidenciando efectos de sobre explotación que generen alteraciones (i.e. abatimientos de los niveles freáticos) a los flujos naturales del agua subterránea. Al realizar el análisis de los datos para el año 2007 se encontraron niveles freáticos mayores a 2596 m.s.n.m. en la zona de recarga, que en comparación con el año 1998 se presentaron abatimientos en esta zona cercanos a los 46 m, causados sobre la zona central de recarga, donde se ubican los pozos con placa CAR placa CAR VI- 13 y VI – 25, lo que generó una división de la zona de recarga en dos, la mayor ubicada al N de la cuenca y la otra, de menor tamaño ubicada al NW de la cuenca

Al analizar los datos de 4 años posteriores (2011) se encuentra que en la zona de recarga hay niveles freáticos mayores a 2579 m.s.n.m., continuando con la disminución de niveles en comparación con el año 2007 (reducción de 17 m). Se mantuvo la división en la zona de recarga con un agravamiento en torno al abatimiento en la zona central, llegando a encontrar niveles 90 m menores a los encontrados en el año 2007. Los pozos comprometidos en esta zona son VI – 13, VI – 23, VI – 25, 525-3 y 525 – 4. Una segunda zona crítica surge en este año (2011), la cual está ubicada en el sector NE de la cuenca, donde se están presentando variaciones locales en la dirección de flujo por procesos de sobre explotación del recurso, que han generado decaimientos en los niveles freáticos en el orden de 24 m. Algunos pozos que generan este problema son el VI – 58, VI – 05, VI – 09 y VI – 24. Al comparar los años 2007 – 2011 en la zona N y E se presentaron reducciones entre 1.3 y 3.0 m causados por la explotación de agua

subterránea que se genera en la zona (Pozos VI – 55, VI – 39, VI – 34, VI – 32, VI – 30, VI – 28, VI – 26, VI – 19, VI – 18).

Para el año 2012, la zona crítica ubicada en la zona de recarga mantuvo su constante reducción llegando a presentar abatimientos en el orden de 60 m con una leve recuperación en los niveles alcanzando valores de 2598 m en el pozo VI – 23. No obstante en general sobre la cuenca se observó una disminución entre 0.2 y 1.1 m en los niveles de agua subterránea. En términos de la dirección de flujo para los años 2007, 2011 y 2012, desde la aparición del abatimiento que generó una división en la zona de recarga, se presentan dos flujos regionales definidos que nacen desde las zonas de recarga y culminan al SE de la cuenca y un sin número de flujos locales definidos por las explotaciones que se generan en la cuenca.

Con base en los datos hidrogeológicos y las características geológicas e hidrogeológicas que se presentan en la cuenca se determinó el grado de vulnerabilidad según el método GOD, encontrando que para el año 2012 y en general para los años anteriores el 51.5% de los pozos (17) presentan una vulnerabilidad moderada tendiente a baja, y el 48.5 % restante (16 pozos), presentan una vulnerabilidad moderada. Al no existir una diferencia estadística significativa ($p > 0.01$) se define en general al acuífero con un grado de vulnerabilidad intrínseco moderado a la polución.

Para analizar el comportamiento hidrogeoquímico de la cuenca, se seleccionaron 10 puntos de muestreo pertenecientes a las bases de datos provistas por consultoras ambientales y la CAR, los cuales extraen agua del acuífero de los sedimentos Sabana y Chía, de estos, (9) nueve son pozos de extracción y (1) un aljibe. Los muestreos se realizaron en los meses de julio (periodo seco) y octubre (periodo lluvioso) del año 2014. Con el fin de garantizar la representatividad de la muestra de agua subterránea en cada punto de muestreo, se hizo la revisión de las guías y protocolos elaborados por organismos como IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre), IGME (Instituto Geológico y Minero de España), USGS (Geological-Survey United States) y EPA (United States Environmental Protection Agency).

Con base en los datos obtenidos para los dos meses de muestreo se obtuvo que los parámetros presentan distribuciones asimétricas ($\nu_1 \neq 0$) tanto de izquierda como de derecha con rangos entre 0.4 ± 0.1 mg/L (para el ión cloro) y 276.1 ± 178.5 mg/L (TDS) y un %CBE medio absoluto de $7.2 \pm 2.3\%$ para los meses analizados.

Al comparar los resultados obtenidos con el capítulo II de la Resolución 2115 de 2007 realizada por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) de Colombia, por medio del cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, las muestras de agua cumplen con la mayoría de los requerimientos para el consumo humano, a excepción del análisis Hierro y la alcalinidad total para el 30% de los pozos en el mes de octubre, los cuales superan los límites máximos admisibles. Los resultados obtenidos,

referentes a la concentración de Plomo (Pb) en las muestras estudiadas, no permiten hacer comparación con la normatividad estudiada dado que los valores obtenidos se encuentran por debajo de los límites de detección del equipo (Límite de detección inferior < 0.5 mg Pb/L). Con base en estos resultados, para la potabilización de este tipo de agua se recomienda que en los pozos muestreados se realice tratamiento convencional y la determinación de parámetros microbiológicos para las mismas.

A su vez, se compararon los resultados obtenidos con en el capítulo IV del Decreto 1594 de 1984, y en específico con el artículo 40 del presente decreto el cual consigna los criterios admisibles para el uso agrícola, determinando que las muestras analizadas para los dos periodos muestreados no superan los valores máximos establecidos a excepción de los elementos Fe (80% de puntos de muestreo para julio y octubre) y Cu (totalidad de los pozos para julio y octubre). Al determinar los parámetros e indicadores según el parágrafo 2 del presente decreto para interpretar la calidad de agua para irrigación, se encuentra que las muestras estudiadas no son recomendadas para riego debido que presentan clasificación condicionada o no recomendada en uno o más indicadores. Para valores de TDS (restricción ligera a moderada 10% en los meses muestreados), para el carbonato sódico residual (10% condicionados y 30% no recomendables para julio y 30% condicionados y 20% no recomendables para octubre), de Salinidad Efectiva (40% no recomendada para el mes de julio y 10% no recomendada para octubre) y Porcentaje de Sodio posible (90% no recomendado para julio y octubre).

Al determinar las facies hidroquímicas presentes en la cuenca del Río Chicú, se determinan 4 grupos con características similares. El subgrupo G1, conglomerada aguas con facies hidroquímicas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas, en el cual se presenta el pozo P-Te-10 (Mg-Na-SO₄-HCO₃) para el mes de julio producida por una marcada interacción de las aguas recargadas de origen meteórico con los sedimentos suprayacentes al acuífero (formaciones Labor – Tierna, Conejo y Guaduas) que se encuentran en las faldas de la montaña, los cuales generan una modificación en la composición química de las aguas extraídas en la zona. El subgrupo G2, son aguas con facie hidroquímica clorurada y/o sulfatada sódica, extraídas de los pozos P-Te-04 (Na-SO₄-HCO₃) y P-Ta-13 (K-Ca-Na-SO₄-HCO₃) (julio) y Al-Te-02 (Na-Ca-SO₄-HCO₃), P-Te-04 (Na-HCO₃-SO₄), P-Te-09 (Na-SO₄-HCO₃) y P-Ta-13 (K-Ca-Na-SO₄-HCO₃) (segundo muestreo), ubicadas en la zona de descarga y una zona cercana al área de recarga N de la cuenca, que exhiben un mayor tiempo de tránsito a través de los sedimentos del acuífero y una evolución aniónica siguiendo la secuencia de Chevotareb.

El subgrupo G3, son aguas con facie hidroquímica bicarbonatada cálcica y/o magnésica a la cual pertenecen el pozo P-Te-07 (Ca-HCO₃) (julio/14) y los pozos P-Te-06 (Ca-Na-HCO₃), P-Te-07 (Ca-Na-HCO₃) y P-Te-10 (Mg-Na-Ca-HCO₃-SO₄) (octubre/14) situados al N-NE de la cuenca, sobre las zonas potenciales de recarga obteniendo aguas ricas en iones bicarbonato, calcio y magnesio, debido a su origen meteórico y corto tiempo de residencia. Por último, el subgrupo G4, con facie hidroquímica bicarbonatada sódica, obtenida de los pozos Al-Te-02 (Na-Ca-HCO₃), P-Te-05 (Na-HCO₃), P-Te-06 (Na-HCO₃), P-Te-09 (Na-HCO₃-SO₄), P-Te-11 (Na-

HCO₃-SO₄) y P-Ta-12 (Na-HCO₃) (julio/14) y P-Te-05 (Na-Mg-HCO₃-SO₄), P-Te-11 (Na-HCO₃) y P-Ta-12 (Na-HCO₃) (octubre/14); dispersos sobre la cuenca media y baja, con el predominio del ión bicarbonato y del catión sodio dadas las características sedimentarias de la cuenca que permiten el intercambio catiónico reverso.

Al analizar el comportamiento hidroquímico de la zona de estudio a través del uso de relaciones iónicas, se determina una independencia lineal entre las variables ($-0.5 \leq r \leq 0.5$) a excepción de las relaciones Na⁺ - HCO₃⁻ ($r_{Jul} = 0.89$; $r_{Oct} = 0.74$), K⁺ - SO₄²⁻ ($r_{Jul} = 0.84$; $r_{Oct} = 0.89$), NO₃⁻ - Cl⁻ ($r_{Jul} = 0.87$), Mg²⁺ - HCO₃⁻ ($r_{Jul} = 0.71$; $r_{Oct} = 0.71$) y Ca²⁺ - HCO₃⁻ ($r_{Oct} = 0.75$), mostrando que la hidrogeoquímica de la zona estudiada es gobernada mayormente por los iones Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ y HCO₃⁻, presentándose un enriquecimiento respecto a los iones sodio y sulfato y un empobrecimiento de iones magnesio y calcio, aludido al intercambio catiónico que se produce entre la matriz sedimentaria de carácter arcilloso con el agua subterránea.

Este comportamiento fue confirmado a través del uso de indicadores hidroquímicos, los cuales sugerían que el intercambio catiónico es un factor probable en la hidroquímica del acuífero estudiado cuyo comportamiento es reverso; existe un intercambio entre los cationes Na⁺ y K⁺ presentes en la roca huésped y el Ca²⁺ y Mg²⁺ presente en el agua. En torno al enriquecimiento y evolución iónica del acuífero se encuentra que esta es producida por la meteorización y disolución de silicatos presentes en la matriz arcillosa que conforma los sedimentos en el acuífero estudiado, además de la disolución de minerales de carbonato y sulfato. Esta disolución de minerales de carbonato, permite la meteorización y solución de la dolomita en el sistema dado que es facilitada por la presencia del ácido carbónico producido por los procesos de equilibrio de las especies carbonatadas.

Con el fin de ampliar la información obtenida por el muestreo fisicoquímico se utilizaron técnicas estadísticas multivariantes que permitieron identificar los factores más importantes que explican la variabilidad de los datos. A través del análisis de conglomerados jerárquico y de componentes principales, se evidencia que el principal proceso que controla la hidrogeoquímica de la cuenca son los de intercambio catiónico reverso en los que intervienen los iones bicarbonato, sulfato, sodio, calcio y magnesio seguido de los procesos conjuntos del enriquecimiento iónico del que sufre el agua a medida que transita e interacciona con los sedimentos del acuífero, corroborado por el aumento en la concentración de TDS, Fe y Cu a favor del gradiente hidráulico.

En torno al ión N-NO₃⁻, clásico indicador de impacto causado por actividades agrícolas, presenta un comportamiento disímil entre los dos periodos de estudio con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) producto del comportamiento hidrogeológico en la zona. Se observa un aumento en la concentración en el mes de octubre en comparación con el mes de julio (valores máximos: 1.60 mg N- NO₃⁻/L julio; 4.50 mg N- NO₃⁻/L octubre), que se concentra en la zona plana de la cuenca. Este aumento es explicado por la disminución de los niveles freáticos que se producen en el mes de octubre que causa una reconcentración de este

anión, sumado al inicio e intensificación de cosechas, que trae consigo el uso de agroquímicos y el aumento de lluvias por la llegada del periodo húmedo favoreciendo la recarga de agua rica en nitrato. Aunque las concentraciones presentes de nitrato en la cuenca no sobrepasan los límites permisivos, su presencia en el área plana de la cuenca es indicador de impacto antropico leve al cual se debe hacer un continuo seguimiento con el fin de evidenciar si los procesos de dilución manifestados en el mes de julio son ciclicos, pudiendo ser considerados como un proceso de autoremediación en la cuenca.

Por parte de los elementos Cu y Pb, no se evidencia que se relacionen a algún proceso antrópico dado que sus concentraciones homogéneas temporal y espacialmente no superan los 0.65 ± 0.10 mg Cu/L y $<0.5 \pm 0.0$ mg Pb/L, pudiendo interpretar que su presencia en la cuenca se debe a procesos naturales de meteorización y disolución de minerales ricos en estos elementos originados en la zona de recarga por interacción entre el agua y los sedimentos que conforman la zona de montaña que limitan al acuífero estudiado. Especialmente, se observa una correlación entre el comportamiento hidrogeológico de la cuenca y los procesos que alteran su comportamiento natural y las características hidroquímicas de la zona. Sobre las zonas de recarga se presentan características de pH ácido producto de la incorporación al sistema de aguas bicarbonatadas que generan en la cuenca procesos de equilibrio ácido – base y equilibrios de especies carbonatadas influenciados por la dilución de minerales carbonatados cálcicos y magnésicos. Se evidencia a su vez enriquecimiento iónico relacionado con los flujos regionales presentes en el acuífero.

Se confirma el origen de los elementos Cu y Fe que nacen desde las zonas de recarga donde se presenta interacción con sedimentos pertenecientes al Grupo Guadalupe (Formación Arenisca Dura). A su vez se evidencia la presencia de una zona de flujo lento ubicada al NE de la cuenca determinada por sus altas concentraciones de TDS, Na, Ca, SO_4^{2-} y Fe en comparación al resto de la cuenca que hacen que estas aguas presenten características similares a las encontradas en aguas evolucionadas como son las aguas de descarga. En definitiva, se evidencia una zona de recarga lateral ubicada al SE de la cuenca, que se hace evidente en el mes de octubre al presentar una elevada precipitación (> 105 mm) y por sus concentraciones de HCO_3^- y pH similares a la zona de recarga definida al N de la cuenca.

Con base en los datos obtenidos, se evidencian zonas hidrogeológicamente problemáticas en torno a la explotación en la zona centro de recarga donde los abatimientos han superado los 90 m causado por la sobre explotación del recurso. Una segunda zona problemática se presenta al NE de la cuenca donde se están generando abatimientos mayores a 30 m, producidos por sectores de cultivo de flores mayormente, cuyos regímenes de extracción son continuos excediendo las 24 horas continuas. Hidroquímicamente, la cuenca no presenta zonas críticas en torno a impacto antrópico gracias a sus características arcillosas que en la mayoría de la cuenca le proveen un grado de vulnerabilidad moderado a bajo, no obstante la presencia de ión nitrato en la zona plana de la cuenca en meses de reducción de niveles freáticos (octubre) sobre la zona plana de la cuenca, lugar donde se presenta la mayor conglomeración de

parcelas dedicadas a la agricultura y pastoreo y que en dicho mes incrementa su actividad, hacen que esta zona problemática deba ser vigilada, con el fin de evidenciar su comportamiento en meses posteriores donde se produce un aumento en la explotación por la llegada del periodo seco a la zona (diciembre - enero).

Para finalizar, la cuenca no presenta un grado de alteración antrópica hidroquímica elevada producto de sus características geológicas, donde los mayores efectos se evidencian en meses de reducción de niveles freáticos, concordantes con meses húmedos donde los procesos agrícolas se aceleran. También se observa que la cuenca muestra procesos de dilución que pueden ser considerados como fenómenos de autorregulación y autorremediación que tienen que ser confirmados a través del seguimiento de la cuenca en meses posteriores de déficit y exceso hídrico (enero y abril, respectivamente). A su vez los procesos de explotación y sobre-explotación generados por las actividades agrícolas y ganaderas que conforman el uso mayoritario del suelo en la cuenca, son las actividades económicas más significativas que producen alteraciones representativas en los flujos regionales y locales y que su consecuencia a largo plazo pueden ser adversas en torno a la adquisición de este recurso para las habitantes de la región.

10. RECOMENDACIONES

- Realizar un nuevo inventario de pozos y aljibes que explotan la cuenca con el fin de mejorar la estimación de la descarga que producen estos sobre el recurso hídrico subterráneo, lo cual permitirá mejorar la precisión del balance hídrico para la cuenca.
- Aumentar la densidad de pozos analizados, con el fin de mejorar la resolución del análisis para poder determinar los procesos que controlan la variabilidad hidroquímica en zonas importantes como son las de recarga al NNW y zonas de tránsito lento al NE de la cuenca, así como zonas de recarga lateral importantes ubicadas al SE de la zona de estudio.
- Realizar los muestreos utilizando testigo de muestreo y en el laboratorio patrones internos con el fin de tener herramientas para el análisis de datos, que permitan corroborar la validez de los datos obtenidos.
- Determinar nuevas variables fisicoquímicas como compuestos orgánicos persistentes (e.g. pesticidas), microorganismos (e.g. coliformes totales y fecales) que permitan identificar nuevas zonas críticas en términos de calidad hidroquímica.
- Realizar muestreos en los meses de Enero – Diciembre (periodo seco) y Abril – Mayo (periodo húmedo), los cuales permitan corroborar los datos encontrados en torno a los procesos de dilución y reconcentración iónica que se generan en el acuífero estudiado, con el fin de comprobar la existencia de un fenómeno de autorremediación en la cuenca.
- Datar por medio de isótopos la edad del agua extraída en el acuífero, con el fin de determinar las zonas donde se producen las recargas de acuíferos infrayacentes.
- Generar sobre la cuenca una red de monitoreo con el fin de obtener datos continuos en términos espaciales y temporales de niveles de agua y datos sobre variables fisicoquímicas.
- Realizar la determinación *in situ* de la variable “Alcalinidad Total”, la cual provee información sobre la concentración de iones carbonato y bicarbonato, con el fin de reducir el porcentaje de error del balance iónico.
- Actualizar los parámetros hidráulicos para la cuenca que junto a una continua obtención de datos hidrogeológicos e hidroquímicos permitan actualizar los modelos hidrogeológicos existentes para la cuenca media del Río Bogotá.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. ABRIL, M.L., GONZÁLEZ, C.A. (s.f.) Zonificación por Balance Hídrico de la Cuenca Alta y Media del Río Bogotá, utilizando Sistemas de Información Geográfica [en línea]. Recuperado el 5 de mayo de 2014 en <http://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc99/ponencias/ponencia26.html>
2. ACUERDO 31 (2005, 19 de Septiembre) [en línea]. Colombia: Corporación Autónoma Regional (CAR). Disponible en: <http://www.car.gov.co/?idcategoria=1698>
3. AGÜERO, J., PUJOL, R. (s.f.) Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica [en línea]. Recuperado el 9 de septiembre de 2014 en http://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuiferoscr.htm
4. ALCALDÍA MUNICIPAL DE TABIO (2009) Esquema de Ordenamiento Territorial. Tabio, Cundinamarca, Colombia.
5. ALMOROX. J. (s.f.). Métodos de Estimación de las evapotranspiraciones ETP y Etr [en línea]. Recuperado el 2 de abril de 2014 en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>
6. AL-KHASHMAN, O.A. (2005) Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan. *Atmospheric Environment*, 39, 6175–6183.
7. ALMASRI, M.N. AND KALUARACHCHI, J.J. (2005) Multi-criteria decision analysis for the optimal management of nitrate contamination of aquifers. *Journal of Environmental Management*, 74, 365–381
8. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION [APHA], AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION [AWWA], WATER ENVIRONMENT FEDERATION [WEF] (2005a). 3111 Metals by Flame Atomic Absorption Spectrometry C. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (21a Ed.). Port City Press, Baltimore, Maryland, E.E.U.U.
9. _____ (2005b). 4500-Cl⁻ Chloride C. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (21a Ed.). Port City Press, Baltimore, Maryland, E.E.U.U.
10. _____ (2005c). 4500-SO₄²⁻ Sulfate D. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (21a Ed.). Port City Press, Baltimore, Maryland, E.E.U.U.
11. _____ (2005d). 2320 Alkalinity A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (21a Ed.). Port City Press, Baltimore, Maryland, E.E.U.U.
12. _____ (2005e). 4500-NO₃⁻ Nitrogen B. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (21a Ed.). Port City Press, Baltimore, Maryland, E.E.U.U.
13. _____ (2005f). 4500 Preliminary Treatment of Samples E. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (21a Ed.). Port City Press, Baltimore, Maryland, E.E.U.U.
14. AUGE, M. (2004) Vulnerabilidad de acuíferos y métodos [en línea]. Universidad de Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 9 de septiembre de 2014 en

<http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/CEPIZ-GTZ/I-Vulnerabilidad-Conceptos-Auge.pdf>

15. AYERS, R.S., WESTCOT, D.W. (1985). Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, California, E.E.U.U.
16. BERNARD, N., BARBARA, R., KERIE, H., DENNIS, H. (1998) A National Look at Nitrate Contamination of Ground. *Water Conditioning and Purification*, 39 (12): 76-79.
17. BLASCO, F. Y RUBIA, J. (1973). Guía para la clasificar las aguas en relación con su calidad para el riego. Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA). Madrid, España: 322.
18. BOHLING, G. (2005). Kriging. [en línea]. University of Kansas, E.E.U.U. Recuperado el 2 de Mayo de 2014 en: <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Kriging.pdf>
19. CABALLERO, W.J. (2011). Kriging Universal para Datos Funcionales [en línea]. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística. Cartagena de Indias, Colombia. Recuperado el 17 de Enero de 2015 en <http://www.bdigital.unal.edu.co/6329/1/1832260.2011.pdf>
20. CÁCERES, C., ETAYO-SERNA, F. (1969). Bosquejo Geológico de la región del Tequendama. Guía de la excursión pre-congreso. Ponencia presentada en el I Congreso Colombiano de Geología: 5 – 22.
21. CADAHIA, C. (2005) Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Madrid, España: Mundi-Prensa Ed.
22. CARBONELL A. (1993). Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council. National Academy Press: 1-204.
23. CASAS, N.M., DOMÍNGUEZ, M.A., VELA, M.P. (2011). Influencia del uso de suelo y vegetación en el balance Hídrico en tres microcuencas de Tarimoro Guanajuato [en línea]. Recuperado el 2 de abril de 2014 en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011_cnch2_dina_rivas_casas.pdf
24. CASTILLO, A, OSORIO, Y., VENCE, L. (2009) Evaluación de la calidad microbiológica y fisicoquímica de aguas subterráneas ubicadas en los municipios de La Paz y San Diego, Cesar. Universidad Popular del Cesar – Corporación Autónoma del Cesar (Corpocesar), Cesar, Colombia.
25. CHOW, MAIDMENT, MAYS (1984). Hidrología Aplicada, Cap. 3, Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia.
26. CONSEJO REGIONAL DE PLANIFICACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL CENTRO ORIENTE [CORPES] (1998) Informe de uso y cobertura de suelo. Ingeominas, Santa fé de Bogotá, Colombia.
27. CONTRALORÍA GENERAL DE LA REPUBLICA (2011) Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente (Cap. V). Colombia
28. CORNELL SOIL AND WATER LAB - ECOHYDROLOGY GROUP (2011). Thornthwaite-Mather for Monthly Watershed Yield [en línea]. Cornell University. Recuperado el 1 de abril de 2014 en: <http://www.hydrology.bee.cornell.edu/BEE3710Handouts/TM2011.pdf>

29. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA [CAR] (1989) Ampliación Distrito de Riego la Ramada: Canal Chicú. Bogotá, Colombia.
30. _____ (1990). Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá-Proyecto. Informe de avance. Bogotá, Colombia: Oficina de Comunicaciones CAR
31. _____ (2008). Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y zona crítica. Bogotá, Colombia: Oficina de Comunicaciones CAR
32. CAR, SGC y JICA (2012) Contrato 634 de 2011: Implementar y efectuar seguimiento a un proyecto piloto de red de monitoreo automático de niveles piezométricos y calidad de agua subterránea, así como realizar la campaña de monitoreo y rediseño de la red de niveles piezométricos y de calidad de agua subterránea en la Sabana de Bogotá. Geocing, Colombia.
33. CORZO, J. (2007) El agua como disolvente [en línea]. Universidad de la Laguna, España. Recuperado el 13 de octubre de 2014 en <http://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnocovalentes/hidrofobicas.pdf>
34. CUSTODIO, E. (1995). Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. II Seminario Hispano – Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica, 11: 99-122.
35. CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R. (1976). Hidrología Subterránea. Ed. Omega S.A, Primera Edición. Barcelona.
36. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA [DANE] (2001) Segunda Separata de Resultados [en línea] Recuperado el 14 de Febrero de 2014 en https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/enda/ena/papa_Separata_No2.pdf
37. _____ (2005a). Censo General 2005: Perfil, Tabio, Cundinamarca [en línea]. Colombia. Recuperado el 9 de enero de 2014 en https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/25785T7T000.PDF
38. _____ (2005b). Censo General 2005: Perfil, Tenjo, Cundinamarca [en línea]. Colombia. Recuperado el 9 de enero de 2014 en https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/25799T7T000.PDF
39. _____ (2011) Censo de Fincas Productoras de Flores En 28 municipios de la Sabana de Bogotá y Cundinamarca [en línea], Departamento de Cundinamarca. Bogotá, Colombia. Disponible en: http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=307&Itemid=124
40. _____ (2014). Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020 [en línea]. Colombia. Recuperado el 9 de enero de 2014 en http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/Municipal_area_1985-2020.xls
41. DAVIS, J.C. (2002) Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons Inc., NY.

42. DE BERMOUDES, O., QUIROZ, M. (2002). Contribución a la Hidrogeología de la Sabana de Bogotá, Colombia. Manejo Integrado de Aguas Subterráneas: Un Reto para el Futuro: 107 – 118.
43. DE BERMOUDES, O., VELANDIA, F. (2010). Hidrogeología Regional de la Sabana de Bogotá [en línea]. Ingeominas, Universidad de Antioquia, Universidad Industrial de Santander, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 10 de Marzo de 2014 en http://www.researchgate.net/profile/Francisco_Velandia/publication/249315401_Hidrogeologia_regional_de_la_Sabana_de_Bogot/links/00b4952c04bcf14668000000.pdf
44. DE LAS SALAS, G., GARCÍA, C. (2000) Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la Cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 24(91): 2005 - 218
45. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA [DANE] (2001) Censo Nacional del cultivo de Papa, Departamento de Cundinamarca [en línea]. Bogotá, Colombia. Disponible en: http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=307&Itemid=124
46. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE, HIDROGEOLOGÍA Y PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO [PNUD] (2009) Elaboración del Modelo Hidrogeológico para los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. [en línea] Observatorio Ambiental de Bogotá, Colombia. Recuperado el 25 de abril de 2014 en http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/elaboracion_del_modelo_hidrogeologico_para_los_acuiferos_de_santa_fe_de_bogota_dc.pdf
47. DE PORTA DE J. (1974). Lexique Internationale Stratigraphique. Amérique Latina. Vol. V. CNRS. París
48. DOZIER, M., MCFARLAND, M., LESIKAR, B. (s.f.) Problemas del agua potable: El cobre [en línea]. Texas A&M University, E.E.U.U. Recuperado el 21 de octubre de 2014 en <http://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/15472scopper.pdf>
49. DRAY, S., DUFOUR, A.B. (2007): The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. Journal of Statistical Software. 22(4): 1-20.
50. DUNNE, T., LEOPOLD, L. (1978). Water in environmental planning. Freeman 86. San Francisco, USA. 819 pp.
51. EDMUNDS, W.M., SMEDLEY, P.L. (2000) Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. Applied Geochemistry. 15 (6): 737 -752.
52. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [EPA] (1991) A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination. Preliminary document: 1-21.
53. _____ (2006) Nitrates and Nitrites. TEACH chemical summary [en línea]. E.E.U.U. Recuperado el 20 de octubre de 2014 en http://www.epa.gov/teach/chem_summ/Nitrates_summary.pdf
54. _____ (2013) Basic Information about Copper in Drinking Water [en línea]. E.E.U.U. Recuperado el 21 de octubre de 2014 en <http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/copper.cfm>

55. _____ (2014) Basic Information about Lead in Drinking Water [en línea]. E.E.U.U. Recuperado el 21 de octubre de 2014 en [http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/lead.cfm#What are EPA's drinking water regulations for lead?](http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/lead.cfm#What%20are%20EPA's%20drinking%20water%20regulations%20for%20lead?)
56. EREÑO, C. (2012) Balance Hídrico. [en línea]. Universidad de Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 2 de abril de 2014 en: <http://www.filo.uba.ar/contenidos/carreras/geografia/catedras/climatologia/sitio/bcehidrico.pdf>
57. ESLAVA, J.A. (1993). Climatología y Diversidad Climática de Colombia. Revista Académica Colombiana de Ciencias. 18 (71): 507 – 538.
58. FOSTER S. (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Comm. on Hydrog. Research. Proceed and Information, 38: 69-86.
59. FOSTER, S., HIRATA, R. (1988) Groundwater pollution risk evaluation assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS, technical manual; Lima, Perú.
60. _____ (1991) Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS: 1-81. Lima.
61. FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M. Y PARIS, M. (2007). Protección de la Calidad del Agua Subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales (2da Ed.). Washington D.C.: Mundi-Prensa Ediciones
62. FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979) Groundwater: Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
63. FRITZ, S.J. (1994) A Survey of Charge-Balance Errors on published Analyses of Potable Ground and Surface Water. Ground Water, 32 (4): 539 – 546.
64. FUNES, H.N. (2004) Métodos Estadísticos en Problemas Espaciales [en línea]. Tesis de Maestría en Estadística Aplicada, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Recuperado el 3 de Mayo de 2014 en: http://editorial.unsa.edu.ar/tesis/funes_hector/tesisfinal.pdf
65. GARRELS, R.M., MCKENZIE, F.T. (1967) Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. In: Equilibrium concepts in natural waters: American Cancer Society, Washington, DC: 222–242.
66. GIDAHATARI (2014) Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea [en línea]. Perú Recuperado el 21 de Abril de 2014 en <http://gidahatari.com/ih-es/protocolo-de-monitoreo-de-calidad-de-agua-subterranea>
67. GLEICK, P. (1993) Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh water resources, New York. E.E.U.U: Oxford University Press.
68. GONZÁLEZ-ABRAHAM, A., FAGUNDO-CASTILLO, J., CARRILLO-RIVERA, J., RODRÍGUEZ-ESTRELLA, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 64 (3): 319-333.
69. GRUPO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS (s.f.) Lección 17. Hidroquímica [en línea] Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (IUPA) - Universidad Jaime I de

Castellón, España. Recuperado el 13 de octubre de 2014 en <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH17.pdf>

70. GÜLER, C., THYNE, G.D., McCRAY, J.E. (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10: 455 – 474.
71. GUTIÉRREZ, H.J. (1991) *Clasificaciones Climáticas*. Bogotá: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.
72. HARTER, T. (2003) Reference: Groundwater Quality and Groundwater Pollution [en línea]. University of California. Division of Agriculture and Natural Resources. E.E.U.U. Recuperado el 21 de octubre de 2014 en <http://groundwater.ucdavis.edu/files/136273.pdf>
73. HELMENS, K., VAN DER HAMMEN, T. (1995) Memoria explicativa de los mapas del Neogéno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá-cuenca alta del Río Bogotá. IGAC. *Análisis Geográficos*. 24: 91-142.
74. HEM, J. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254, E.E.U.U.
75. HERNÁNDEZ, L., HARO, J., MAHLKNECHT, J. (s.f.) Generación de los índices de vulnerabilidad para acuíferos: Comparación de métodos [en línea]. Commissariat a l'Energie Atomique (CEA) - Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). Recuperado el 8 de septiembre de 2014 en <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/HASH018100898c752c0edba cc15c/ag057.pdf?sequence=3>
76. HOORN, K. (1988). Quebrada del Mochuelo, type locality of the Bogotá formation: a sedimentological, petrographical and palynological study: Hugo de Vries Laboratory, Amsterdam.
77. HUBACH, E. (1945). La Región Pnaga Pmapa al Noreste de Choachí (Departamento de Cundinamarca). *Compilación de los Estudios Oficiales en Colombia*. Tomo VI. Servicio Geológico Nacional, Bogotá.
78. _____ (1957). Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Servicio Geológico Nacional. *Boletín Geológico*, 4 (2): 93 – 113.
79. HUERTA, G. (2009) Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en la cuenca del Estero Punitaqui, IV región. Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de Geología. Chile
80. HUSSAIN, M., AHMAD, S.M., ABDERRAHMAN, W. (2008) Cluster analysis and quality assessment of logged water at an irrigation project, eastern Saudi Arabia. *J. Environmental Management*, 86: 297-307.
81. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI [IGAC] (2002) *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca*. Subdirección de Agrología, Bogotá: IGAC
82. INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA [IGME] (1985). La composición química de las aguas subterráneas naturales [en línea]. España. Recuperado el 13 de octubre de 2014 en http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf

83. _____ (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y aplicaciones. Madrid, España: W.G. Mook Ed.
84. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY [IAEA], UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION [UNESCO] (2000) Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle Principles and Applications Water Resources (Vol. 4). Water Resources Programme. Hannover, Alemania.
85. JAIMES, E. (2010) Evaluación y clasificación del agua proveniente de los pozos de exploración de las locaciones de Caño Limón y Caricare de occidental de Colombia (Oxy) para su posible uso como agua de riego para cultivo. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
86. JALALI, M. (2007) Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah Basin in Western Iran. Environ Monit Assess, 130: 347–364
87. JULIVERT, M. (1963). Los rasgos Tectónicos de la Región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de Estructuras. Boletín Geológico, 13 – 14, (415). Bucaramanga.
88. KAISER, H.F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. Educ. Psychol. Meas. 20, 141–151.
89. KAOWN, D., HYUN, Y., GWANG-OK BAE, Y., WHAN OH, C. Y KUN LEE, K. (2012). Evaluation of spatio-temporal trends of groundwater quality in different land uses using Kendall test. Geosciences Journal, 16, (1), p. 65 – 75.
90. KUMAR, M., KUMARI, K., RAMANATHAN, A., SAXENA, R. (2007) A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. Environ Geol, 53: 553–574
91. LABORATORIO AGROAMBIENTAL FRAISORO (2002). Criterios de interpretación de la calidad agronómica de las aguas de riego [en línea]. Villabona, España Recuperado el 21 de octubre de 2014 en <http://www.fraisoro.net/FraisoroAtariaDoku/recomencriteriosdeinterpretacionaguas.pdf>
92. LOBO, D., DONALD, G., OVALLES, F., SANTIBAÑEZ, F., MOYANO, M.C., AGUILERA, R., PIZARRO, R., SANGÜESA, C., URRÁ, N. (s.f.) Guía Metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y El Caribe. CAZALAC y PHI/UNESCO.
93. LOBO-GUERRERO, A. (1992, Octubre). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. Ponencia presentada en la VII Jornada Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia: Sociedad Colombiana de Ingenieros – Sociedad Colombiana de Geotecnia, Bogotá.
94. MAECHLER, M., ROUSSEUW, P., STRUYF, A., HUBERT, M., HORNIK, K. (2014) Cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 1.15.3.
95. MAHLER, R., COLTER, A., HIRNYCK, R. (2007) Nitrate and Groundwater [en línea]. Idaho Agricultural Experiment Station. University of Idaho Extension. Recuperado el 20 de octubre de 2014 en <http://www.cals.uidaho.edu/edcomm/pdf/CIS/CIS0872.pdf>

96. MATVEYEV, A., BASHMAKOVA, O. (1967). Chemical composition of atmospheric precipitation in some regions of the URSS. *Soviet Hydrology, Selected papers*, 5: 480-491.
97. MEDINA, R.D. (2008) Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia. Tesis de Maestría en investigación operativa y estadística. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
98. MINISTERIO DE AGRICULTURA (1984) Decreto 1594. Colombia
99. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL [MAVDT] (2007) Resolución 2115. Colombia.
100. MIRANDA, D., CARRANZA, C., ROJAS, C.A., JERÉZ, C.M., FISCHER, G., ZURITA, J. (2008) Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2 (2): 180 – 19.
101. MONTERO, R. (2011) Conceptos básicos de Hidrogeología [en línea]. Universidad Central de Venezuela. Venezuela. Recuperado el 19 de Agosto de 2014 en <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wp-content/uploads/2011/07/basicos.pdf>
102. MONTOYA, D.M., REYES, G.A. (2005). Geología de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería
103. MURRAY, K., WADE, P. (1995) Checking anion – cation charge balance of water quality analyses: Limitations of traditional method for non-potable waters. *Water SA*, 22 (1): 27 - 34
104. NORTH CAROLINA PUBLIC HEALTH (2009). Protéjase del plomo en el agua de su pozo [en línea]. División de Salud Pública de Carolina del Norte, E.E.U.U. Recuperado el 21 de octubre de 2014 en http://epi.publichealth.nc.gov/oeo/docs/El_Plomo_WellWaterFactSt.pdf
105. OBRAS SANITARIAS MGP S.E. (2013) Procedimiento general para el muestreo de agua subterránea en pozos de monitoreo [en línea] Mar del Plata, Argentina. Recuperado el 21 de Abril de 2014 en <http://www.osmgp.gov.ar/osse/PDF/Hidricos/Muestreodepozosdemonitoreo.pdf>
106. ORTIZ, V.B. & ORTIZ. C.A. (1990). Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento De Suelos. Séptima Edición. Chapingo, México
107. PÉREZ, G., SALAZAR, A. (1978). Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. *U. Nal. Geol. Col.*, 10: 7 – 113.
108. PÉREZ, L. (2011). Manual para determinar la calidad del Agua para riego agrícola [en línea]. Universidad Veracruzana, México. Recuperado el 30 de octubre de 2014 en <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31418/1/josemanuelperezleon.pdf>
109. R CORE TEAM (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Tomado el 9 de diciembre de 2013 en <http://www.R-project.org/>.
110. RENAU, A. (2010) Elementos minoritarios y traza en la masa de agua subterránea 080.021 (Plana de Castelló). Origen y procesos asociados. España: Universitat Jaume I, Departamento de Ciencias agrarias y del Medio Natural, Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas.

111. RENZONI, G. (1962). Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y sureste de Bogotá. Servicio Geológico Nacional. Boletín Geológico, 1 – 3: 59 – 79.
112. REVELLE, W. (2013) Psych: Procedures for Personality and Psychological Research, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA. Tomado el 9 de diciembre de 2013 en <http://CRAN.R-project.org/package=psych> Version = 1.3.2
113. RIAÑO, N (2009) Sistema de Gestión Ambiental de Tabio [en línea] Alcaldía Municipal de Tabio, Cundinamarca, Colombia. Recuperado el 23 de Marzo de 2014 en http://www.tabio-cundinamarca.gov.co/Nuestros_planes.shtml?apc=gbxx-4-&x=1818226
114. RIAÑO, O, BÁNQUEZ, J., MORALES, H. (2005) Análisis geoestadístico para mejorar el aprovechamiento de aguas subterráneas. Apuntes Científicos Uniandinos, (6): 13 – 21.
115. RICHARDS, L.A. (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA-SCS Agric. Handbook, 60. U.S. Govt. Print Office Washington D.C.
116. ROBLES, E., MARTÍNEZ, C., HINCAPIÉ, G., ÁLVAREZ, A. (1991). Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá; Sector Tibito – Salto de Tequendama y Oriente Bogotano. Bogotá: Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química
117. ROBLES, E., SÁENZ, J.S. (1990). Hidrogeología de la Cuenca del Río Chicú, Sabana de Bogotá. Bogotá: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras.
118. RODRIGUEZ-ITURBE, I. (2000). Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. Water Resources Research, 36(1): 3-9
119. SÁNCHEZ, F.J. (2011) Conceptos Fundamentales de Hidrogeología [en línea]. Universidad de Salamanca. España. Recuperado el 19 de Agosto de 2014 en http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf
120. _____ (2012) Evolución Geoquímica de las Aguas Subterráneas [en línea]. Universidad de Salamanca. España. Recuperado el 13 de octubre de 2014 en http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf
121. SANFORD, R.F., PIERSON, C.T., CROVELLI, R.A. (1993) An objective replacement method for censored geochemical data. Math Geol, 25: 59 – 80.
122. SECRETARIA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA (2002) Estadísticas Agropecuarias. Oficina de Planeación Agropecuaria – URPA, 18: 1- 86.
123. SERVICIO GEOLÓGICO NACIONAL [SGC] (1997) Geoquímica de Metales Pesados en Suelos de la Cuenca del Río Bogotá. Bogotá, Colombia.
124. SIAM – CAR (2013) Inclusión Del Balance Hídrico, Implementación Del Modelo Hidrogeológico Y Capacitación En Modflow. Corporación Autónoma Regional, Bogotá, Colombia.
125. SUBYANI, A.M., AL AHMADI, M.E. (2010) Multivariate Statistical Analysis of Groundwater Quality in Wadi Ranyah, Saudi Arabia, JAKU: Earth Sci., 2 (2): 29-46.
126. TABACHNICK, B. G., FIDELL, L. (2006) Using Multivariate Statistics (5th Ed.). Allyn & Bacon, NY.
127. THORNTHWAITE, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. Geogr Rev. 38: 55–94

128. THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R. (1955) The water balance. Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, Climatology, 8 (1): 104.
129. TÓTH, J. (2000) Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones: Boletín Geológico y Minero, 111: 9-25.
130. UNIÓN DE INDUSTRIAS DE PLOMO [UNIPLOM] (2004). El Plomo. Hechos y realidades [en línea]. España. Recuperado el 21 de octubre de 2014 en <http://www.uniplom.es/fuentes.htm>
131. UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION [UNESCO] (s.f.) Ecohydrology for sustainability [en línea] International Hydrological Programme, Division of Water Sciences. Recuperado el 5 de Febrero de 2014 en <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002108/210826e.pdf>
132. VAN DER HAMMEN, T.H. (1958). Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano Continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos. Boletín Geológico, 6: 67 - 128.
133. _____ (1973). El cuaternario de Colombia. Elsevier Scientific Publishing Company, 1 – 4, Amsterdam.
134. _____ (1988). Plan Ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
135. VELANDIA, F., DE BERMOUDES, O. (2002). Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá. UIS. Boletín de Geología, 24 (39): 37 – 48. Bucaramanga, Colombia.
136. VELOZA, J. (2013) Sistema de modelamiento hidrogeológico del distrito capital Bogotá. Secretaria distrital de Ambiente, Subdirección del recurso hídrico y del suelo, Colombia.
137. VOSE, J., SUN, G., FORD, C., BREDEMEIER, M., OSTSUKI, K., WEI, A., ZHANG, Z. y ZHANG, L. Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs? [en línea] Ecohydrology. Wiley Online Library. Recuperado el 3 de febrero de 2014 en wileyonlinelibrary.com, DOI: 10.1002/eco.193
138. VRBA J. & A. ZAPOROZEC (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise. Hannover, 16: 1-131.
139. YIDANA, S.M., BANOENG-YAKUBO, B., AKABZAA, T.M. (2010) Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. Journal of African Earth Sciences, 58: 220–234.
140. YIDANA, S.M., OPHORI, D., BANOENG-YAKUBO, B. (2008) Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian basin: the Afram plains area. Ghana Environ Geol, 55: 1213–1223.
141. YIDANA, S.M, YIDANA, A. (2009) Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. Environ Earth Sci, 59:1461–1473.

1. ANEXO 1.

**SERIES PLUVIOMÉTRICAS
PARA LAS ESTACIONES
UBICADAS EN LA CUENCA DEL
RÍO CHICÚ**

ID E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)

ESTACIÓN : 21201210 HATO EL

SISTEMA DE INFORMACION
NACIONAL AMBIENTAL

LATITUD 0447 N TIPO EST PM DEPTO CUNDINAI FECHA INSTALACIOI 1977-FEB
LONGITUD 7412 W ENTIDAD 01IDEAM MUNICIPI(TENJO FECHA SUSPENSION
ELEVACIC 2560 m.s.n.m. REGIONAI 11 BOGOTA CORRIEN' BOGOTÁ

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	45.5	27.0	29.0	76.4	119.4	26.9	96.3	39.9	50.9	152.7	53.4	11.9	729.3
1988	35.0	20.1	45.7	98.9	49.4	146.5	78.4	61.8	85.8	119.5	119.7	98.4	959.2
1989	29.3	43.1	91.1	68.2	98.0	58.1	39.2	19.3	65.6	75.8	58.8	54.8	701.3
1990	60.4	56.1	59.7	157.6	95.3	17.2	53.9	29.8	44.9	135.3	111.9	61.4	883.5
1991	21.5	37.6	138.7	93.3	72.8	25.7	51.3	29.9	42.3	26.0	135.4	29.1	703.6
1992	43.4	42.3	10.1	38.9	60.5	27.7	47.9	42.2	49.1	7.9	115.1	81.2	566.3
1993	33.8	50.2	91.9	89.4	107.5	33.5	50.0	23.8	75.3	45.6	185.9	38.6	825.6
1994	44.0	93.9	103.2	101.1	72.1	54.1	24.5	43.0	28.9	114.2	140.9	3.9	823.8
1995	5.4	34.5	75.0	80.3	127.5	61.6	57.6	112.5	68.7	62.8	32.1	88.5	806.5
1996	46.8	29.8	95.1	114.9	86.6	105.6	79.5	38.4	51.0	144.5	54.5	38.6	885.3
1997	50.4	14.7	65.8	73.9	60.1	82.4	31.8	9.5	17.9	52.6	78.0	0.2	537.3
1998	1.6	62.4	37.5	75.4	150.2	50.1	76.4	46.5	74.9	133.3	77.0	79.3	864.6
1999	58.2	109.2	91.8	76.5	91.6	140.2	28.1	61.7	99.9	131.7	92.5	112.3	1093.7
2000	16.1	93.5	81.2	39.0	76.4	53.9	84.8	57.5	138.7	79.7	39.4	21.9	782.1
2001	39.7	29.3	118.6	17.3	136.0	35.9	37.7	16.6	70.8	19.2	35.5	104.9	661.5
2002	4.7	17.0	111.0	132.7	83.4	61.3	23.0	21.3	59.3	89.1	33.6	42.2	678.6
2003	0.8	50.9	84.2	137.2	48.4	66.6	37.1	27.3	58.9	94.4	104.4	46.0	756.2
2004	55.5	55.2	83.4	156.6	105.0	48.4	59.8	26.6	141.2	158.5	68.5	52.2	1010.9
2005	14.9	27.1	49.2	81.4	132.1	33.7	58.6	80.3	89.1	231.7	57.9	50.4	906.4
2006	43.3	28.4	117.6	148.9	229.2	113.8	26.3	18.1	40.3	129.5	81.2	46.6	1023.2
2007	9.8	13.9	56.0	117.4	102.7	86.3	43.1	72.6	27.5	191.7	64.8	91.2	877.0
2008	24.0	39.2	93.9	116.0	117.2	111.3	84.5	90.0	55.5	117.1	161.2	23.2	1033.1
2009	41.5	59.3	129.9	83.3	39.2	92.0	29.7	39.6	20.5	127.5	68.1	8.8	739.4
2010	5.5	49.2	15.2	134.6	133.3	126.3	195.2	78.9	75.7	91.1	149.7	81.6	1136.3
2011	35.0	71.7	167.9	167.0	148.6	109.9	71.2	32.8	64.0	154.6	204.0	77.8	1304.5
2012	44.1	63.7	120.2	181.9	101.6	34.1	91.5	47.1	33.4	89.8	44.9	33.9	886.2
MEDIA	31.2	46.9	83.2	102.2	101.7	69.4	59.9	44.9	62.7	106.8	91.1	53.0	852.9
MAXIMO	60.4	109.2	167.9	181.9	229.2	146.5	195.2	112.5	141.2	231.7	204.0	112.3	1304.5
MINIMO	0.8	13.9	10.1	17.3	39.2	17.2	23.0	9.5	17.9	7.9	32.1	0.2	537.3
SD	18.7	24.9	38.5	41.6	40.6	38.2	35.5	25.5	30.9	52.9	48.3	32.4	177.4
SE	10.6	14.1	21.8	23.5	23.0	21.6	20.1	14.4	17.5	29.9	27.3	18.3	100.4

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)

ESTACIÓN : 21205980 PROVIDENCIA GJA

SISTEMA DE INFORMACION
NACIONAL AMBIENTAL

LATITUD 0452 N TIPO EST PM DEPTO CUNDINAI FECHA INSTALACION 1978-JUN
LONGITUD 7409 W ENTIDAD 01IDEAM MUNICIPIO TENJO FECHA SUSPENSION
ELEVACION 2575 m.s.n.m. REGIONAL 11BOGOTA CORRIENTE SUBACHOQUE

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	32.7	11.5	29.3	67.2	129.4	15.3	74.7	28.9	59.3	135.8	39.2	20.5	643.8
1988	12.3	38.8	12.8	96.9	78.6	100.6	75.4	89.5	117.1	131.9	197.7	101.0	1052.6
1989	10.5	29.6	57.4	23.9	174.8	30.9	23.3	32.0	61.5	70.2	46.5	28.3	588.9
1990	25.3	35.1	79.5	155.8	69.9	41.2	34.7	33.7	51.8	132.8	61.6	67.1	788.5
1991	8.9	18.9	153.3	76.6	53.9	22.8	57.7	48.9	96.0	42.7	96.6	50.3	726.6
1992	15.9	20.1	31.5	34.7	53.3	19.7	53.4	39.6	43.6	50.2	76.2	42.1	480.3
1993	10.3	21.9	51.6	102.1	113.8	52.5	69.7	31.9	55.6	63.4	108.9	21.0	702.7
1994	24.0	64.5	113.5	98.3	62.6	36.5	26.4	49.1	40.5	95.7	155.4	9.0	775.5
1995	0.7	31.2	54.5	67.8	96.8	61.6	45.2	109.4	16.6	81.6	36.9	59.2	661.5
1996	21.1	66.6	68.4	40.9	90.0	78.7	66.8	41.0	46.2	68.5	55.9	47.2	691.3
1997	31.6	17.1	39.1	148.3	27.9	62.1	33.2	19.7	42.0	70.3	64.2	9.2	564.7
1998	16.4	24.9	63.0	70.6	152.9	66.2	90.8	51.7	107.4	116.3	65.0	82.3	907.5
1999	30.9	108.6	62.1	99.0	47.7	50.4	36.1	85.4	86.7	143.7	108.8	35.8	895.2
2000	14.0	57.2	69.3	24.4	60.9	56.5	41.6	56.8	114.1	82.1	25.4	15.5	617.8
2001	27.2	14.8	NA	4.1	144.2	69.1	30.8	33.9	74.9	33.8	25.1	60.7	518.6
2002	3.5	9.6	80.3	181.4	69.0	74.8	23.1	35.1	38.5	63.6	29.9	54.0	662.8
2003	1.3	51.3	47.7	84.2	54.6	62.8	61.1	23.9	99.1	129.9	84.8	54.3	755.0
2004	10.9	35.8	89.8	135.1	140.1	41.1	66.0	26.7	73.5	125.0	89.3	6.4	839.7
2005	17.1	33.3	26.3	47.9	137.7	53.2	29.3	68.2	71.5	190.9	41.7	26.9	744.0
2006	23.4	7.5	100.9	175.2	113.8	99.5	49.0	25.7	29.1	96.7	63.0	28.9	812.7
2007	8.7	16.1	132.9	176.7	86.4	84.6	13.3	71.2	57.2	142.5	59.5	70.8	919.9
2008	28.5	43.0	80.5	93.1	149.2	64.2	89.9	71.0	73.9	78.2	145.6	34.5	951.6
2009	14.5	67.2	77.5	24.8	22.9	93.4	24.3	29.0	17.0	71.0	27.5	7.0	476.1
2010	17.0	27.0	26.6	212.5	99.0	69.1	158.5	65.0	88.0	69.0	136.0	NA	967.7
2011	32.6	63.5	146.0	208.5	NA	NA	24.5	21.6	105.4	89.8	180.9	43.8	916.6
2012	46.8	106.6	137.3	155.2	89.1	49.1	74.6	41.2	25.3	63.1	37.2	6.3	831.8
MEDIA	18.7	39.3	73.2	100.2	92.7	58.2	52.8	47.3	65.1	93.8	79.2	39.3	749.7
MAXIMO	46.8	108.6	153.3	212.5	174.8	100.6	158.5	109.4	117.1	190.9	197.7	101.0	1052.6
MINIMO	0.7	7.5	12.8	4.1	22.9	15.3	13.3	19.7	16.6	33.8	25.1	6.3	476.1
SD	11.2	27.2	39.3	61.0	41.7	23.4	31.0	23.4	30.0	38.0	49.2	25.5	156.8
SE	6.3	15.4	22.2	34.5	23.6	13.2	17.6	13.3	17.0	21.5	27.8	14.4	88.7

IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACION (mms)

ESTACIÓN : 21201140 ESPERANZA LA

SISTEMA DE INFORMACION
NACIONAL AMBIENTAL

LATITUD 0448 N TIPO EST PM DEPTO CUNDINAI FECHA INSTALACIOI 1974-JUL
LONGITUD 7410 W ENTIDAD 01IDEAM MUNICIPII TENJO FECHA SUSPENSION
ELEVACION 2555 m.s.n.m. REGIONAL 11 BOGOTA CORRIEN FRIO

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	44.7	29.3	15.5	63.7	67.3	8.6	79.0	28.6	40.2	140.9	48.0	9.7	575.5
1988	25.7	37.8	13.6	91.0	47.2	141.7	74.9	44.6	106.1	87.3	109.4	102.2	881.5
1989	7.0	50.8	57.3	47.5	93.2	51.8	31.8	27.9	46.6	117.4	33.4	42.6	607.3
1990	29.8	46.2	71.1	170.4	85.7	17.2	39.6	41.4	27.4	140.4	101.3	61.0	831.5
1991	9.2	3.5	113.1	126.4	54.2	17.4	57.2	31.6	51.9	51.4	89.7	16.2	621.8
1992	48.5	26.0	15.9	23.3	77.2	25.5	26.8	34.6	22.1	11.7	104.8	54.0	470.4
1993	16.2	30.1	66.0	63.8	104.9	22.3	41.1	29.0	83.4	28.3	187.2	59.5	731.8
1994	44.0	81.4	116.4	101.1	62.4	38.3	27.1	32.6	18.9	87.4	102.6	0.0	712.2
1995	5.2	33.0	103.0	124.0	98.0	72.0	77.2	112.5	36.5	67.5	48.2	60.4	837.5
1996	49.7	36.7	99.1	85.0	69.3	84.5	59.9	63.0	76.4	155.2	40.5	46.8	866.1
1997	35.1	13.5	28.8	68.0	54.1	46.8	9.3	13.3	12.2	47.6	70.0	0.0	398.7
1998	4.5	58.9	30.5	52.3	129.2	41.4	46.9	35.0	45.8	139.8	41.0	47.8	673.1
1999	58.7	58.5	54.5	58.1	51.5	54.6	9.7	50.5	79.8	120.7	97.7	72.8	767.1
2000	8.0	113.6	53.5	50.4	60.5	51.9	90.3	42.5	106.0	43.7	63.9	20.6	704.9
2001	64.2	17.9	137.8	15.2	102.8	36.7	37.5	25.2	67.3	26.2	15.5	68.3	614.6
2002	18.3	11.0	78.7	117.7	63.1	48.2	25.7	22.8	72.6	77.8	49.2	38.2	623.3
2003	0.4	9.2	24.3	41.4	4.6	30.6	22.9	19.9	26.6	20.1	17.0	7.7	224.7
2004	4.4	9.7	5.1	14.6	11.0	4.3	1.7	28.2	50.6	186.0	46.1	49.7	411.4
2005	16.0	23.3	17.9	25.6	131.5	23.9	33.6	48.5	76.1	139.6	65.3	44.3	645.6
2006	35.3	18.4	78.0	207.2	187.4	55.8	18.8	10.1	34.1	121.8	80.4	22.4	869.7
2007	20.9	17.7	56.0	94.7	73.5	62.1	37.6	43.7	18.1	165.6	49.9	41.7	681.5
2008	25.4	46.9	99.3	105.9	161.1	73.5	94.8	86.8	76.2	134.0	177.1	13.3	1094.3
2009	20.0	48.0	118.6	45.9	10.6	124.1	23.0	33.5	12.6	120.0	95.8	7.0	659.1
2010	32.5	40.1	9.7	124.3	173.5	92.6	188.1	81.8	146.1	74.6	212.1	126.4	1301.8
2011	36.4	51.5	156.9	276.7	198.7	86.5	11.3	27.5	68.6	121.9	142.6	58.8	1237.4
2012	20.2	16.7	59.6	163.7	62.9	19.5	16.3	2.5	2.0	10.0	1.7	24.8	399.9
MEDIA	26.2	35.8	64.6	90.7	86.0	51.2	45.5	39.1	54.0	93.7	80.4	42.2	709.3
MAXIMO	64.2	113.6	156.9	276.7	198.7	141.7	188.1	112.5	146.1	186.0	212.1	126.4	1301.8
MINIMO	0.4	3.5	5.1	14.6	4.6	4.3	1.7	2.5	2.0	10.0	1.7	0.0	224.7
SD	17.8	24.7	43.2	62.3	51.7	34.1	39.0	24.3	34.5	51.8	53.1	30.7	247.2
SE	10.1	14.0	24.5	35.3	29.3	19.3	22.0	13.8	19.5	29.3	30.0	17.4	139.8

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA

SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120565 TABIO

Latitud 0446 N X=N=1035180
Longitud 7356 W Y=E=998070
Elevación 2620 m.s.n.m

DEPTO CUNDINAMARCA
Municipio TABIO
Oficina Prc 9 SABANA CENTRO

Corriente R. CHICÚ
Cuenca R. CHICÚ
Categoría
Fecha Instalación
Fecha Suspensión

CP
1771970

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	21.0	29.1	20.6	22.2	119.6	13.9	32.9	38.8	38.0	91.5	72.2	35.0	534.8
1988	40.3	85.8	9.5	151.6	45.4	127.4	103.5	115.2	69.5	165.2	73.0	68.5	1054.9
1989	2.0	37.1	110.1	42.8	87.8	33.6	39.3	63.7	106.9	79.0	110.0	50.0	762.3
1990	19.9	49.0	54.6	101.5	87.7	32.3	31.1	25.0	40.9	158.7	38.9	85.7	725.3
1991	10.2	19.5	135.4	46.9	69.1	52.0	36.7	65.5	38.8	17.6	146.6	40.4	678.7
1992	34.6	30.6	42.5	47.2	14.9	24.8	52.2	27.3	42.9	20.8	112.2	84.8	534.8
1993	22.7	44.9	45.5	96.6	139.5	38.4	64.0	30.3	60.1	47.6	132.9	3.5	726.0
1994	46.8	108.4	41.2	103.4	86.2	45.7	74.9	69.4	34.6	109.0	131.2	8.2	859.0
1995	7.8	25.0	71.3	99.0	139.7	55.8	60.6	83.0	34.0	60.9	31.2	71.3	739.6
1996	42.7	73.8	122.2	67.9	88.9	82.8	114.7	42.1	67.2	89.2	115.3	80.9	987.7
1997	58.3	15.3	43.8	62.5	33.8	61.8	54.9	32.9	28.0	64.5	91.1	14.2	561.1
1998	11.7	26.5	30.4	79.1	161.3	12.3	65.8	49.1	96.7	103.1	52.7	94.8	783.5
1999	46.9	119.0	79.3	114.2	52.3	79.3	34.2	89.3	165.3	110.9	71.0	61.0	1022.7
2000	47.5	59.3	80.7	46.7	42.4	35.8	81.3	42.9	131.5	46.2	38.9	9.3	662.5
2001	13.9	5.3	20.2	5.5	103.3	28.8	22.9	26.7	21.3	28.5	22.4	3.0	301.8
2002	0.7	4.9	78.1	125.4	59.4	1.7	19.1	35.9	35.2	74.8	21.1	14.2	470.5
2003	0.0	16.3	19.2	47.6	45.8	28.0	66.0	22.0	22.0	92.0	19.0	11.5	389.4
2004	1.2	7.1	12.0	75.4	56.6	28.7	30.0	24.0	31.0	65.5	17.5	7.9	356.9
2005	5.8	33.7	0.9	0.7	8.7	7.1	2.8	35.9	20.1	52.7	31.9	53.8	254.1
2006	27.0	26.0	65.0	52.0	29.6	17.7	45.0	27.0	19.0	32.0	46.5	20.0	406.8
2007	44.5	25.3	67.7	137.1	82.4	68.3	37.4	76.9	42.1	157.4	100.6	146.9	986.6
2008	19.3	79.3	99.6	93.1	136.1	46.5	97.3	94.5	31.1	87.9	113.2	29.5	927.4
2009	19.9	24.6	53.1	59.0	26.0	57.0	21.0	22.0	55.0	81.7	57.4	14.1	490.8
2010	14.1	10.0	36.4	218.1	102.4	77.0	173.4	68.6	62.2	110.8	198.4	75.5	1146.9
2011	52.2	94.1	124.2	246.8	115.5	52.9	58.1	62.7	67.6	154.7	0.0	116.1	1144.9
2012	58.7	44.8	101.6	160.1	74.8	50.1	73.5	78.0	35.6	70.3	56.3	36.6	840.4
MEDIA	25.8	42.1	60.2	88.6	77.3	44.6	57.4	51.9	53.7	83.6	73.1	47.6	705.7
MAXIMO	58.7	119.0	135.4	246.8	161.3	127.4	173.4	115.2	165.3	165.2	198.4	146.9	1146.9
MINIMO	0.0	4.9	0.9	0.7	8.7	1.7	2.8	22.0	19.0	17.6	0.0	3.0	254.1
SD	19.2	32.5	38.3	59.1	41.6	27.8	36.2	26.4	35.9	42.3	48.8	38.6	263.2
SE	10.8	18.4	21.7	33.5	23.6	15.8	20.5	14.9	20.3	23.9	27.6	21.9	148.9

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120136 STA INES

Latitud	0449 N	X=N=1023000	DEPTO	CUNDINAMARCA	Corriente	R. CHICÚ	Categoría	PM					
Longitud	7408 W	Y=E=993400	Municipio	TABIO	Cuenca	R. CHICÚ	Fecha Instalación	1/31/1980					
Elevación	2550 m.s.n.m		Oficina Prc	9 SABANA CENTRO			Fecha Suspensión						
AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	22.0	15.0	20.5	98.0	103.0	3.0	72.0	38.0	31.0	105.0	21.0	3.0	531.5
1988	26.0	19.0	21.0	119.0	103.0	64.0	100.0	39.0	121.0	133.0	135.0	110.0	990.0
1989	0.0	24.0	40.0	23.0	121.0	37.0	52.0	27.0	95.0	88.7	59.2	27.5	594.4
1990	43.5	50.5	95.5	147.4	69.7	16.0	42.0	5.0	48.5	135.5	112.0	98.5	864.1
1991	17.5	13.5	150.8	77.7	62.3	12.0	60.5	43.0	56.2	51.9	157.7	14.0	717.1
1992	27.6	26.1	14.5	37.2	34.0	4.0	17.2	40.4	51.2	27.0	64.5	57.1	400.8
1993	13.0	39.0	61.5	136.7	137.2	36.0	52.6	27.5	115.6	62.1	165.0	52.5	898.7
1994	44.0	85.5	117.5	71.0	103.3	29.2	32.5	38.5	46.8	207.2	133.5	7.2	916.2
1995	5.7	28.0	97.3	76.9	81.5	38.4	41.5	110.9	33.0	27.0	55.6	84.5	680.3
1996	61.6	53.4	109.0	69.0	94.7	77.7	64.1	23.0	65.0	155.0	57.5	43.0	873.0
1997	60.7	21.8	42.0	41.0	43.2	26.0	30.0	20.2	23.0	46.0	117.0	0.0	470.9
1998	43.5	40.0	19.0	52.9	155.1	38.0	66.8	29.5	81.5	167.7	78.0	96.8	868.8
1999	73.0	130.0	90.7	83.5	58.0	114.2	21.0	86.1	106.3	148.8	56.0	43.0	1010.6
2000	17.0	98.2	70.0	38.0	21.5	52.5	65.5	39.5	167.5	56.1	37.0	16.3	679.1
2001	72.5	23.5	97.5	0.0	75.5	6.0	25.0	24.8	54.0	21.0	47.3	85.6	532.7
2002	4.5	10.8	67.8	144.2	87.5	69.6	73.8	13.0	49.2	84.7	25.2	76.4	706.7
2003	0.0	92.7	37.0	105.6	41.2	35.8	52.1	9.5	115.7	76.5	88.0	32.4	686.4
2004	34.8	45.3	71.2	208.5	136.7	52.1	15.6	40.9	77.2	181.6	0.0	37.5	901.4
2005	4.0	34.5	32.7	34.0	93.1	50.9	24.9	28.4	111.6	324.2	25.7	84.1	848.1
2006	9.6	47.6	90.3	165.1	75.0	68.7	39.4	18.3	24.6	99.0	122.5	20.0	780.1
2007	18.4	15.8	59.0	132.3	71.4	52.1	12.3	79.7	3.2	148.8	87.4	74.0	754.4
2008	27.1	50.0	85.8	146.4	171.8	73.0	79.1	98.2	85.2	97.9	55.0	32.7	1002.2
2009	24.7	54.3	123.9	46.6	14.1	100.1	20.9	40.0	32.0	100.4	70.1	28.0	655.1
2010	27.4	45.5	19.3	215.9	194.4	73.9	214.7	94.2	55.6	110.7	162.6	99.8	1314.0
2011	42.8	36.5	116.8	153.9	130.3	63.2	46.7	15.8	129.6	107.4	180.7	87.0	1110.7
2012	83.8	39.1	136.4	141.5	47.0	6.5	73.1	44.4	36.7	69.2	30.2	47.2	755.1
MEDIA	30.9	43.8	72.6	98.7	89.4	46.1	53.7	41.3	69.9	108.9	82.5	52.2	790.1
MAXIMO	83.8	130.0	150.8	215.9	194.4	114.2	214.7	110.9	167.5	324.2	180.7	110.0	1314.0
MINIMO	0.0	10.8	14.5	0.0	14.1	3.0	12.3	5.0	3.2	21.0	0.0	0.0	400.8
SD	23.9	29.1	40.2	57.6	45.8	29.6	40.1	28.6	40.3	65.9	50.8	33.8	206.5
SE	13.5	16.4	22.7	32.6	25.9	16.7	22.7	16.2	22.8	37.3	28.8	19.1	116.8

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA

SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN : 2120557 PRIMAVERA LA

Latitud 0451N X=N=1029900 DEPTO CUNDINAMARCA Corriente R. SUBAC Categoría CP
Longitud 7413 W Y=E=985090 Municipio SUBACHOQUE Cuenca R. SUBAC Fecha Instalación 1/6/1965
Elevación 2590 m.s.n.m Oficina Prc 10 SABANA OCCIDENTE Fecha Suspensión

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	64.1	36.6	23.2	44.4	150.0	23.6	73.7	24.1	72.0	143.5	49.9	16.3	721.4
1988	24.0	32.5	9.2	56.8	108.0	99.1	68.6	65.0	100.0	138.7	123.7	54.2	879.8
1989	25.3	77.5	63.8	37.3	95.0	40.3	35.8	37.6	56.8	105.0	46.7	43.2	664.3
1990	28.5	62.9	60.0	196.3	60.9	34.6	45.6	38.5	17.7	183.4	126.0	112.3	966.7
1991	15.4	27.2	168.9	174.8	85.9	25.5	60.7	42.3	61.8	44.3	96.4	38.0	841.2
1992	12.2	43.0	10.6	29.7	33.3	31.0	58.9	36.4	57.4	37.8	99.5	58.9	508.7
1993	41.8	47.8	122.5	75.5	97.7	46.8	50.8	17.8	85.3	35.4	158.9	40.5	820.8
1994	37.2	60.5	93.4	109.9	96.1	49.2	49.8	52.8	47.1	103.5	141.1	8.0	848.6
1995	3.8	41.8	115.9	77.7	103.9	78.1	98.7	118.3	60.3	72.0	36.2	97.3	904.0
1996	33.2	64.4	126.6	47.4	79.9	67.2	87.8	36.0	73.0	93.2	52.2	36.2	797.1
1997	34.0	9.8	73.0	83.5	53.0	71.6	28.0	18.1	46.7	63.5	48.8	1.2	531.2
1998	25.3	47.0	39.5	101.2	115.3	36.2	65.3	40.4	68.8	138.1	68.8	86.6	832.5
1999	79.6	70.1	70.0	70.9	51.6	79.1	34.7	115.5	100.2	184.0	84.8	50.0	990.5
2000	27.8	89.2	85.9	72.9	43.8	43.5	50.2	34.8	120.1	99.3	35.0	25.4	727.9
2001	42.3	16.4	95.6	11.0	105.7	39.1	35.0	23.7	76.1	38.3	36.7	129.3	649.2
2002	27.2	9.1	96.3	173.3	65.3	51.9	17.4	19.0	40.6	37.0	36.3	62.9	636.3
2003	0.0	18.0	54.7	126.0	32.6	51.6	35.1	26.3	58.7	145.6	65.5	43.9	658.0
2004	23.4	33.7	76.1	121.6	102.1	39.6	50.3	19.0	74.0	111.3	77.3	20.2	748.6
2005	30.8	39.5	9.2	98.6	144.3	52.0	22.8	71.5	125.9	148.5	35.7	44.2	823.0
2006	180.6	102.0	199.6	283.9	330.1	82.3	34.8	18.7	35.9	121.5	51.8	36.3	1477.5
2007	8.9	13.0	80.3	127.5	56.6	79.8	35.1	71.7	50.7	195.2	60.5	117.1	896.4
2008	52.1	58.5	71.2	96.3	108.3	82.8	90.3	88.5	112.9	109.1	118.6	24.4	1013.0
2009	35.6	61.1	127.9	67.0	29.4	99.2	21.2	10.1	13.2	81.2	104.7	9.6	660.2
2010	8.4	10.5	4.1	100.9	60.0	119.8	201.9	76.8	48.7	14.3	163.5	86.8	895.7
2011	32.0	42.0	135.9	222.1	163.6	64.0	104.3	39.6	88.1	176.1	240.3	60.0	1368.0
2012	41.3	25.5	116.7	221.6	62.6	31.8	50.5	46.1	32.3	88.4	30.6	16.6	764.0
MEDIA	36.0	43.8	81.9	108.8	93.7	58.5	58.0	45.7	66.3	104.2	84.2	50.7	831.7
MAXIMO	180.6	102.0	199.6	283.9	330.1	119.8	201.9	118.3	125.9	195.2	240.3	129.3	1477.5
MINIMO	0.0	9.1	4.1	11.0	29.4	23.6	17.4	10.1	13.2	14.3	30.6	1.2	508.7
SD	34.4	25.0	49.8	67.0	60.3	25.5	37.7	29.3	29.3	51.9	51.5	35.1	217.9
SE	19.5	14.2	28.1	37.9	34.1	14.4	21.4	16.6	16.6	29.4	29.2	19.9	123.3

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA

SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN : 2120516 RAMADA LA

Latitud 0443 N X=N=1011430
Longitud 7411 W Y=E=989110
Elevación 2545 m.s.n.m

DEPTO CUNDINAMARCA Corriente R. BOGOT
Municipio FUNZA Cuenca R. BOGOT
Oficina Prc 10 SABANA OCCIDENTE

Categoría
Fecha Instalación
Fecha Suspensión

CP
1/12/1937

AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
1987	33.6	13.2	26.6	85.5	94.5	24.7	81.5	35.3	69.3	121.6	94.3	34.2	714.3
1988	15.8	45.8	19.3	103.3	131.6	50.6	46.5	63.6	109.8	78.2	137.9	103.7	906.1
1989	37.7	38.7	103.1	32.4	52.0	46.7	34.7	35.0	61.8	78.0	29.2	73.2	622.5
1990	35.4	44.9	61.2	137.4	79.3	18.8	32.8	33.6	54.7	181.0	61.7	72.0	812.8
1991	12.6	6.9	150.4	61.5	71.7	28.3	41.7	28.8	43.1	34.8	79.2	58.5	617.5
1992	38.8	19.6	19.6	39.2	26.6	11.5	37.5	39.5	44.6	32.9	116.9	29.4	456.1
1993	16.2	36.4	56.8	84.1	122.3	22.3	60.0	31.7	42.7	52.8	175.7	9.8	710.8
1994	53.5	175.2	104.8	86.1	63.7	50.3	17.6	29.3	38.7	74.9	151.3	8.2	853.6
1995	4.0	13.5	98.4	113.6	111.1	76.2	78.3	74.2	48.9	145.8	78.7	78.4	921.1
1996	30.2	67.8	74.1	67.2	109.0	66.1	54.9	64.6	26.9	119.4	35.2	24.5	739.9
1997	72.3	22.8	56.9	64.4	43.7	92.1	20.5	8.3	42.7	47.9	54.8	1.2	527.6
1998	3.0	49.5	30.8	111.0	131.6	59.4	85.2	57.9	86.5	117.6	66.6	84.0	883.1
1999	24.4	118.4	64.4	61.0	72.5	89.9	29.2	53.7	116.8	152.5	81.4	56.3	920.5
2000	23.4	97.1	79.9	36.0	104.4	76.5	48.4	48.6	130.9	47.4	31.5	43.1	767.2
2001	40.4	20.5	2.6	12.7	130.3	44.9	33.1	23.1	65.7	28.4	28.4	94.2	524.2
2002	9.7	14.8	86.8	147.9	73.2	57.6	22.5	24.0	53.7	81.3	42.9	56.4	670.9
2003	1.5	35.2	78.0	76.2	30.6	50.9	25.9	30.6	43.2	62.7	91.1	22.0	547.9
2004	24.9	65.4	61.4	174.2	94.4	48.7	48.9	30.4	59.1	140.5	98.9	12.7	859.5
2005	22.9	14.8	30.2	85.1	150.4	17.7	20.5	60.9	61.0	99.3	68.5	53.4	684.7
2006	19.0	10.0	99.8	84.6	156.6	73.0	13.9	26.6	24.1	131.8	53.8	52.2	745.4
2007	4.2	11.5	52.8	154.3	126.7	67.0	60.7	3.2	21.7	148.8	87.5	142.8	881.2
2008	32.0	59.0	114.4	106.5	171.4	88.2	59.3	74.9	51.5	97.8	107.4	49.7	1012.1
2009	37.0	56.9	148.8	74.4	13.0	74.1	51.3	23.6	24.9	139.4	53.8	45.3	742.5
2010	3.1	48.8	14.5	187.9	153.3	94.3	126.0	47.4	42.2	104.8	205.4	138.2	1165.9
2011	55.1	94.2	120.5	206.7	127.8	64.2	40.6	37.9	81.6	188.6	252.5	100.2	1369.9
2012	57.7	39.3	113.4	217.2	56.2	42.7	52.2	33.1	15.8	99.5	62.0	28.1	817.2
MEDIA	27.2	46.9	71.9	100.4	96.1	55.3	47.1	39.2	56.2	100.3	90.3	56.6	787.5
MAXIMO	72.3	175.2	150.4	217.2	171.4	94.3	126.0	74.9	130.9	188.6	252.5	142.8	1369.9
MINIMO	1.5	6.9	2.6	12.7	13.0	11.5	13.9	3.2	15.8	28.4	28.4	1.2	456.1
SD	18.8	39.1	41.0	54.0	43.7	24.4	25.2	18.5	29.1	45.6	55.6	37.7	201.3
SE	10.7	22.1	23.2	30.6	24.7	13.8	14.3	10.5	16.4	25.8	31.4	21.3	113.9

2. ANEXO 2.

BALANCE HÍDRICO PARA LA CUENCA DEL RÍO CHICÚ

Mes	Días	P (mm)	T [°C]	I	I y a	N	K	ETP	ΔP	Alm t	Ppaa	Exceso	Δalm	$Alm_{t-1} + \Delta P$	ETr	Def	TA	Ro	Inf
Serie: ZU; RAU: 5 mm																			
Ene	31	31.2	13.3	4.4	55.5	11.9	1.0	53.9	-22.7	0.0	-24.6	0.0	-3.4	-19.3	34.5	-19.3	0.0	0.0	0.0
Feb	28	46.9	13.6	4.6		12.0	0.9	50.9	-4.0	0.0	-28.6	0.0	0.0	-4.0	47.0	-4.0	0.0	0.0	19.3
Mar	31	83.2	13.9	4.7		12.1	1.0	58.4	24.8	5.0	0.0	19.8	5.0	24.8	58.4	0.0	19.8	9.9	23.9
Abr	30	102.2	14.2	4.8		12.2	1.0	58.5	43.8	5.0	0.0	43.8	0.0	48.8	58.5	0.0	53.7	26.9	0.0
May	31	101.6	14.2	4.9		12.4	1.1	61.7	39.9	5.0	0.0	39.9	0.0	44.9	61.7	0.0	66.8	33.4	0.0
Jun	30	69.4	13.9	4.7		12.4	1.0	58.1	11.3	5.0	0.0	11.3	0.0	16.3	58.1	0.0	44.7	22.3	0.0
Jul	31	59.9	13.6	4.5	1.4	12.3	1.1	57.4	2.5	5.0	0.0	2.5	0.0	7.5	57.4	0.0	24.8	12.4	0.0
Ago	31	44.9	13.6	4.6		12.3	1.1	57.6	-12.7	0.4	-12.7	0.0	-4.6	-7.7	49.5	-8.1	0.0	0.0	0.0
Sep	30	62.7	13.6	4.5		12.1	1.0	54.7	8.1	5.0	0.0	3.5	4.6	8.5	54.7	0.0	3.5	1.7	19.1
Oct	31	106.7	13.7	4.6		12.0	1.0	56.9	49.9	5.0	0.0	49.9	0.0	54.9	56.9	0.0	51.6	25.8	20.6
Nov	30	91.1	13.8	4.7		11.9	1.0	55.2	35.9	5.0	0.0	35.9	0.0	40.9	55.2	0.0	61.7	30.8	0.0
Dic	31	53.1	13.6	4.5		11.8	1.0	55.0	-1.9	3.4	-1.9	0.0	-1.6	3.1	54.7	-0.3	0.0	0.0	0.0
Series: TF2-y, CF1-x, PF1-t; RAU: 100 mm																			
Ene	31	31.2	13.3	4.4	55.5	11.9	1.0	53.9	-22.7	78.2	-24.6	0.0	-19.9	75.4	51.1	-2.8	0.0	0.0	0.0
Feb	28	46.9	13.6	4.6		12.0	0.9	50.9	-4.0	75.1	-28.6	0.0	-3.1	74.2	50.0	-0.9	0.0	0.0	0.0
Mar	31	83.2	13.9	4.7		12.1	1.0	58.4	24.8	99.9	-0.1	0.0	24.8	99.9	58.4	0.0	0.0	0.0	50.6
Abr	30	102.2	14.2	4.8		12.2	1.0	58.5	43.8	100.0	0.0	43.7	0.1	143.7	58.5	0.0	43.7	21.9	22.0
May	31	101.6	14.2	4.9		12.4	1.1	61.7	39.9	100.0	0.0	39.9	0.0	139.9	61.7	0.0	61.8	30.9	0.0
Jun	30	69.4	13.9	4.7		12.4	1.0	58.1	11.3	100.0	0.0	11.3	0.0	111.3	58.1	0.0	42.2	21.1	0.0
Jul	31	59.9	13.6	4.5	1.4	12.3	1.1	57.4	2.5	100.0	0.0	2.5	0.0	102.5	57.4	0.0	23.6	11.8	0.0
Ago	31	44.9	13.6	4.6		12.3	1.1	57.6	-12.7	88.1	-12.7	0.0	-11.9	87.3	56.9	-0.8	0.0	0.0	0.0
Sep	30	62.7	13.6	4.5		12.1	1.0	54.7	8.1	96.1	-3.9	0.0	8.1	96.1	54.7	0.0	0.0	0.0	16.9
Oct	31	106.7	13.7	4.6		12.0	1.0	56.9	49.9	100.0	0.0	46.0	3.9	146.0	56.9	0.0	46.0	23.0	30.7

Nov	30	91.1	13.8	4.7		11.9	1.0	55.2	35.9	100.0	0.0	35.9	0.0	135.9	55.2	0.0	58.9	29.4	0.0	
Dic	31	53.1	13.6	4.5		11.8	1.0	55.0	-1.9	98.1	-1.9	0.0	-1.9	98.1	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Serie: CF2-s; RAU: 150 mm																				
Ene	31	31.2	13.3	4.4	55.5	11.9	1.0	53.9	-	127.3	-24.6	0.0	-20.8	125.4	51.9	-1.9	0.0	0.0	0.0	
Feb	28	46.9	13.6	4.6		22.7	12.0	0.9	50.9	-4.0	123.9	-28.6	0.0	-3.4	123.3	50.3	-0.7	0.0	0.0	0.0
Mar	31	83.2	13.9	4.7		24.8	12.1	1.0	58.4	24.8	148.8	-1.2	0.0	24.8	148.8	58.4	0.0	0.0	0.0	50.3
Abr	30	102.2	14.2	4.8		43.8	12.2	1.0	58.5	43.8	150.0	0.0	42.6	1.2	192.6	58.5	0.0	42.6	21.3	23.7
May	31	101.6	14.2	4.9		39.9	12.4	1.1	61.7	39.9	150.0	0.0	39.9	0.0	189.9	61.7	0.0	61.2	30.6	0.0
Jun	30	69.4	13.9	4.7		11.3	12.4	1.0	58.1	11.3	150.0	0.0	11.3	0.0	161.3	58.1	0.0	41.9	21.0	0.0
Jul	31	59.9	13.6	4.5	1.4	12.3	1.1	57.4	2.5	150.0	0.0	2.5	0.0	152.5	57.4	0.0	23.4	11.7	0.0	
Ago	31	44.9	13.6	4.6		-	12.3	1.1	57.6	12.7	137.8	-12.7	0.0	-12.2	137.3	57.1	-0.5	0.0	0.0	0.0
Sep	30	62.7	13.6	4.5		8.1	12.1	1.0	54.7	8.1	145.9	-4.2	0.0	8.1	145.9	54.7	0.0	0.0	0.0	16.7
Oct	31	106.7	13.7	4.6		49.9	12.0	1.0	56.9	49.9	150.0	0.0	45.7	4.1	195.7	56.9	0.0	45.7	22.9	31.1
Nov	30	91.1	13.8	4.7		150.0	11.9	1.0	55.2	35.9	150.0	0.0	35.9	0.0	185.9	55.2	0.0	58.8	29.4	0.0
Dic	31	53.1	13.6	4.5		-1.9	11.8	1.0	55.0	-1.9	148.1	-1.9	0.0	-1.9	148.1	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Serie: PF2-r; RAU: 200 mm																				
Ene	31	31.2	13.3	4.4	55.5	11.9	1.0	53.9	-	176.8	-24.6	0.0	-21.2	175.4	52.4	-1.4	0.0	0.0	0.0	
Feb	28	46.9	13.6	4.6		22.7	12.0	0.9	50.9	-4.0	173.3	-28.6	0.0	-3.5	172.8	50.4	-0.5	0.0	0.0	0.0
Mar	31	83.2	13.9	4.7		24.8	12.1	1.0	58.4	24.8	198.2	-1.8	0.0	24.8	198.2	58.4	0.0	0.0	0.0	50.2
Abr	30	102.2	14.2	4.8		43.8	12.2	1.0	58.5	43.8	200.0	0.0	41.9	1.8	241.9	58.5	0.0	41.9	21.0	24.7
May	31	101.6	14.2	4.9		39.9	12.4	1.1	61.7	39.9	200.0	0.0	39.9	0.0	239.9	61.7	0.0	60.9	30.5	0.0
Jun	30	69.4	13.9	4.7		11.3	12.4	1.0	58.1	11.3	200.0	0.0	11.3	0.0	211.3	58.1	0.0	41.8	20.9	0.0
Jul	31	59.9	13.6	4.5	1.4	12.3	1.1	57.4	2.5	200.0	0.0	2.5	0.0	202.5	57.4	0.0	23.3	11.7	0.0	
Ago	31	44.9	13.6	4.6		-	12.3	1.1	57.6	12.7	187.7	-12.7	0.0	-12.3	187.3	57.2	-0.4	0.0	0.0	0.0
Sep	30	62.7	13.6	4.5		8.1	12.1	1.0	54.7	8.1	195.8	-4.3	0.0	8.1	195.8	54.7	0.0	0.0	0.0	16.6
Oct	31	106.7	13.7	4.6		49.9	12.0	1.0	56.9	49.9	200.0	0.0	45.6	4.2	245.6	56.9	0.0	45.6	22.8	31.3

Nov	30	91.1	13.8	4.7		11.9	1.0	55.2	35.9	200.0	0.0	35.9	0.0	235.9	55.2	0.0	58.7	29.3	0.0
Dic	31	53.1	13.6	4.5		11.8	1.0	55.0	-1.9	198.1	-1.9	0.0	-1.9	198.1	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Serie: BF1; RAU: 350 mm

Ene	31	31.2	13.3	4.4	55.5	11.9	1.0	53.9	-	326.2	-24.6	0.0	-21.8	325.4	53.0	-0.8	0.0	0.0	0.0
Feb	28	46.9	13.6	4.6		12.0	0.9	50.9	-4.0	322.5	-28.6	0.0	-3.7	322.2	50.6	-0.3	0.0	0.0	0.0
Mar	31	83.2	13.9	4.7		12.1	1.0	58.4	24.8	347.3	-2.7	0.0	24.8	347.3	58.4	0.0	0.0	0.0	50.0
Abr	30	102.2	14.2	4.8		12.2	1.0	58.5	43.8	350.0	0.0	41.1	2.7	391.1	58.5	0.0	41.1	20.6	25.9
May	31	101.6	14.2	4.9		12.4	1.1	61.7	39.9	350.0	0.0	39.9	0.0	389.9	61.7	0.0	60.5	30.3	0.0
Jun	30	69.4	13.9	4.7		12.4	1.0	58.1	11.3	350.0	0.0	11.3	0.0	361.3	58.1	0.0	41.5	20.8	0.0
Jul	31	59.9	13.6	4.5	1.4	12.3	1.1	57.4	2.5	350.0	0.0	2.5	0.0	352.5	57.4	0.0	23.2	11.6	0.0
Ago	31	44.9	13.6	4.6		12.3	1.1	57.6	-	337.5	-12.7	0.0	-12.5	337.3	57.4	-0.2	0.0	0.0	0.0
Sep	30	62.7	13.6	4.5		12.1	1.0	54.7	8.1	345.6	-4.4	0.0	8.1	345.6	54.7	0.0	0.0	0.0	16.4
Oct	31	106.7	13.7	4.6		12.0	1.0	56.9	49.9	350.0	0.0	45.5	4.4	395.5	56.9	0.0	45.5	22.7	31.6
Nov	30	91.1	13.8	4.7		11.9	1.0	55.2	35.9	350.0	0.0	35.9	0.0	385.9	55.2	0.0	58.6	29.3	0.0
Dic	31	53.1	13.6	4.5		11.8	1.0	55.0	-1.9	348.1	-1.9	0.0	-1.9	348.1	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Serie: VN1; RAU: 250 mm

Ene	31	31.2	13.3	4.4	55.5	11.9	1.0	53.9	-	226.6	-24.6	0.0	-21.5	225.4	52.7	-1.2	0.0	0.0	0.0
Feb	28	46.9	13.6	4.6		12.0	0.9	50.9	-4.0	223.0	-28.6	0.0	-3.6	222.5	50.5	-0.4	0.0	0.0	0.0
Mar	31	83.2	13.9	4.7		12.1	1.0	58.4	24.8	247.8	-2.2	0.0	24.8	247.8	58.4	0.0	0.0	0.0	50.1
Abr	30	102.2	14.2	4.8		12.2	1.0	58.5	43.8	250.0	0.0	41.6	2.2	291.6	58.5	0.0	41.6	20.8	25.2
May	31	101.6	14.2	4.9		12.4	1.1	61.7	39.9	250.0	0.0	39.9	0.0	289.9	61.7	0.0	60.7	30.4	0.0
Jun	30	69.4	13.9	4.7		12.4	1.0	58.1	11.3	250.0	0.0	11.3	0.0	261.3	58.1	0.0	41.7	20.8	0.0
Jul	31	59.9	13.6	4.5	1.4	12.3	1.1	57.4	2.5	250.0	0.0	2.5	0.0	252.5	57.4	0.0	23.3	11.6	0.0
Ago	31	44.9	13.6	4.6		12.3	1.1	57.6	-	237.6	-12.7	0.0	-12.4	237.3	57.3	-0.3	0.0	0.0	0.0
Sep	30	62.7	13.6	4.5		12.1	1.0	54.7	8.1	245.7	-4.4	0.0	8.1	245.7	54.7	0.0	0.0	0.0	16.5
Oct	31	106.7	13.7	4.6		12.0	1.0	56.9	49.9	250.0	0.0	45.5	4.3	295.5	56.9	0.0	45.5	22.8	31.4

Nov	30	91.1	13.8	4.7		11.9	1.0	55.2	35.9	250.0	0.0	35.9	0.0	285.9	55.2	0.0	58.7	29.3	0.0
Dic	31	53.1	13.6	4.5		11.8	1.0	55.0	-1.9	248.1	-1.9	0.0	-1.9	248.1	55.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3. ANEXO 3.

POZOS QUE EXPLOTAN EL ACUÍFERO DE SEDIMENTOS DEL NEÓGENO - CUATERNARIO

PLACA	VEREDA	MUNICIPIO	NOMBRE DEL PREDIO	ESTADO	X	Y	Z	NE - 1998	NE - 2007	NE - 2011	NE - 2012
VI - 01	CARRASQUILLA	TENJO	LA TABLA	ACTIVO	1025608.00	989418.00	2578.00	2559.29	NA	2565.50	2564.40
VI - 05	POVEDA 1	TENJO	LAGUNA VERDE	ACTIVO	1032164.00	998286.00	2587.00	2566.05	2561.44	2564.00	2566.00
VI - 06	POVEDA 1	TENJO	EL CUCHARO	INACTIVO	1032437.00	998840.00	2593.00	2576.71	NA	2578.30	2576.99
VI - 09	CHURUGUACA	TENJO	FINLANDIA	INACTIVO	1029812.00	992927.00	2582.00	2567.22	2563.32	2561.98	2561.98
VI - 10	LOS GUACOS	TENJO	SANTA ANA	ACTIVO	1029271.00	990008.00	2758.00	2730.12	2699.70	2710.40	2714.80
VI - 11	CARRASQUILLA	TENJO	GUAICATA	INACTIVO	1024096.00	986616.00	2581.00	2550.55	2497.31	2524.10	2522.80
VI - 12	CARRASQUILLA	TENJO	GUAICATA	ACTIVO	1023608.00	986913.00	2587.00	2556.89	2551.91	2553.85	2548.50
VI - 13	CHITASUGA	TENJO	EL TAO	ACTIVO	1029795.00	990683.00	2595.00	NA	2529.39	2538.10	2550.50
VI - 18	CARRASQUILLA	TENJO	LEJANÍAS	INACTIVO	1025873.00	987556.00	2578.00	2550.78	2546.41	2544.30	2549.70
VI - 19	CARRASQUILLA	TENJO	LA CASTAÑA	INACTIVO	1024099.00	987702.00	2577.00	2556.70	2551.15	2545.50	2551.80
VI - 20	GUANGATA	TENJO	CAMPO ALEGRE	ACTIVO	1030539.00	995657.00	2586.00	NA	NA	2567.50	2567.70
VI - 21	PALO VERDE	TENJO	LA RINCONADA	ACTIVO	1034023.00	999204.00	2578.00	2563.14	2562.53	2567.80	2567.99
VI - 23	ZONA URBANA	TENJO	LA SERENA	INACTIVO	1030511.00	992224.00	2611.00	NA	2598.29	2599.30	2600.70
VI - 24	CHINCE	TENJO	SAUSALITO	INACTIVO	1031215.00	993110.00	2608.00	NA	NA	2553.00	2560.90
VI - 25	CHITASUGA	TENJO	MIRA ALTA	INACTIVO	1029505.00	990430.00	2598.00	2551.88	2546.81	2564.30	2560.50
VI - 26	VUELTA GRANDE	TENJO	EL JUNCAL	ACTIVO	1019520.00	992030.00	2556.00	2532.29	2530.53	2503.80	2522.20
VI - 28	EL ESTANCO	TENJO	LOS GUACOS	INACTIVO	1027265.00	989332.00	2595.00	2571.81	2581.80	2581.50	2584.20
VI - 30	LOURDES	TENJO	LOS SAUCES	ACTIVO	1035790.00	998976.00	2593.00	2579.82	2581.56	2582.80	2581.99
VI - 32	JACALITO	TENJO	EL DESCANSO	ACTIVO	1021567.00	989496.00	2568.00	2546.90	2543.25	2545.50	2544.20
VI - 33	CHITASUGA	TENJO	FINCA SAN JORGE	INACTIVO	1027171.00	992003.00	2587.00	2559.57	2554.06	2558.40	2569.50
VI - 34	PALO VERDE	TABIO	EL GAVE	MANTENIMIENTO	1034603.00	998446.00	2597.00	2584.18	2596.82	2586.30	2586.99
VI - 35	POVEDA II	TENJO	LA UNIÓN	ACTIVO	1031340.00	997277.00	2593.00	NA	NA	2569.40	2569.59
VI - 36	CHINCE	TENJO	EL CARPINTERO	ACTIVO	1030710.00	994629.00	2587.00	2572.54	2568.46	2569.50	2570.80
VI - 39	SANTA CRUZ	TENJO	LETICIA	ACTIVO	1026832.00	993707.00	2582.00	2560.89	2559.43	2559.60	2559.70
VI - 40	CARRASQUILLA	TENJO	MI TIERRA	ACTIVO	1027618.00	988326.00	2585.00	2545.27	2525.09	2527.00	2532.60
VI - 41	SANTA CRUZ	TENJO	LOS NOGALES	ACTIVO	1026071.00	993374.00	2585.00	2565.43	2565.73	2569.70	2571.80
VI - 42	POVEDA II	TENJO	SAN LUIS DE	INACTIVO	1030577.00	995837.00	2596.00	2579.05	2576.47	2580.60	2576.80

			ALEJANDRÍA									
VI - 44	CEDRO	TENJO	CEDRO	INACTIVO	1032730.00	997093.00	2599.00	2577.89	2579.08	2579.30	2579.80	
VI - 53	POVEDA II	TENJO	GARDEN HERB	ACTIVO	1031109.00	998327.00	2599.00	NA	NA	2585.30	2587.95	
VI - 55	CARRASQUILLA	TENJO	LOS GUACOS	ACTIVO	1027336.00	989505.00	2582.00	NA	2564.56	2563.80	2566.80	
VI - 56	CARRASQUILLA	TENJO	LAS MANITAS	ACTIVO	1028217.00	988748.00	2583.00	NA	2511.14	2531.50	2532.80	
VI - 58	PALO VERDE	TABIO	SAN BENITO	ACTIVO	1032871.00	998977.00	2560.00	NA	2543.80	2548.60	2546.80	
525 - 3	CHITASUGA	TENJO	LA CASCAJERA	ACTIVO	1030644.00	991926.00	2609.00	NA	NA	2515.00	2545.80	
525 - 4	CHURUGUACO	TENJO	CHURUGUACO	ACTIVO	1030834.79	992302.25	2614.00	NA	NA	2560.60	2549.50	

4. ANEXO 4.

CONCEPTOS DE
HIDROGEOLOGÍA

4. CLASIFICACIÓN DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

Entendiendo que una **Unidad Hidrogeológica** es un conjunto de formaciones geológicas de características hidrogeológicas y funcionamiento similares (entradas, salidas, balance), que en ciertos casos son varios estratos estratigráficos los cuales conviene estudiar conjuntamente (Sánchez, 2011).

Con base en el comportamiento de dichas unidades hidrogeológicas frente al agua que circula por su matriz interna (i.e. comportamiento hidrodinámico), estas unidades se pueden clasificar en:

4.1. ACUÍFERO

Del latín *fero*: llevar, es una formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad. Se clasifican en porosos, fracturados y kársticos según sus características texturales. En términos hidráulicos, es un medio capaz de transmitir y almacenar agua

4.1.1. ACUÍFERO POROSO

Este tipo de acuíferos se desarrollan en rocas sedimentarias que presentan porosidad primaria, la cual resulta al originarse la formación. Este tipo de acuíferos están constituidos por materiales sueltos como arenas, gravas, entre otros, donde el agua que contiene se encuentra entre el espacio intragranular de las partículas que conforman el acuífero.

Las características de este tipo de acuífero están determinadas principalmente por la granulometría de los materiales y el tipo y cantidad de arcillas que contienen.

4.1.2. ACUÍFERO FRACTURADO

Este tipo de acuífero se desarrolla en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias cementadas de permeabilidad primaria muy reducida que presentan porosidad secundaria, la cual es producto de rupturas o fisuras que se producen posteriormente al origen de la formación, y son producto esfuerzos tectónicos.

Estos acuíferos se forman sobre una gran variedad de materiales incluyendo basaltos y granitos fracturados.

4.1.3. ACUÍFERO KÁRSTICO

Este tipo de acuífero se desarrolla en rocas solubles en agua, tales como calizas, yesos, entre otros, que por procesos de disolución forman cavernas por las cuales circula el agua. Este tipo de acuífero no presenta importancia en la Sabana de Bogotá.

4.2. ACUICLUDO

Del latín *cludo*, encerrar, es una formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Materiales tales como arcillas o limos conforman este tipo de formación.

4.3. ACUITARDO

Del latín *tardo*, impedir, es una formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero si circulación a través de su matriz interna ocurre con dificultad. Este tipo de clasificación es un concepto intermedio entre el acuífero y el acuicludo. Materiales tales como arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con fracturación o alteración moderadas conforman este tipo de formación.

4.4. ACUÍFUGO

Del latín *fugo*, rechazar, es una formación hidrogeológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Materiales como el granito o esquisto inalterado y no fracturado conforman este tipo de formación.

4.5. CLASIFICACIÓN DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.

4.5.1. ACUÍFEROS LIBRES O DE TABLA DE AGUA

Son aquellos (Figura A4.1.) que su límite superior (i.e. superficie freática) está a presión atmosférica y se encuentra en contacto directo con la zona no saturada (ZNS). Al extraer el agua a través de una captación (e.g. pozo o aljibe), existirá un descenso de la superficie freática (i.e. descenso del nivel freático).

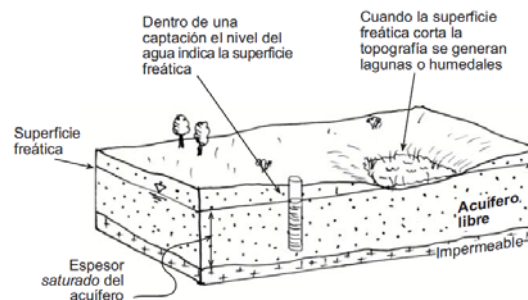


Figura A4.1. Acuífero Libre o no-confinado
Fuente: Sánchez, 2011.

Para este tipo de acuífero, la mayor parte de la recarga de agua se produce autóctonamente, dado que el agua proviene de un área de alimentación situada sobre el acuífero, la cual permite la percolación e infiltración del agua, ya sea de lluvia o de riego.

4.5.2. ACUÍFERO CONFINADO

Su límite superior se encuentra a presión superior a la presión atmosférica. La roca permeable que conforma este tipo de acuífero se encuentra encajada por formaciones impermeables en su techo y piso. Encontrando que todo el acuífero se encuentra saturado de agua (Figura A4.2.), por lo que al momento de su explotación, ningún poro se vacía dado que el agua extraída procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida; para formaciones no consolidadas en condiciones confinadas, el agua extraída procede en mayor medida de la compresibilidad de la matriz sólida.

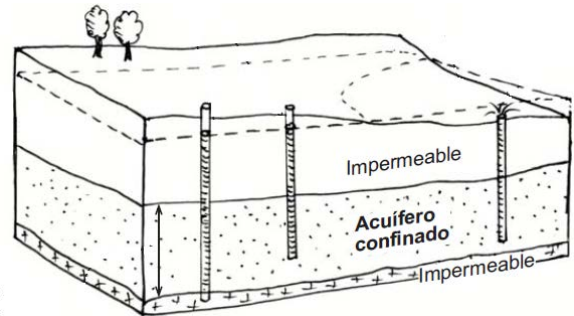


Figura A4.2. Acuífero Confinado
Fuente: Sánchez, 2011.

La altura que alcanza el agua en el interior de un sondeo que se encuentra explotando este tipo de acuífero hasta equilibrarse con la presión atmosférica es denominada, nivel piezométrico. Cuando este nivel se encuentra sobre la superficie del terreno el agua rebosa por la boca de la captación, formando lo que se conoce como un pozo artesiano o surgente.

Su recarga se produce en zonas donde existen materiales permeables alejados del punto de medición, pudiendo ser directa o indirecta dependiendo que si es agua de lluvia que entra en contacto directo con un afloramiento del agua subterránea, o las precipitaciones deben atravesar las diferentes capas de suelo antes de ser integrada al agua subterránea.

4.5.3. ACUÍFERO SEMI-CONFINADO

Son acuíferos a presión (Figura A4.3.), similares a los acuíferos confinados, no obstante por presentar algunas capas confinantes semipermeables (i.e. acuitardos) en su techo, permiten la recarga o descarga de este acuífero.

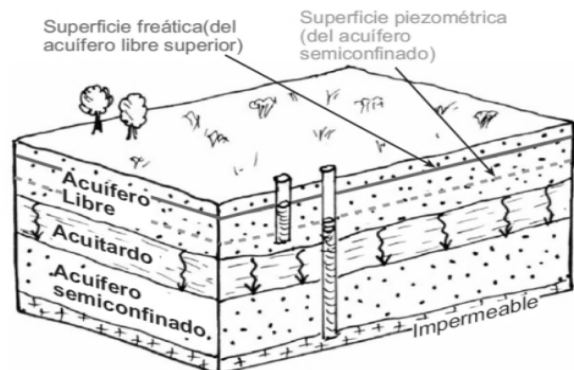


Figura A4.3. Acuífero Semi-confinado
Fuente: Sánchez, 2011.

4.6. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS

4.6.1. POROSIDAD TOTAL Y EFICAZ

Las propiedades de las formaciones geológicas y de los materiales que le permiten almacenar agua es la porosidad total (m_t), la cual es definida como la fracción de espacios vacíos que contiene un material sólido respecto al volumen total (Ecuación A4.1.).

$$m_t = \frac{\text{volumen poros}}{\text{volumen total}} \quad \text{Ec. A4.1.}$$

Siendo necesario diferenciar este parámetro respecto a la porosidad efectiva (m_t), la cual se refiere a los poros interconectados y que por tanto contribuyen al flujo de agua subterránea respecto al volumen total (Ecuación A4.2.).

$$m_e = \frac{\text{volumen de agua drenada por gravedad}}{\text{volumen total}} \quad \text{Ec. A4.2.}$$

La determinación de este parámetro, para el caso de los acuíferos libres puede proporcionar una buena estimación del agua que puede contener (Figura A4.4.). La diferencia entre ambas porosidades se le denomina retención específica, la cual nos indica el volumen de agua adherido a los granos que conforman el material y representa el agua no utilizable por el flujo de agua subterránea.

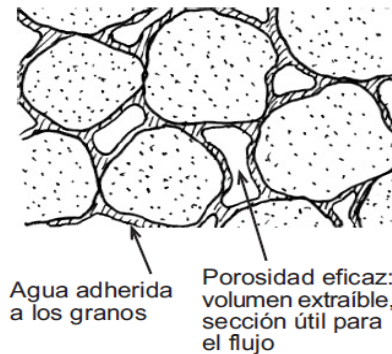


Figura A4.4. Porosidad eficaz
Fuente: Sánchez, 2011.

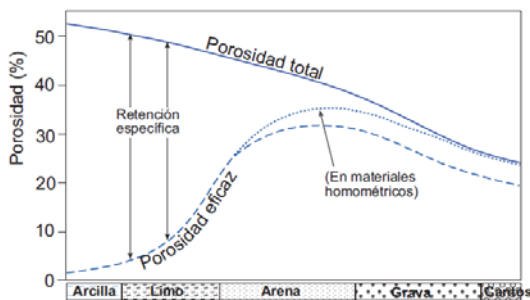


Figura A4.5. Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados.

Fuente: IGME, 1984, citado por Sánchez, 2011.

En términos del efecto que genera la porosidad

intergranular sobre la porosidad total y eficaz (Figura A4.5.), presenta características diferentes. Respecto a la porosidad total, el tamaño del grano no afecta directamente su valor, en cambio, la porosidad eficaz se ve afectado, por ejemplo, material de grano fino (e.g Arcillas) presenta una retención específica mayor, respecto a un material de grano medio o grueso (e.g Arenas y gravas, respectivamente).

4.6.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K)

Este parámetro es definido con la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, que para nuestro caso es el agua (Sánchez, 2011). Con base en la Ley de Darcy, es posible definir a la Conductividad Hidráulica con la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico (Ecuación A4.3.).

$$Q = K \cdot \text{Sección} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \therefore \frac{Q}{\text{Sección}} = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{Ec. A4.3.}$$

$$Q: \text{Caudal } \left[\frac{m^3}{s} \right]; i = \frac{\Delta h}{\Delta l}: \text{Gradiente Hidráulico [Adim]}; K: \text{Cond. Hidraulica } \left[\frac{m}{día} \right]$$

Con base en la ecuación 6.3, es posible definir a la Conductividad Hidráulica como el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria perpendicularmente de acuífero (i.e. medio poroso) bajo la influencia lineal de un gradiente unitario a la temperatura de campo.

Las unidades de la Conductividad Hidráulica, al despejar la ecuación A4.3. son las de una velocidad (L/T). Basados en el Sistema Internacional sería m/s, no obstante para utilizar números más cómodos se utilizan **metros/día**.

4.6.3. TRANSMISIVIDAD (T)

Este parámetro nos indica la facilidad de circulación del agua horizontalmente por una formación geológica (Figura A4.6.), definida como *el caudal de agua que proporciona una sección de ancho unitario de frente acuífero sometido a un gradiente del 100%* (Montero, 2011).

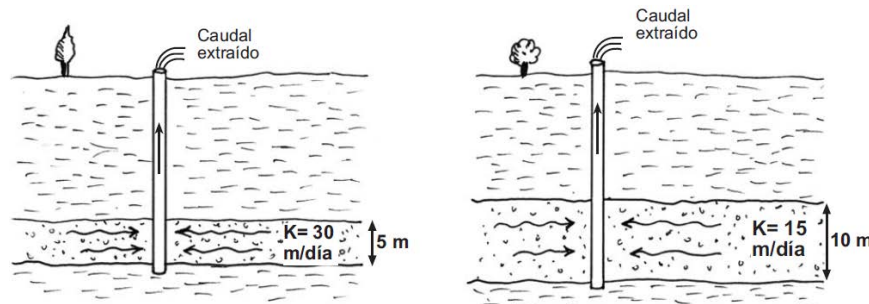


Figura A4.6. Transmisividad en acuíferos bajo régimen de explotación
Fuente: Sánchez, 2011.

Su expresión matemática es (Ecuación A4.4.)

$$T = K \cdot e \quad \text{Ec. A4.4.}$$

T: Transmisividad; K: Permeabilidad; e: Espesor

Debido que las unidades de permeabilidad son L/T y las del espesor L, las unidades de la transmisividad serán L²/T, espresandose normalmente en m²/día.

Como características de este parametro hidráulico, cabe decir que esta es variable en acuíferos libres, dado que su espesor saturado varía con las oscilaciones de la superficie freática; para acuíferos confinados la Transmisividad es constante dado que el espesor también lo es. Con base en este parámetro, es posible caracterizar hidráulicamente un acuífero (Tabla A4.1.).

Tabla A4.1. Clasificación de las formaciones hidrogeológicas según su transmisividad (m²/día)

T (m ² /día)	0	1	10	100	1000
Clasificación	Impermeables	Poco	Algo	Permeable	Muy

		Permeables	Permeable		Permeable
Clasificación del Acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero Pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente

T: Transmisividad

Fuente: Custodio, 1983 citado por Sánchez, 2011.

4.6.4. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S) DE

Representa la cantidad de agua cedida por un prisma de acuífero de un metro cuadrado de sección y altura la de este cuando el nivel piezométrico desciende un metro (Montero, 2011), en otras palabras indica el agua liberada al disminuir la presión en un acuífero confinado (Ecuación A4.5.). Este parámetro, al igual que la porosidad eficaz, es **adimensional**

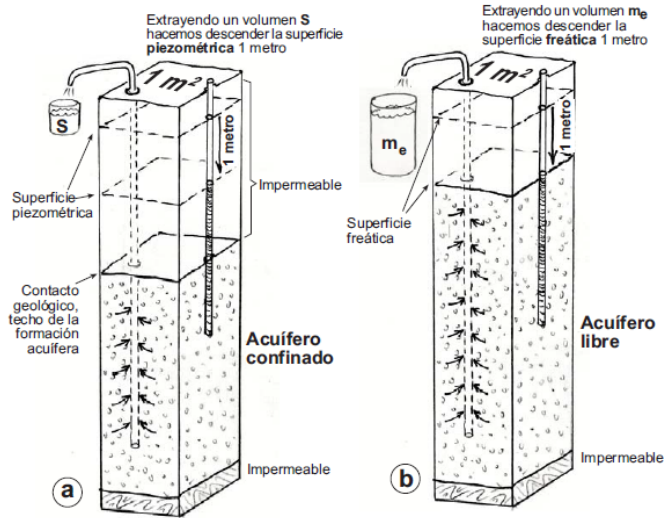


Figura A4.7. Coeficiente de almacenamiento en un acuífero confinado

Fuente: Sánchez, 2011.

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}}$$

Ec. A4.5.

Los valores de este parámetro típicos son (Tabla A4.2.):

Tabla A4.2. Valores típicos de coeficiente de almacenamiento

Tipo de material permeable.	Forma de funcionamiento del acuífero.	Valores medios de S.
Kárstico Calizas y dolomías Jurásicas Calizas y dolomías Cretácicas y terciarias.	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$2 \cdot 10^{-5}$
Calizas y dolomías Cretácicas y terciarias.	Libre	$2 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Poroso intergranular: Gravas y arenas.	Libre	$5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos: Calcarentas marinas terciarias.	Libre	$15 \cdot 10^{-2} - 18 \cdot 10^{-2}$

Fuente: IGME, 1984, citado por Montero, 2011.

5. ANEXO 5.

PARÁMETROS PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA
VULNERABILIDAD DEL
ACUÍFERO: MÉTODO GOD.

PLACA	X	Y	Z	Vulnerabilidad: Método GOD													
				G	O	D (1998)	D (2007)	D (2011)	D (2012)	Indice 1998	Categoría	Indice 2007	Categoría	Indice 2011	Categoría	Indice 2012	Categoría
VI - 01	989418.00	1025608.00	2578.00	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.4	Moderado	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 05	998286.00	1032164.00	2587.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 06	998840.00	1032437.00	2593.00	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.4	Moderado	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 09	992927.00	1029812.00	2582.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 10	1029271.00	990008.00	2758.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 11	986616.00	1024096.00	2581.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 12	986913.00	1023608.00	2587.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 13	990683.00	1029795.00	2595.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	NA	NA	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 18	987556.00	1025873.00	2578.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 19	987702.00	1024099.00	2577.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 20	995657.00	1030539.00	2586.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	NA	NA	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 21	999204.00	1034023.00	2578.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 23	992224.00	1030511.00	2611.00	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 24	993110.00	1031215.00	2608.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	NA	NA	NA	NA	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 25	990430.00	1029505.00	2598.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 26	992030.00	1019520.00	2556.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 28	989332.00	1027265.00	2595.00	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.3	Bajo-Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 30	998976.00	1035790.00	2593.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 32	989496.00	1021567.00	2568.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 33	992003.00	1027171.00	2587.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.4	Moderado
VI - 34	998446.00	1034603.00	2597.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 35	997277.00	1031340.00	2593.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	NA	NA	NA	NA	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 36	994629.00	1030710.00	2587.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 39	993707.00	1026832.00	2582.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 40	988326.00	1027618.00	2585.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 41	993374.00	1026071.00	2585.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 42	995837.00	1030577.00	2596.00	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 44	997093.00	1032730.00	2599.00	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.3	Bajo-Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 53	998327.00	1031109.00	2599.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	NA	NA	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 55	989505.00	1027336.00	2582.00	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
VI - 56	988748.00	1028217.00	2583.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	NA	NA	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
VI - 58	998977.00	1032871.00	2560.00	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	NA	NA	0.4	Moderado	0.4	Moderado	0.4	Moderado
525 - 3	991926.00	1030644.00	2609.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	NA	NA	NA	NA	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado
525 - 4	992302.25	1030834.79	2614.00	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	NA	NA	NA	NA	0.3	Bajo-Moderado	0.3	Bajo-Moderado

6. ANEXO 6.

FICHAS DE LOS RESULTADOS
DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS
PARA LAS MUESTRAS
SUBTERRÁNEAS.

Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	Al-Te-02	Predio:	
Fecha de Muestreo:	08/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1023371.2	Altura (msnm):	2600.7
Latitud (X):	993029.6	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5-9.0	6.5-9.0	-	-	-	6.1
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	15
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	170.4
Sodio	mg-Na/L		-	-	19.54	19.54	19.54	19.54
Potasio	mg-K/L		-	-	5.51	5.64	5.71	5.62
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	11.02	11.02	11.02	11.02
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	2.07	2.11	2.16	2.11
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	17.18	17.36	17.36	17.30
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.76	0.73	0.73	0.74
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	83	85	81	83
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	101.3	103.7	98.8	101.3
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	12.3	12.3	12.3	12.3
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.2	0.2	0.2	0.2
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-04	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1025644.2	Altura (msnm):	2606.6
Latitud (X):	994977.3	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.4
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	15
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	94.0
Sodio	mg-Na/L		-	-	10.41	10.47	10.41	10.43
Potasio	mg-K/L		-	-	1.46	1.46	1.44	1.45
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	3.68	3.68	3.68	3.68
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	1.44	1.44	1.48	1.45
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	15.74	15.56	15.56	15.62
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.68	0.65	0.65	0.66
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	20	20	20	20
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	24.4	24.4	24.4	24.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	37.04	32.92	37.04	35.7
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-05	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1025693.9	Altura (msnm):	2559.4
Latitud (X):	989812.9	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.4
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	16
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	384.3
Sodio	mg-Na/L		-	-	67.7	67.37	68.03	67.70
Potasio	mg-K/L		-	-	10.49	10.23	10.49	10.40
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	4.02	4.06	4.06	4.05
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	6.36	6.36	6.15	6.29
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	5.43	5.52	5.43	5.46
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.51	0.54	0.51	0.52
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	230	210	210	216.7
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	280.6	256.2	256.2	264.3
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	28.8	28.8	28.8	25.0
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.3	0.3	0.3	0.3
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez

Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-06	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1030070.5	Altura (msnm):	2592.4
Latitud (X):	995418.3	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.9
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	17
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	615.3
Sodio	mg-Na/L		-	-	157.83	158.65	157.01	157.83
Potasio	mg-K/L		-	-	7.43	7.3	7.17	7.30
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	18.87	18.87	18.87	18.87
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	4.25	4.25	4.25	4.25
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	6.15	6.15	5.97	6.09
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.65	0.62	0.62	0.63
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	290	290	290	290
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	353.8	353.8	353.8	353.8
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	65.8	65.8	65.8	65.8
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.5	0.5	0.5	0.5
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Si No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-07	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1027620.1	Altura (msnm):	2587.2
Latitud (X):	988337.2	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.9
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	18
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	299.2
Sodio	mg-Na/L		-	-	14.78	14.85	14.85	14.82
Potasio	mg-K/L		-	-	18.06	17.79	17.79	17.88
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	44.09	42.54	42.54	43.06
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	3.92	3.92	3.97	3.94
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	1.05	1.09	1.09	1.07
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.7	0.7	0.73	0.71
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	150	160	150	153
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	183	195.2	183	187.0
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	28.8	32.9	28.8	30.2
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.2	0.2	0.2	0.2
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



Universidad Nacional
de La Plata

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-09	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1029877.5	Altura (msnm):	2602.2
Latitud (X):	990457.5	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5-9.0	6.5-9.0	-	-	-	6
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	17
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	59.3
Sodio	mg-Na/L		-	-	7	7.03	7	7.01
Potasio	mg-K/L		-	-	3.98	4.12	4.05	4.05
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	1.66	1.7	1.7	1.69
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	0.92	0.91	0.91	0.91
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	6.51	6.51	6.51	6.51
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.62	0.62	0.62	0.62
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	21	23	21	22
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	25.62	28.06	25.62	26.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	8.2	12.3	12.3	11
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.6	0.6	0.6	0.6
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	0.44	0.46	0.43	0.44

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Codigo de Muestra	P-Te-10	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1030319.7	Altura (msnm):	2619.2
Latitud (X):	991311.0	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	5
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	17
Solidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	86.7
Sodio	mg-Na/L		-	-	5.72	5.69	5.70	5.70
Potasio	mg-K/L		-	-	5.05	4.99	5.01	5.02
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	3.00	3.00	3.00	3.00
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	3.71	3.72	3.71	3.71
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	5.06	5.05	5.00	5.04
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.65	0.65	0.68	0.66
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	20	20	20	20
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	24.4	24.4	24.4	24.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	37	37	37	37
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.6	0.6	0.6	0.6
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	1.6	1.6	1.6	1.6

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Codigo de Muestra	P-Te-11	Predio:	
Fecha de Muestreo:	07/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1030706.4	Altura (msnm):	2585.3
Latitud (X):	994629.5	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.4
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	17
Solidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	267.9
Sodio	mg-Na/L		-	-	72.1	72.1	72.1	72.10
Potasio	mg-K/L		-	-	1.29	1.29	1.29	1.29
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	2.47	2.54	2.51	2.51
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	1.8	1.8	1.85	1.82
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	8.41	8.32	8.32	8.35
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.84	0.84	0.84	0.84
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	121	122	121	121
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	147.62	148.84	147.62	148.03
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	32.3	32.3	32.3	32.3
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO3	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tabio
Codigo de Muestra	P-Ta-12	Predio:	
Fecha de Muestreo:	08/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1032874.9	Altura (msnm):	2580.4
Latitud (X):	998921.7	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	7
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	18
Solidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	443.5
Sodio	mg-Na/L		-	-	106.69	107.34	107.99	107.34
Potasio	mg-K/L		-	-	4.31	4.58	4.51	4.47
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	17.97	18.16	18.16	18.10
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	3.92	4.02	3.92	3.95
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	3.22	3.29	3.29	3.27
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.54	0.57	0.54	0.55
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	215	210	210	212
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	262.3	256.2	256.2	258.2
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	45.6	45.6	49.6	46.9
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO3	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tabio
Codigo de Muestra	P-Ta-13	Predio:	
Fecha de Muestreo:	08/07/14	Fecha de Reporte:	14/07/14
Longitud (Y):	1034023.7	Altura (msnm):	2603.3
Latitud (X):	999211.4	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.6
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Solidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	340.1
Sodio	mg-Na/L		-	-	19.95	19.95	19.95	19.95
Potasio	mg-K/L		-	-	60.59	62.25	58.93	60.59
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	18.6	18.36	18.6	18.52
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	2.24	2.25	2.24	2.24
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	5.34	5.34	5.25	5.31
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.57	0.57	0.57	0.57
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	90	92	92	91
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	109.8	112.2	112.2	111.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	132	115.2	115.2	120.8
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	Al-Te-02	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1023371.2	Altura (msnm):	2600.7
Latitud (X):	993029.6	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.2
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	16
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	129.0
Sodio	mg-Na/L		-	-	13.44	13.44	13.44	13.44
Potasio	mg-K/L		-	-	5.47	5.60	5.67	5.58
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	10.03	10.03	10.03	10.03
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	1.91	1.91	1.91	1.91
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	11.68	11.68	11.50	11.62
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.69	0.69	0.69	0.69
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	30	30	30	30
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	36.6	36.6	36.6	36.6
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	45.3	45.3	45.3	45.3
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	3.47	3.47	3.47	<0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-04	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1025644.2	Altura (msnm):	2606.6
Latitud (X):	994977.3	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.3
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	118.4
Sodio	mg-Na/L		-	-	10.41	10.47	10.41	10.43
Potasio	mg-K/L		-	-	1.46	1.46	1.44	1.45
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	3.68	3.68	3.68	3.68
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	1.44	1.44	1.48	1.45
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	15.74	15.56	15.56	15.62
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.68	0.65	0.65	0.66
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	40	40	40	40
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	48.8	48.8	48.8	48.8
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	37.04	32.92	37.04	35.7
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Rio Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



Universidad Nacional
de La Plata

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-05	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1025693.9	Altura (msnm):	2559.4
Latitud (X):	989812.9	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.4
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	525.9
Sodio	mg-Na/L		-	-	55.97	55.97	55.97	55.97
Potasio	mg-K/L		-	-	15.15	15.15	15.15	15.15
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	20.73	20.73	20.73	20.73
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	14.47	14.47	14.47	14.47
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	21.15	21.15	21.15	21.15
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.47	0.5	0.47	0.48
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	270	280	280	277
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	329.4	341.6	341.6	337.5
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	57.63	57.63	57.63	57.6
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.32	0.32	0.32	0.32
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



Universidad Nacional
de La Plata

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-06	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1030070.5	Altura (msnm):	2592.4
Latitud (X):	995418.3	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5-9.0	6.5-9.0	-	-	-	6.2
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	423.9
Sodio	mg-Na/L		-	-	43.35	43.35	43.35	43.35
Potasio	mg-K/L		-	-	7.34	7.21	7.07	7.21
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	41.29	41.29	41.29	41.29
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	2.69	2.69	2.69	2.69
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	24.41	24.76	24.76	24.64
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.61	0.61	0.61	0.61
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	220	220	220	220
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	268.4	268.4	268.4	268.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	32.9	32.9	32.9	32.9
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.5	0.5	0.5	0.5
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



Universidad Nacional
de La Plata

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-07	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1027620.1	Altura (msnm):	2587.2
Latitud (X):	988337.2	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	6.9
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	18
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	278.4
Sodio	mg-Na/L		-	-	20.05	20.14	20.05	20.08
Potasio	mg-K/L		-	-	8.94	8.80	8.80	8.85
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	18.10	18.10	18.10	18.10
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	3.78	3.78	3.78	3.78
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	18.81	18.81	18.81	18.81
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.66	0.64	0.64	0.64
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	150	160	150	153
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	183.0	195.2	183.0	187.1
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	20.6	20.6	20.6	20.6
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.2	0.2	0.2	0.2
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez

Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.

REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-09	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1029877.5	Altura (msnm):	2602.2
Latitud (X):	990457.5	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	5.7
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	94.5
Sodio	mg-Na/L		-	-	10.50	10.50	10.50	10.50
Potasio	mg-K/L		-	-	3.00	3.00	3.00	3.00
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	4.34	4.34	4.34	4.34
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	1.38	1.38	1.38	1.38
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	7.66	7.66	7.66	7.66
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.55	0.55	0.55	0.55
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	20	20	20	20
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	24.4	24.4	24.4	24.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	41.2	41.2	41.2	41.2
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.6	0.6	0.6	0.6
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	0.9	0.9	0.9	0.9

Condiciones Climáticas: Lluvia: Si No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-10	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1030319.7	Altura (msnm):	2619.2
Latitud (X):	991311.0	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5 - 9.0	6.5 - 9.0	-	-	-	5.1
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	56.2
Sodio	mg-Na/L		-	-	3.59	3.59	3.59	3.59
Potasio	mg-K/L		-	-	4.41	4.41	4.41	4.41
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	3.06	3.06	3.06	3.06
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	2.76	2.76	2.76	2.76
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	3.42	3.42	3.42	3.42
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.69	0.69	0.66	0.68
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	22	22	22	22
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	26.8	26.8	26.8	26.8
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	8.2	8.2	8.2	8.2
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.7	0.7	0.7	0.7
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	2.6	2.6	2.6	2.6

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tenjo
Código de Muestra	P-Te-11	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1030706.4	Altura (msnm):	2585.3
Latitud (X):	994629.5	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5-9.0	6.5-9.0	-	-	-	6.2
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	226.5
Sodio	mg-Na/L		-	-	50.37	50.37	50.37	50.37
Potasio	mg-K/L		-	-	6.40	6.40	6.40	6.40
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	3.60	3.60	3.60	3.60
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	1.26	1.26	1.26	1.26
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	11.15	11.33	11.15	11.21
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	103	105	105	104
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	125.7	128.1	128.1	127.3
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	20.6	20.6	20.6	20.6
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tabio
Código de Muestra	P-Ta-12	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1032874.9	Altura (msnm):	2580.4
Latitud (X):	998921.7	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5-9.0	6.5-9.0	-	-	-	6.1
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	19
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	446.0
Sodio	mg-Na/L		-	-	106.69	107.34	107.99	107.34
Potasio	mg-K/L		-	-	4.31	4.58	4.51	4.47
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	17.97	18.16	18.16	18.10
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	3.92	4.02	3.92	3.95
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	3.22	3.29	3.29	3.27
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.54	0.57	0.54	0.55
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	215	213	213	214
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	262.3	259.9	259.9	260.7
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	45.6	45.6	49.6	46.9
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



Proyecto:
Evaluación química y ambiental del recurso subterráneo de la
Cuenca del Río Chicú de la Sabana de Bogotá, Colombia.



REPORTE DE RESULTADOS POR POZO

Analista:	Giovanna Duque	Municipio/Vereda:	Tabio
Código de Muestra	P-Ta-13	Predio:	
Fecha de Muestreo:	01/10/14	Fecha de Reporte:	01/12/14
Longitud (Y):	1034023.7	Altura (msnm):	2603.3
Latitud (X):	999211.4	Error GPS (m):	

TABLA DE RESULTADOS

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO	LÍMITE PERMISIVO		MUESTRAS N°			
			a	b	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	\bar{X}
pH	Unidades		4.5-9.0	6.5-9.0	-	-	-	6.2
Temperatura	°C		-	-	-	-	-	20
Sólidos Disueltos	mg-SD/L		-	-	-	-	-	340.1
Sodio	mg-Na/L		-	-	19.95	19.95	19.95	19.95
Potasio	mg-K/L		-	-	60.59	62.25	58.93	60.59
Calcio	mg-Ca/L		-	60.0	18.6	18.36	18.6	18.52
Magnesio	mg-Mg/L		-	36.0	2.24	2.25	2.24	2.24
Hierro	mg-Fe/L		5.0	0.3	5.34	5.34	5.25	5.31
Plomo	mg-Pb/L		5.0	0.01	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cobre	mg-Cu/L		0.2	1.0	0.57	0.57	0.57	0.57
Alcalinidad Total	mg-CaCO ₃ /L		-	200.0	90	92	92	91
Bicarbonatos	mg-HCO ₃ /L		-	-	109.8	112.2	112.2	111.4
Sulfatos	mg-SO ₄ /L		-	250.0	132	115.2	115.2	120.8
Cloruros	mg-Cl/L		-	250.0	0.4	0.4	0.4	0.4
N-NO ₃	mg-NO ₃ /L		-	10.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

Condiciones Climáticas: Lluvia: Sí No

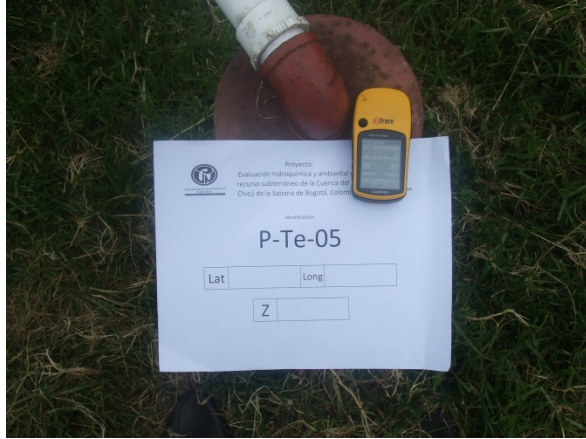
Normas de Referencia	a) Decreto 1594/1984. MAVDT, Art. 40: Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso
	b) Resolución 2115/2007. MAVDT, Art. 3, 4, 5, 6, 7

Fecha	Elaboró	Revisó
16/06/2014	Cristian Camilo López Velandia	Dora Luz Gomez



7. ANEXO 7.

REGISTRO FOTOGRÁFICO

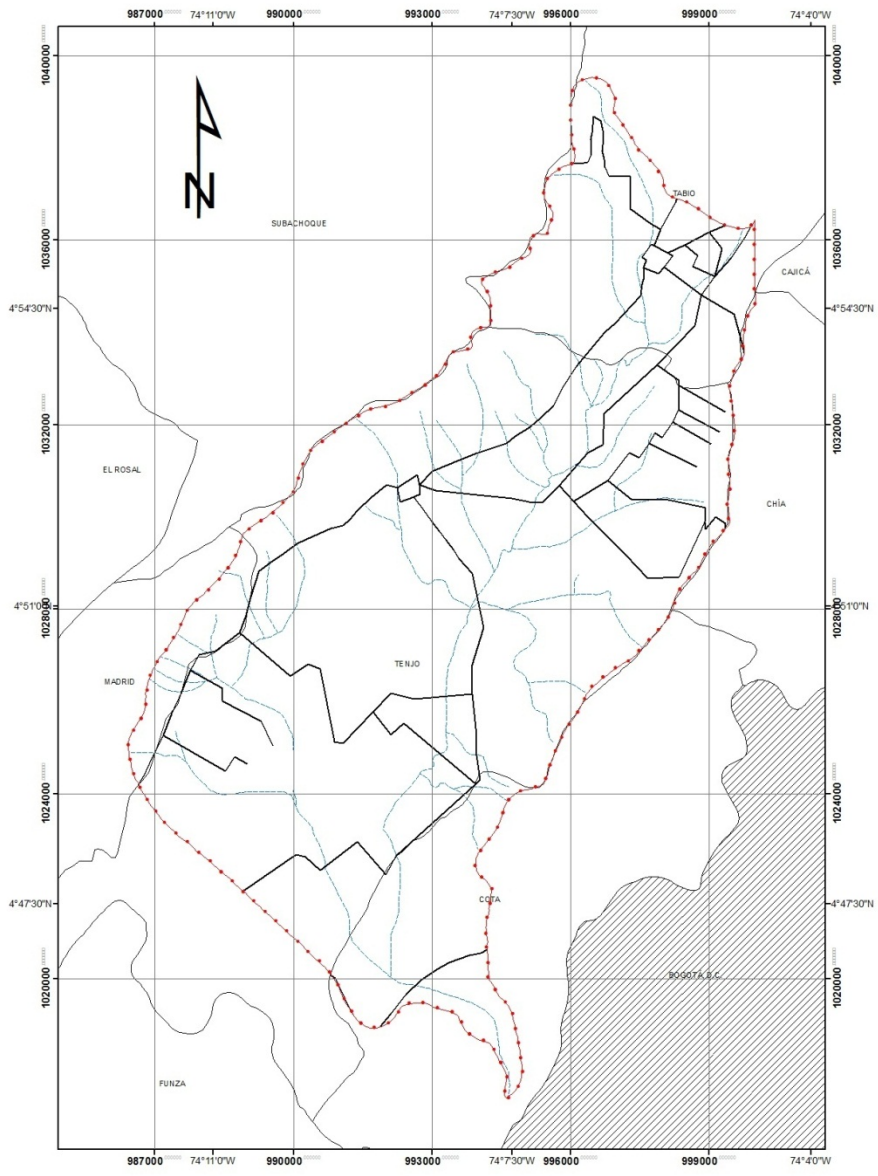






8. ANEXO 8.

PLANOS



MAPA DE LOCALIZACIÓN CUENCA DEL RÍO CHICÚ

Convenciones

- BOGOTÁ, D.C.
Capital de la Republica
- Municipios
- Cabecera Municipal
- Cuenca del Rio Chicú
- Vias
- Rios y Quebradas

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

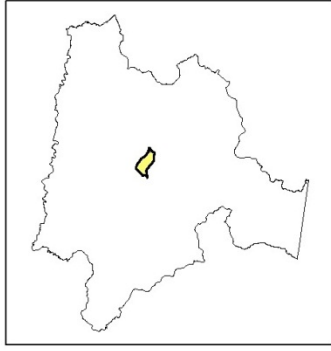
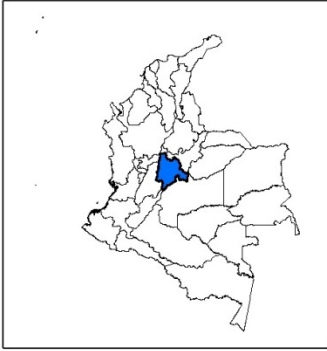
Fuente:
**REPÚBLICA DE COLOMBIA
CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
(CAR)**

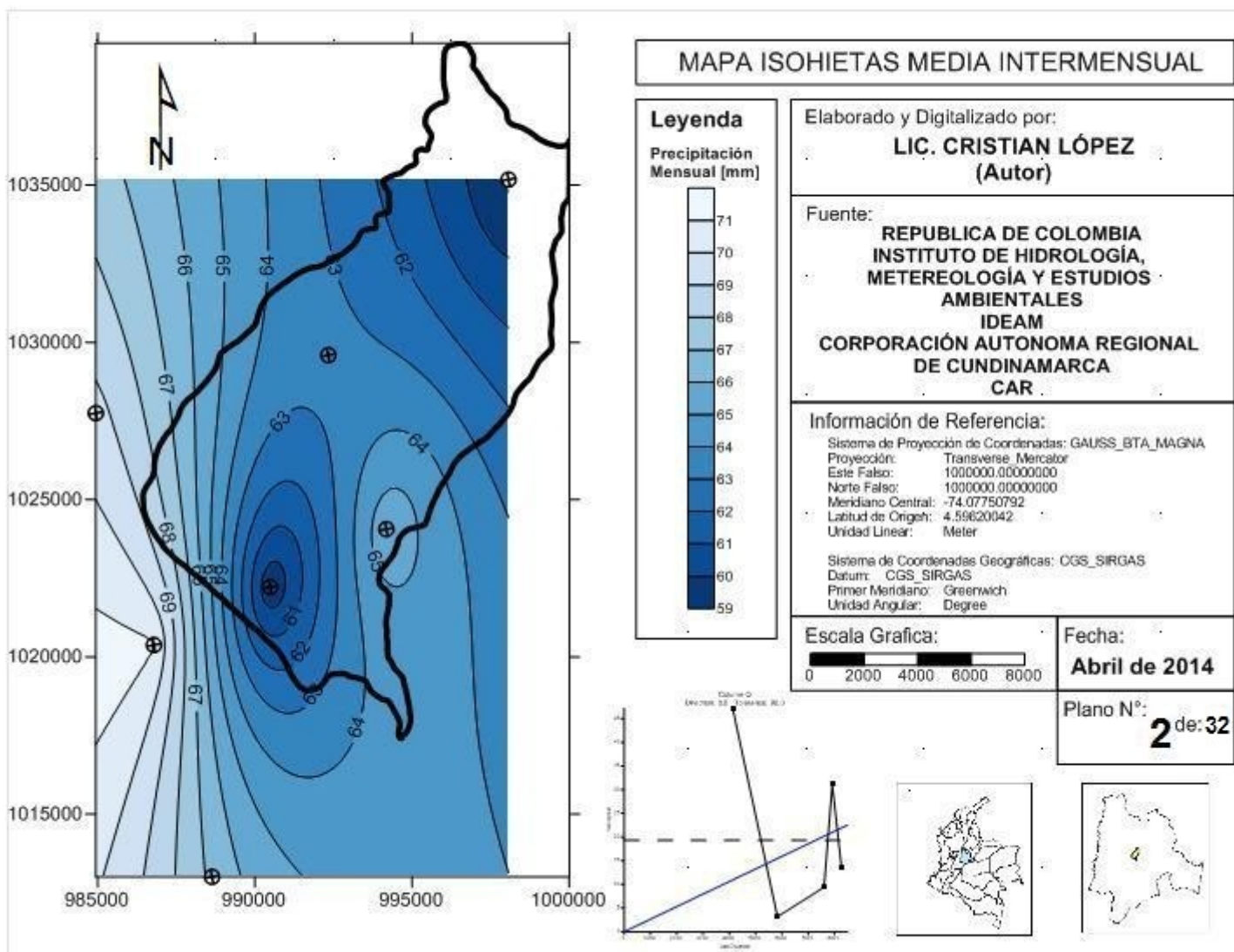
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Linear: Meter

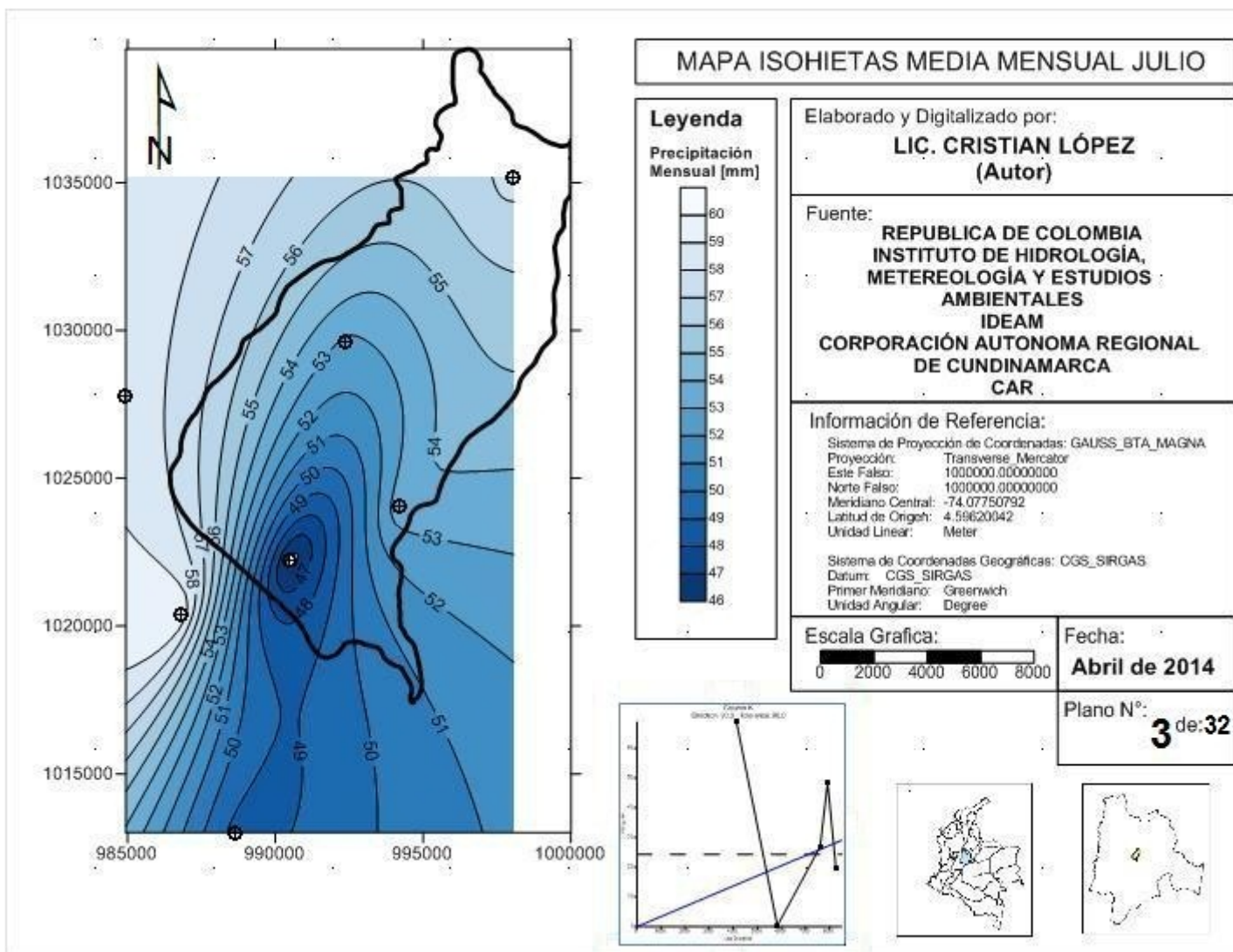
Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

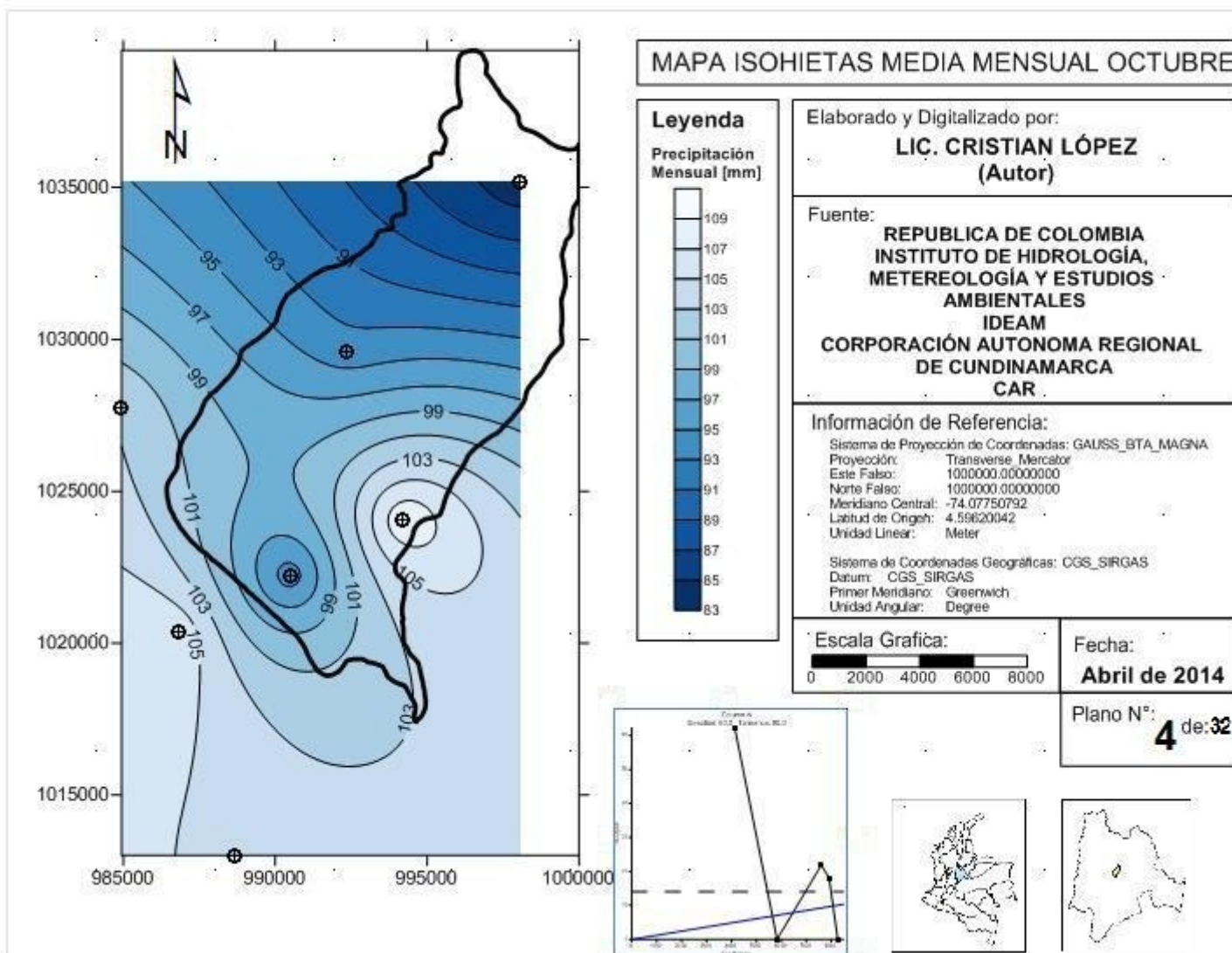
Escala Grafica:
0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000
Metros

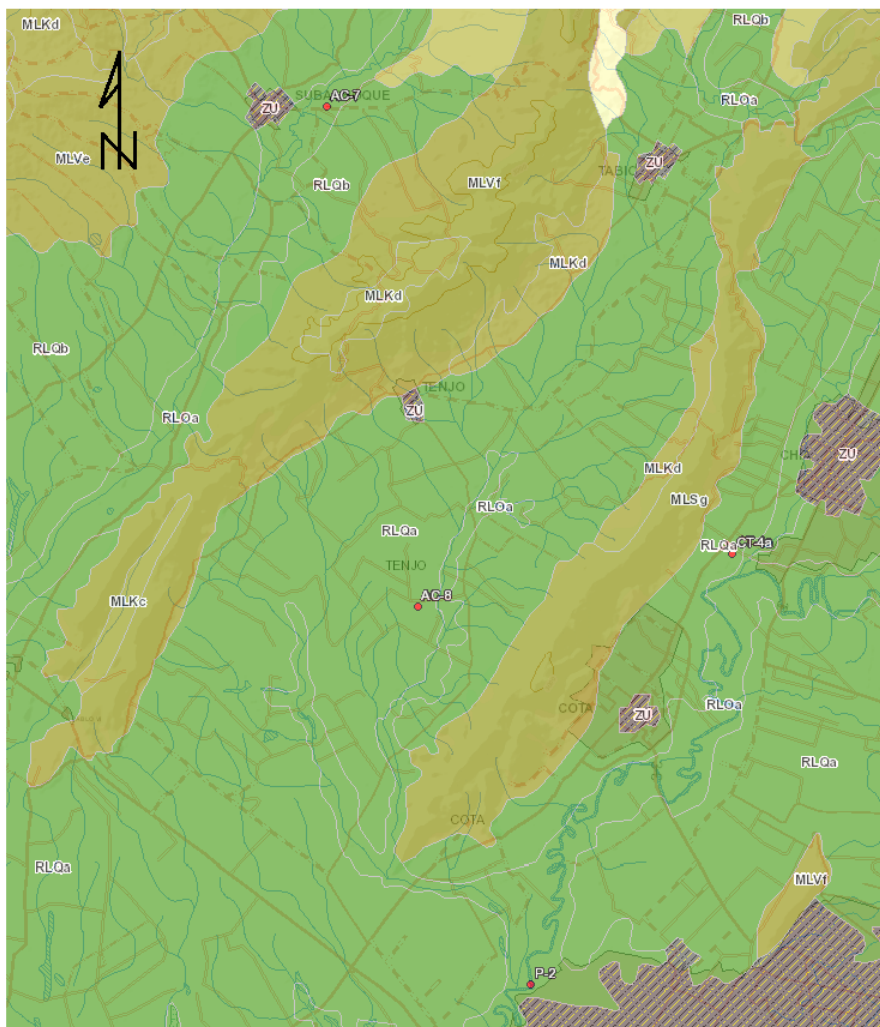
Plano N°: **1** de **32** Fecha: **Mayo de 2014**











Mapa de Suelos

Convenciones

Suelos de Planicie

- Complejo Pachic Melanudands – Andic Dystrudepts, Símbolo RLQ. Fase RLQa
- Asociación Typic Endoaquepts – Aeric Endoaquepts – Thaptic Hapludands. Símbolo RLO. Fase: RLOa.

Zona Urbana

Suelos de Montaña

- Consociación Typic Eutrudepts. Símbolo MLS Fase MLSg
- Asociación Humic Lithic Eutrudepts – Typic Placudands – Dystric Eutrudepts. Símbolo MLV Fases MLVe, MLVf
- Complejo Pachic Melanudands - Typic Hapludands – Andic Dystrudepts. Símbolo MLK. Fase: MLKc, MLKd
- Asociación Typic Hapludands – Pachic Melanudands- Humic Lithic Dystrudepts. Símbolo MGT Fase MGTd

Fuente:

INSTITUTO GEOGRÁFICO
AGUSTÍN CODAZZI

Estudio General de Suelos y
Zonificación de Tierras del
Departamento de Cundinamarca

2000

Escala:

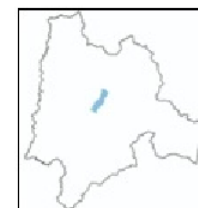
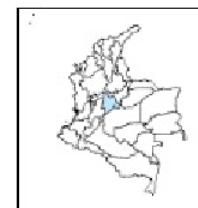
1: 100000

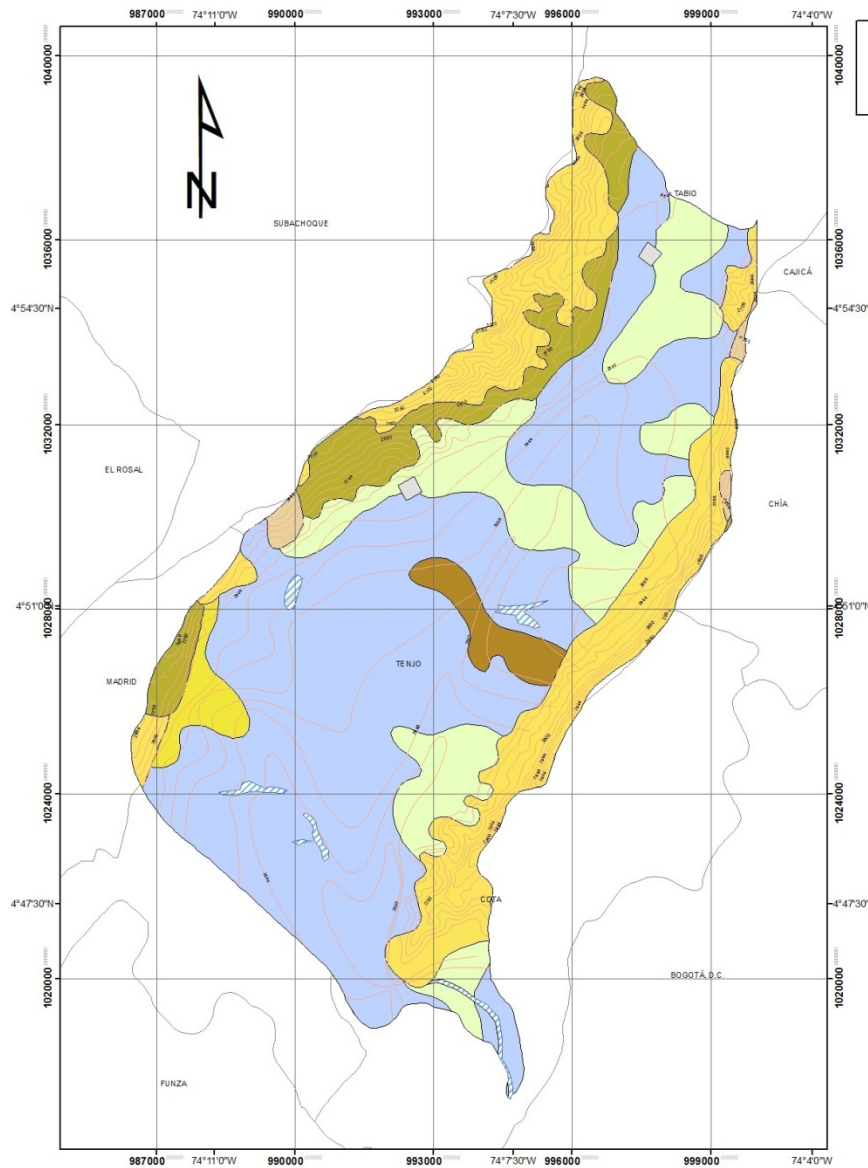
Plano N°:

5 de 32

Fecha:

Abril de 2014





MAPA DE USO DE SUELOS CUENCA DEL RIO CHICÚ

Convenciones

- Curva Nivel Topográfico [m.s.n.m.]
- Vías
- Municipios
- Cuerpos de Agua

Usos de Suelo

- VN1: Zonas de Vegetación Natural o Artificial
- BF1: Zonas de Vegetación Natural o Artificial
- CF1-x: Zonas Esencialmente Agrícolas
- CF2-s: Zonas Esencialmente Agrícolas
- PF1-t: Zonas esencialmente de pastoreo
- PF2-r: Zonas esencialmente de pastoreo
- TF2-y: Zonas Agrícolas y Ganaderas
- ZU: Zona Urbana

Elaborado y Digitalizado por:

**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
(CAR)**

Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Linear: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:

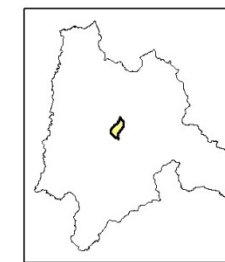
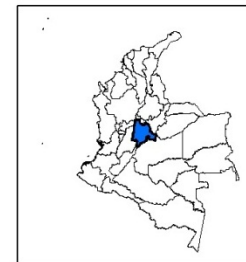


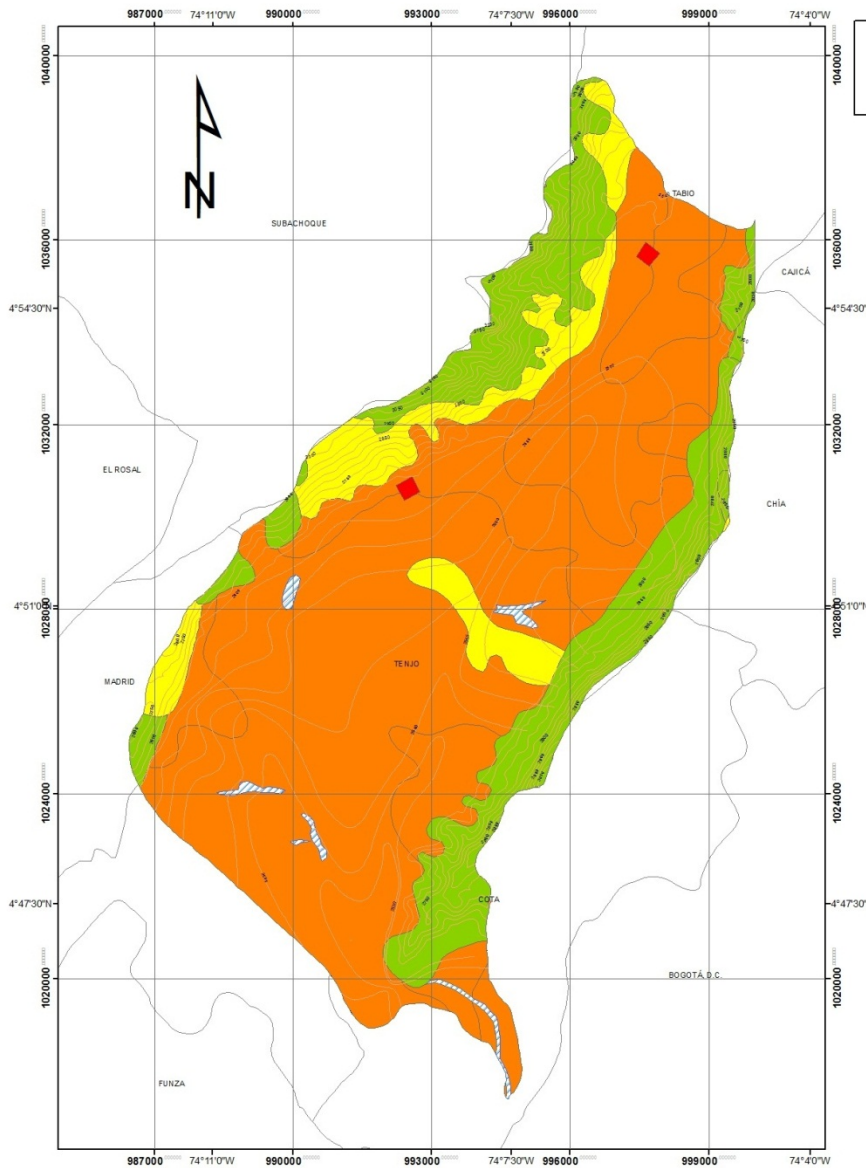
Plano N°:

6 de 32

Fecha:

Mayo de 2014





**MAPA DE ESCURRIMIENTO PARA EL MES DE JULIO
CUENCA DEL RIO CHICÚ**

Convenciones

- Curva Nivel Topográfico [m.s.n.m.]
- Vías
- Municipios
- Cuerpos de Agua

**Escorrentamiento [mm]
Mes: Julio**

- 18.6
- 18.7
- 18.9
- 19.9

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

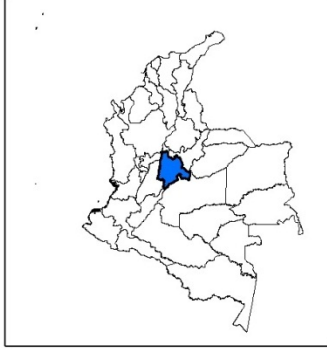
Fuente:
**REPÚBLICA DE COLOMBIA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
(CAR)**

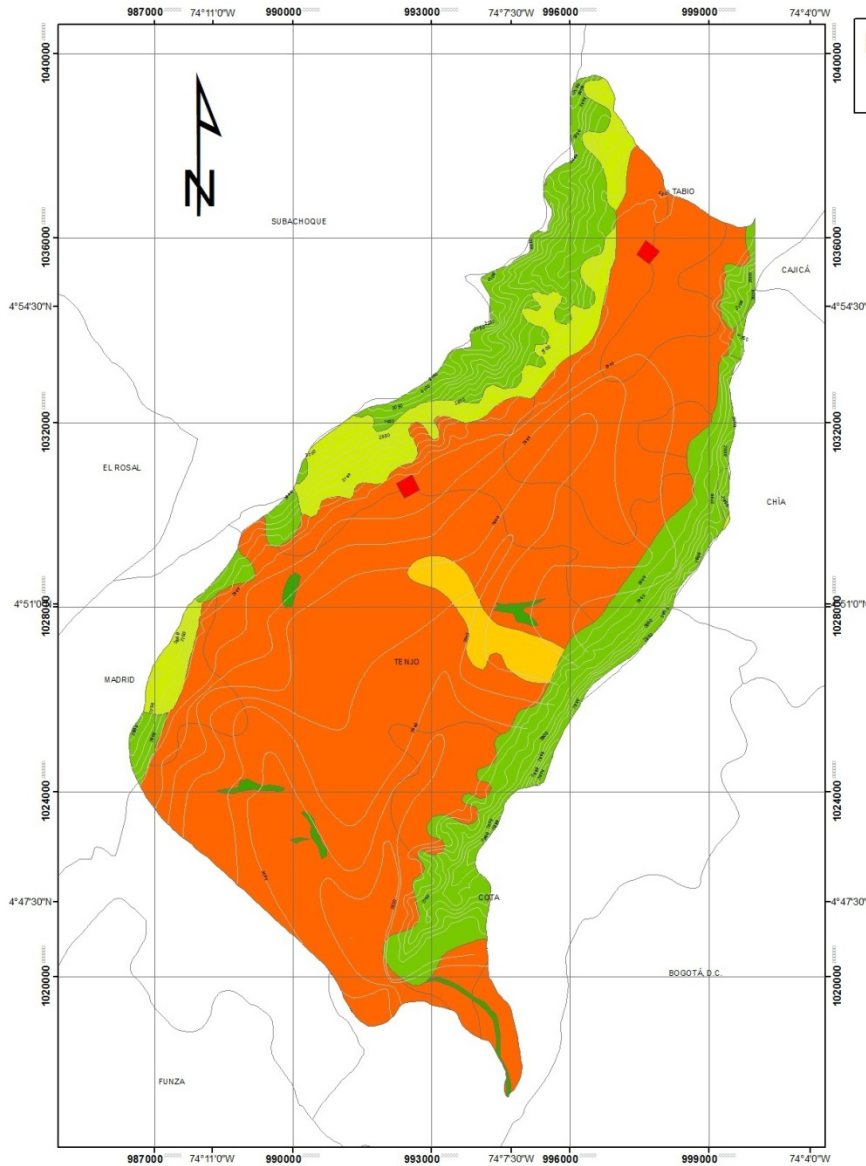
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:

Plano N°: **7** de 32 Fecha: **Mayo de 2014**





**MAPA DE ESCURRIMIENTO PARA EL MES DE OCTUBRE
CUENCA DEL RIO CHICÚ**

Convenciones

- Curva Nivel Topográfico [m.s.n.m.]
- Vías
- Municipios
- ▨ Cuerpos de Agua

**Escorrentamiento [mm]
Mes: Octubre**

- 36.4
- 36.5
- 36.6
- 36.8
- 41.3

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

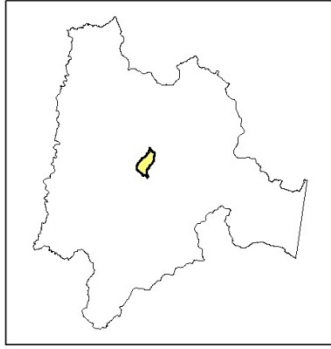
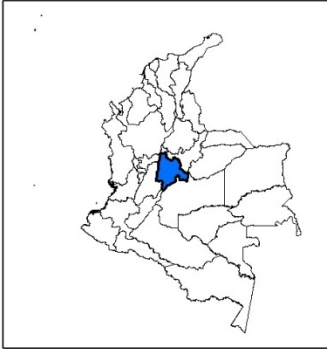
Fuente:
**REPÚBLICA DE COLOMBIA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
(CAR)**

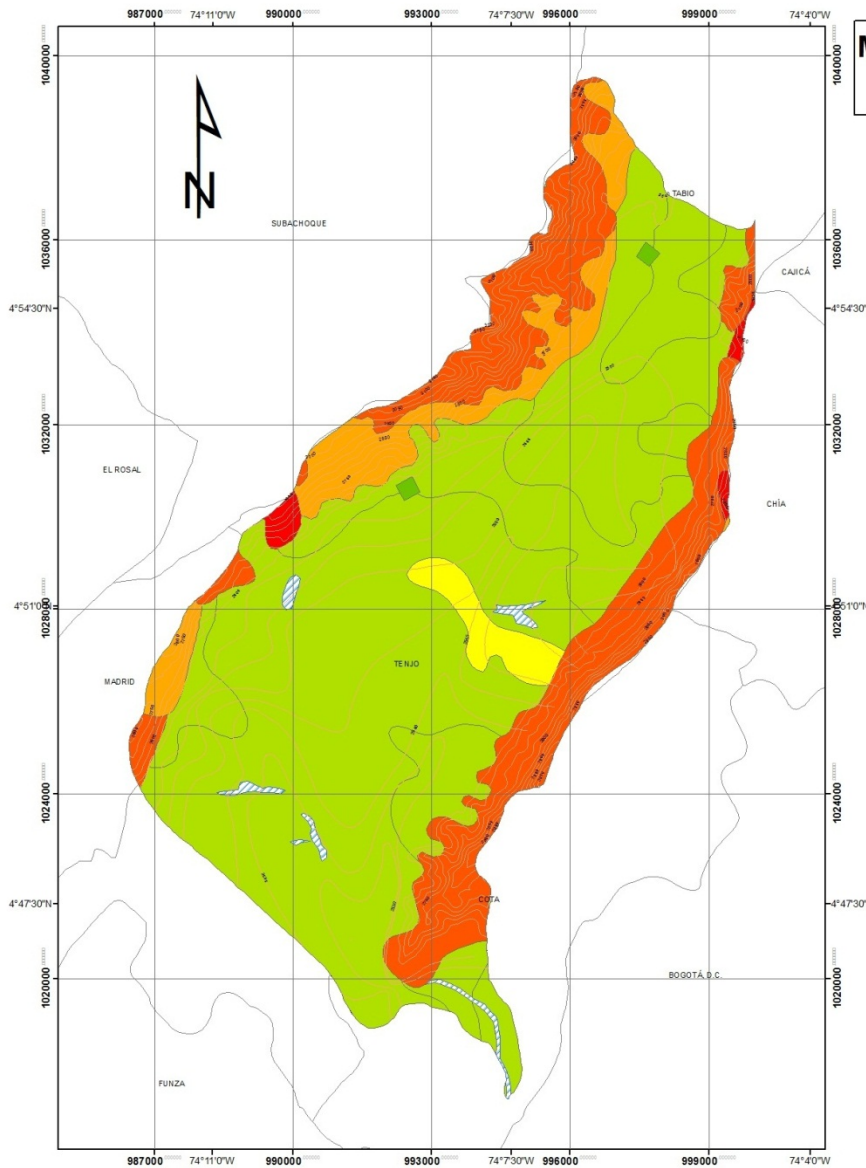
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:
0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000 Metros

Plano N°: **8** de 32 Fecha: **Mayo de 2014**





**MAPA DE INFILTRACIÓN PARA EL MES DE OCTUBRE
CUENCA DEL RIO CHICÚ**

Convenciones

- Curva Nivel Topográfico [m.s.n.m.]
- Vías
- Municipios
- ▨ Cuerpos de Agua

**Infiltración [mm]
Mes: Octubre**

- 5.1
- 16.9
- 17.4
- 17.6
- 17.8
- 17.9

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

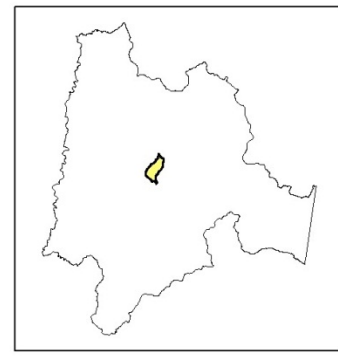
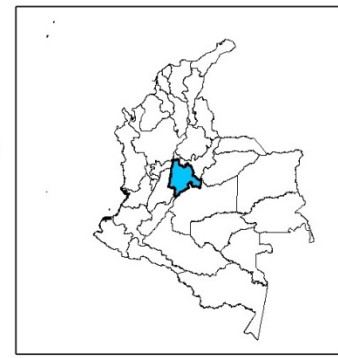
Fuente:
**REPÚBLICA DE COLOMBIA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
(CAR)**

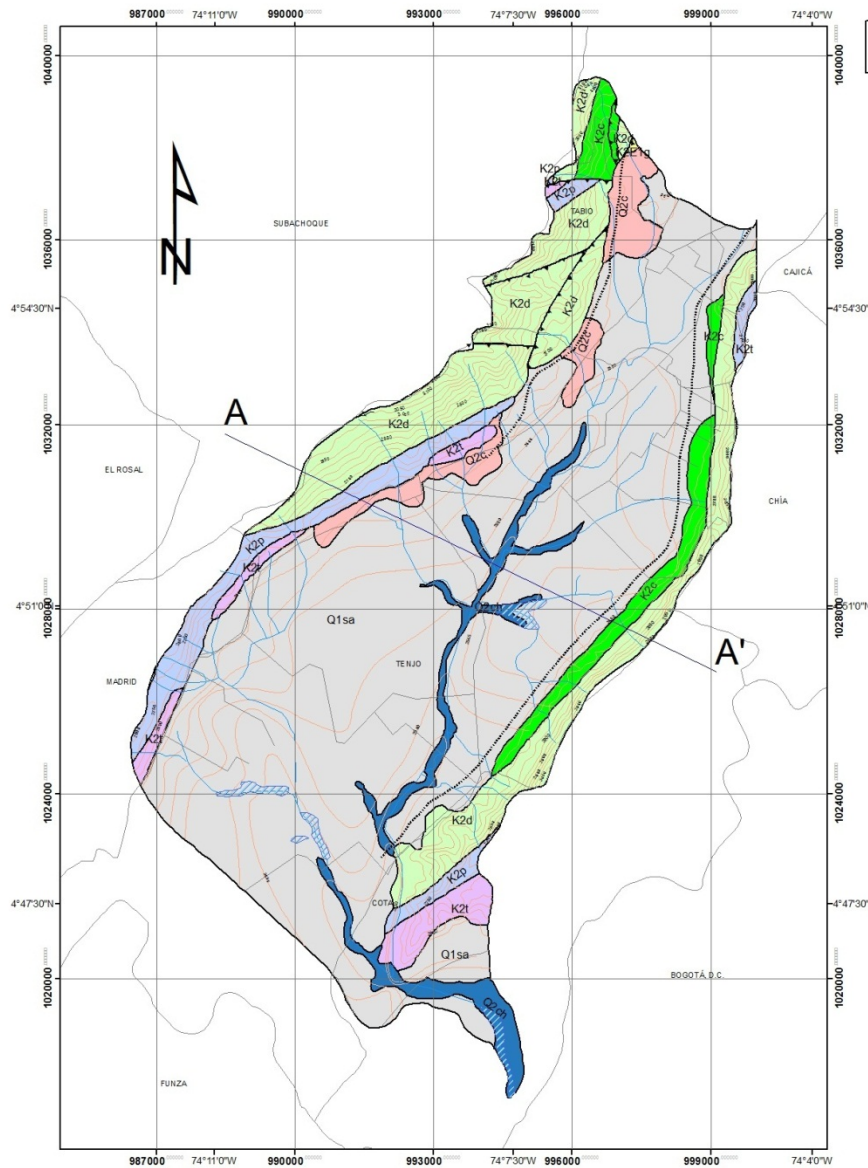
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:
0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000 Metros

Plano N°: **9** de 32 Fecha: **Mayo de 2014**





MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RIO CHICÓ

Convenciones

- Cuerpos de Agua
- Rios
- Vías_chicó
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Corte A-A

Geología Estructural

- Anticinal
- Falla Cubierta
- Falla de Cabalgamiento
- Falla de Rumbo

Geología

- Formación Chía (Q2ch)
- Depositos de Pendiente (Q2c)
- Formación Sabana (Q1sa)
- Formación Guaduas (K2E1g)
- Formación Labor - Tierna (K2t)
- Formación Plaeners (K2p)
- Formación Arenisca Dura (K2d)
- Formación Conejo (K2c)
- Formación La Frontera (K2f)
- Formación Simijaca (K2s)
- ?

Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

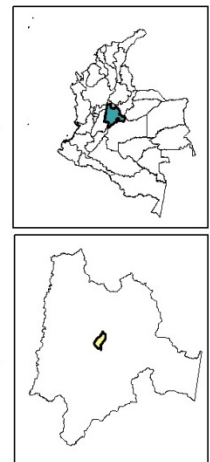
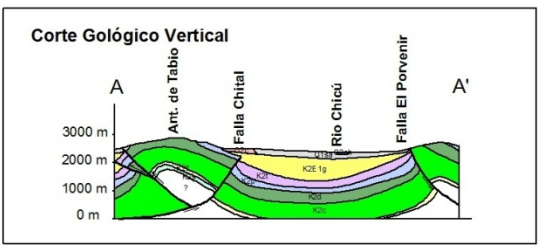
Fuente:
**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INST. COL. DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS
2005**
Escala: 1:100,000

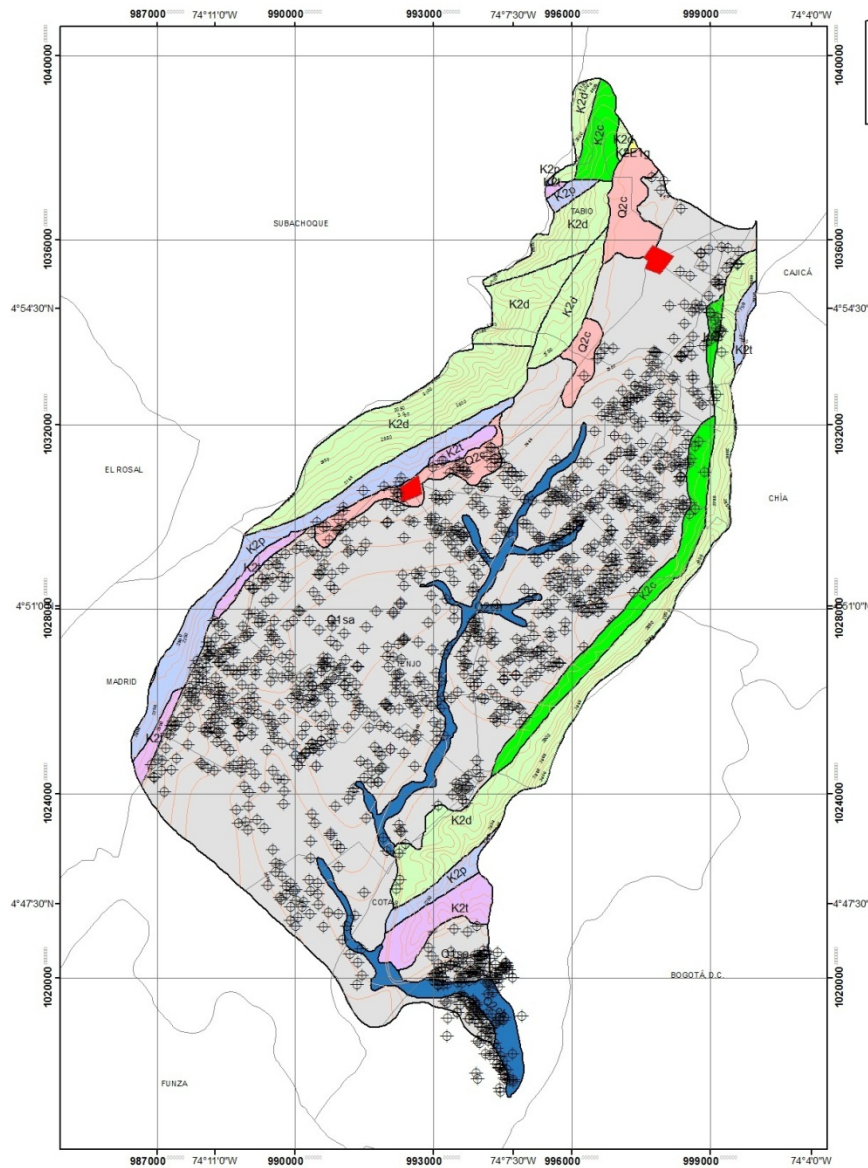
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Linear: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N° **10** de 32 Fecha: **Febrero de 2014**





MAPA DE LOCALIZACIÓN DE POZOS CENSO DE USUARIOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías_chicú
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- ◆ Pozos

Geología

- Formación Chía (Q2ch)
- Depositos de Pendiente (Q2c)
- Formación Sabana (Q1sa)
- Formación Guaduas (K2E1g)
- Formación Labor - Tierra (K2l)
- Formación Plaeners (K2p)
- Formación Arenisca Dura (K2d)
- Formación Conejo (K2c)
- Formación La Frontera (K2f)
- Formación Simijaca (K2s)

Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
**REPÚBLICA DE COLOMBIA
CORPORACIÓN AUTÓNOMA
DE CUNDINAMARCA - CAR
2012**

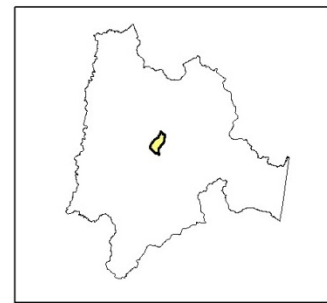
Escala: 1:100,000

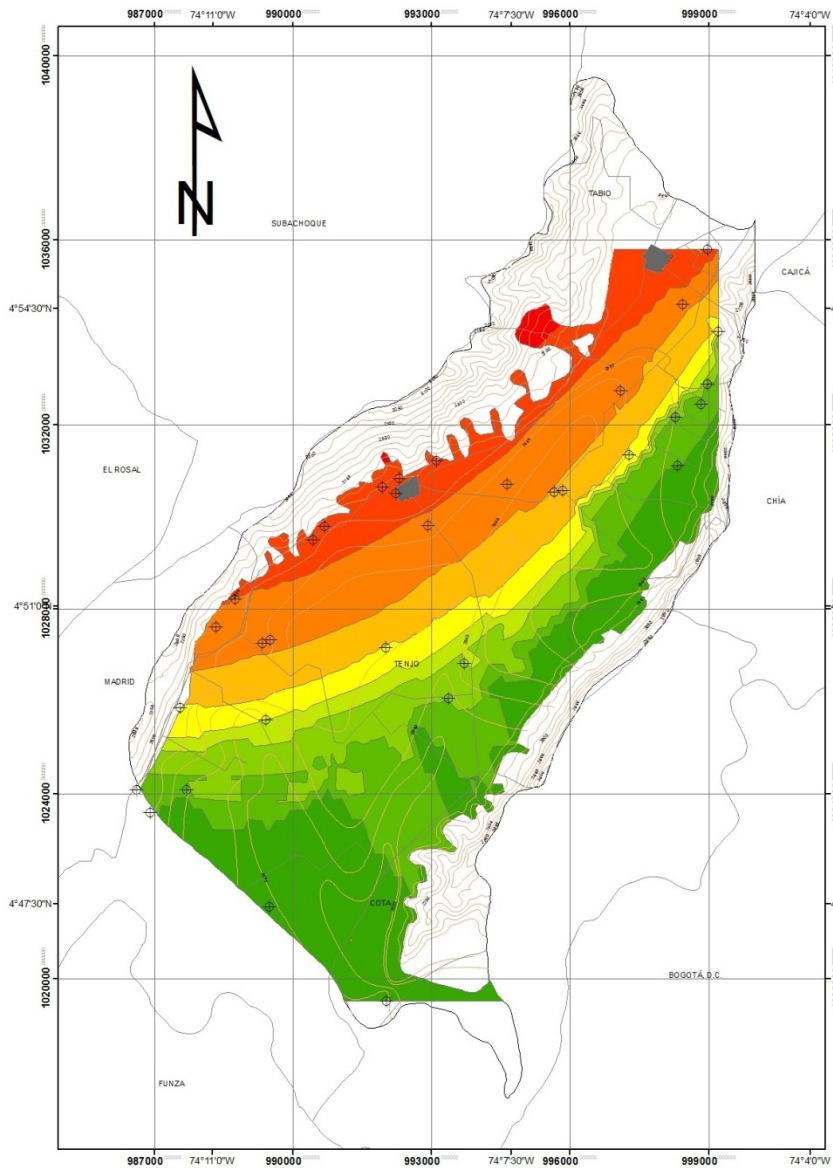
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:
0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000 Metros

Plano N°: **11** de 32 Fecha: **Julio de 2014**





MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA AÑO 1998

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

**Niveles Freáticos
Año 1998 (m.s.n.m.)**

	2547.1		2578.3
	2555.9		2593.1
	2561.1		2617.9
	2564.2		2659.8
	2569.5		

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

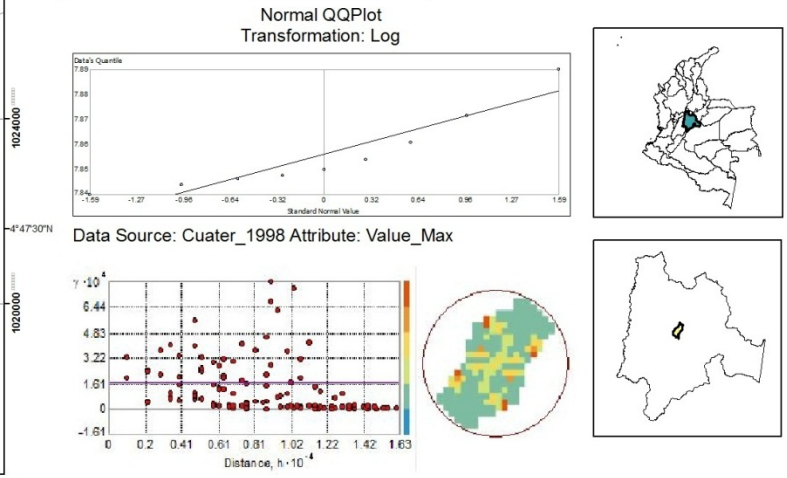
Fuente:
**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

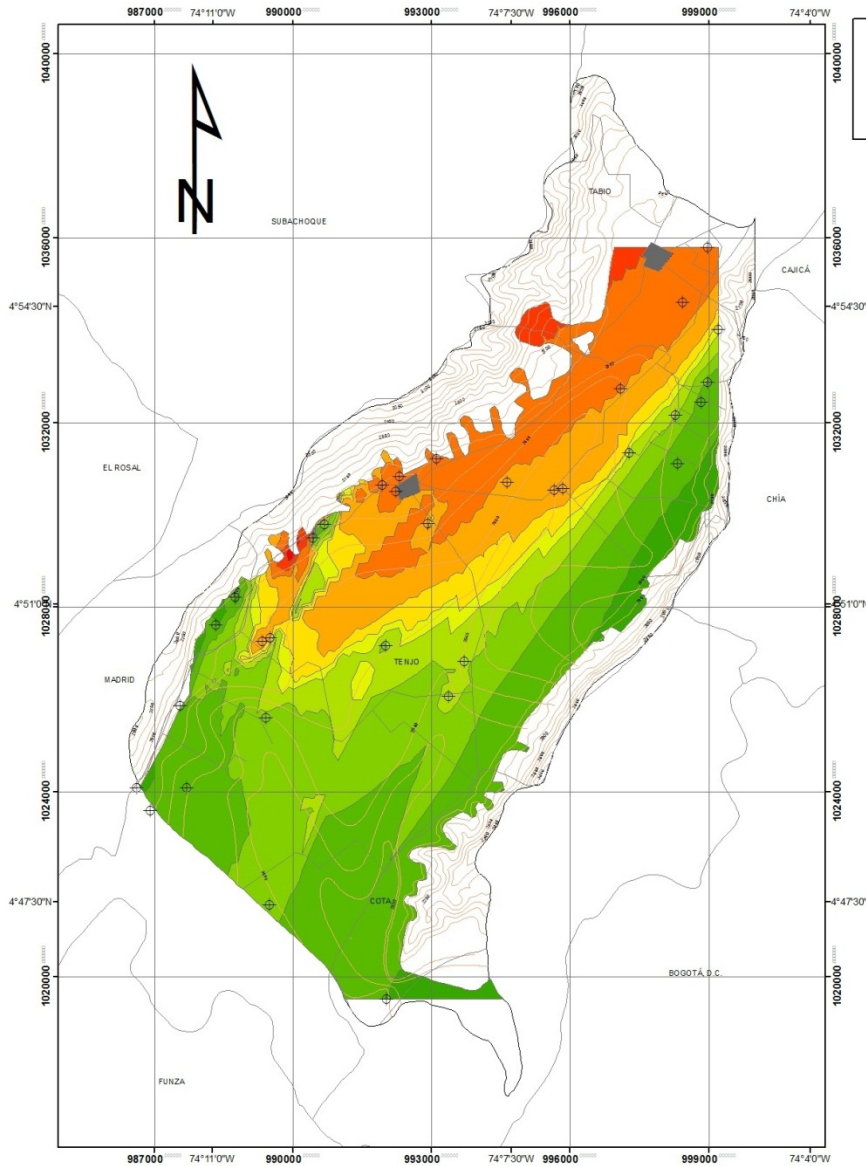
Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59520042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:
0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000 Metros

Plano N°: **12** de 32 Fecha: **Agosto de 2014**





MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA AÑO 2007

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

**Niveles Freáticos
Año 2007 (m.s.n.m.)**

	2532.0		2569.9
	2549.6		2578.8
	2558.6		2596.4
	2563.1		2631.2
	2565.4		2699.7

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

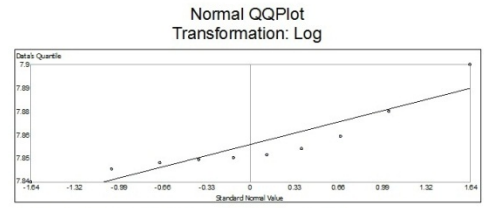
Fuente:
**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59520042
Unidad Lineal: Meter

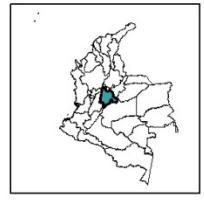
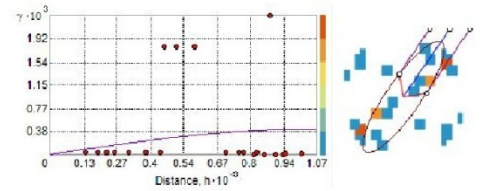
Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

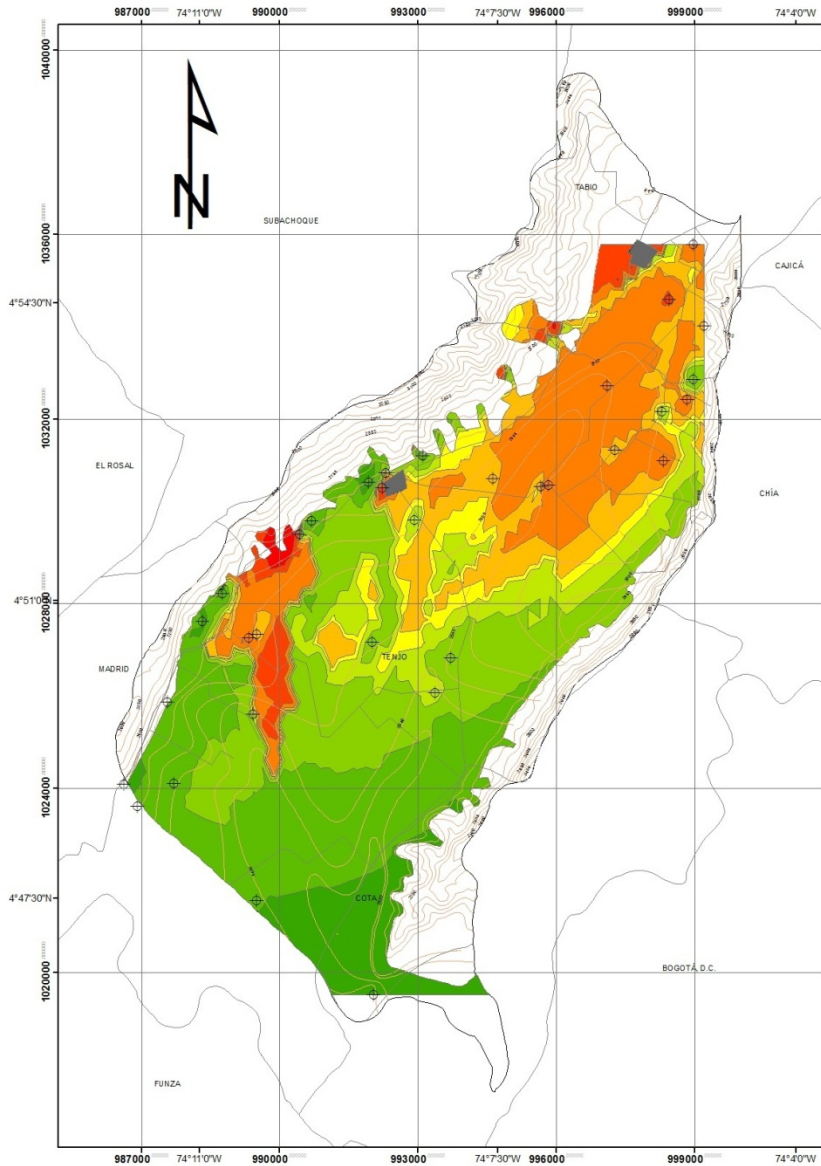
Escala Grafica:
0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000 Metros

Plano N°: **13** de 32 Fecha: **Agosto de 2014**



Data Source: Cuater_07 Attribute: Value_Max





MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA AÑO 2011

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- + Pozos

Niveles Freáticos Año 2011 (m.s.n.m.)

- | | | | |
|--|--------|--|--------|
| | 2539.7 | | 2572.2 |
| | 2556.2 | | 2579.8 |
| | 2563.7 | | 2596.2 |
| | 2567.2 | | 2632.1 |
| | 2568.8 | | |

Elaborado y Digitalizado por:

**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:

**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

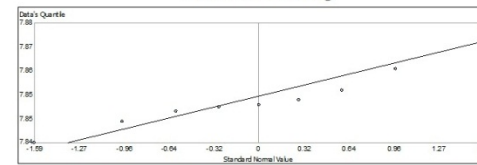
Escala Grafica:



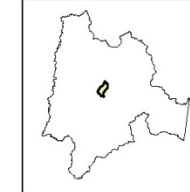
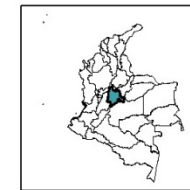
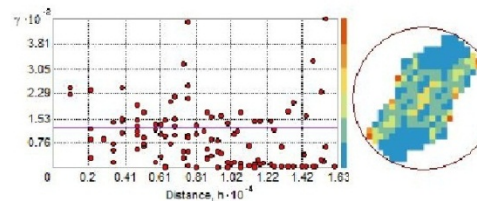
Plano N°: **14** de 32

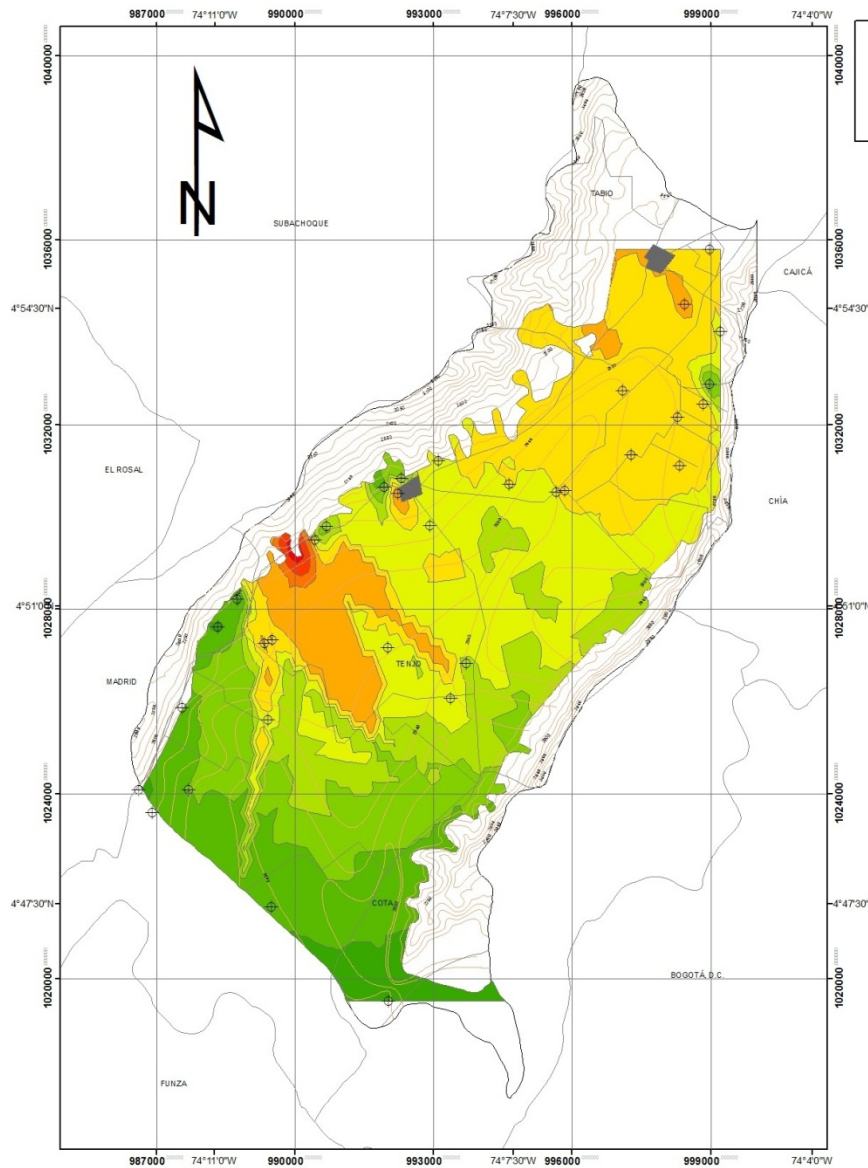
Fecha: **Agosto de 2014**

Normal QQPlot
Transformation: Log



Data Source: Cuater_2011 Attribute: Value_Max





MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA AÑO 2012

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Niveles Freáticos Año 2012 (m.s.n.m.)

- 2538.8
- 2581.1
- 2550.0
- 2597.8
- 2557.5
- 2622.6
- 2562.5
- 2659.6
- 2714.8

Elaborado y Digitalizado por:

**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:

**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59520042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

Escala Grafica:



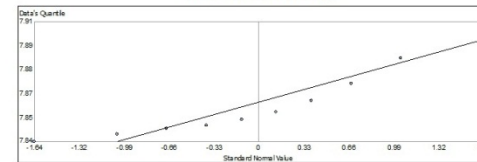
Plano N°:

15 de 32

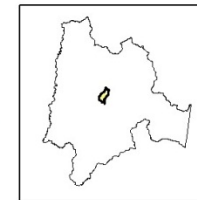
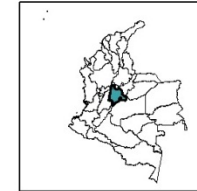
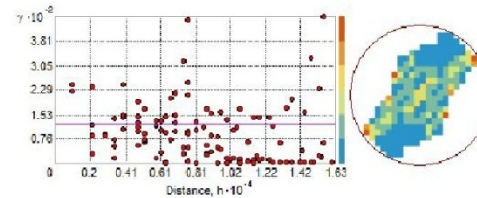
Fecha:

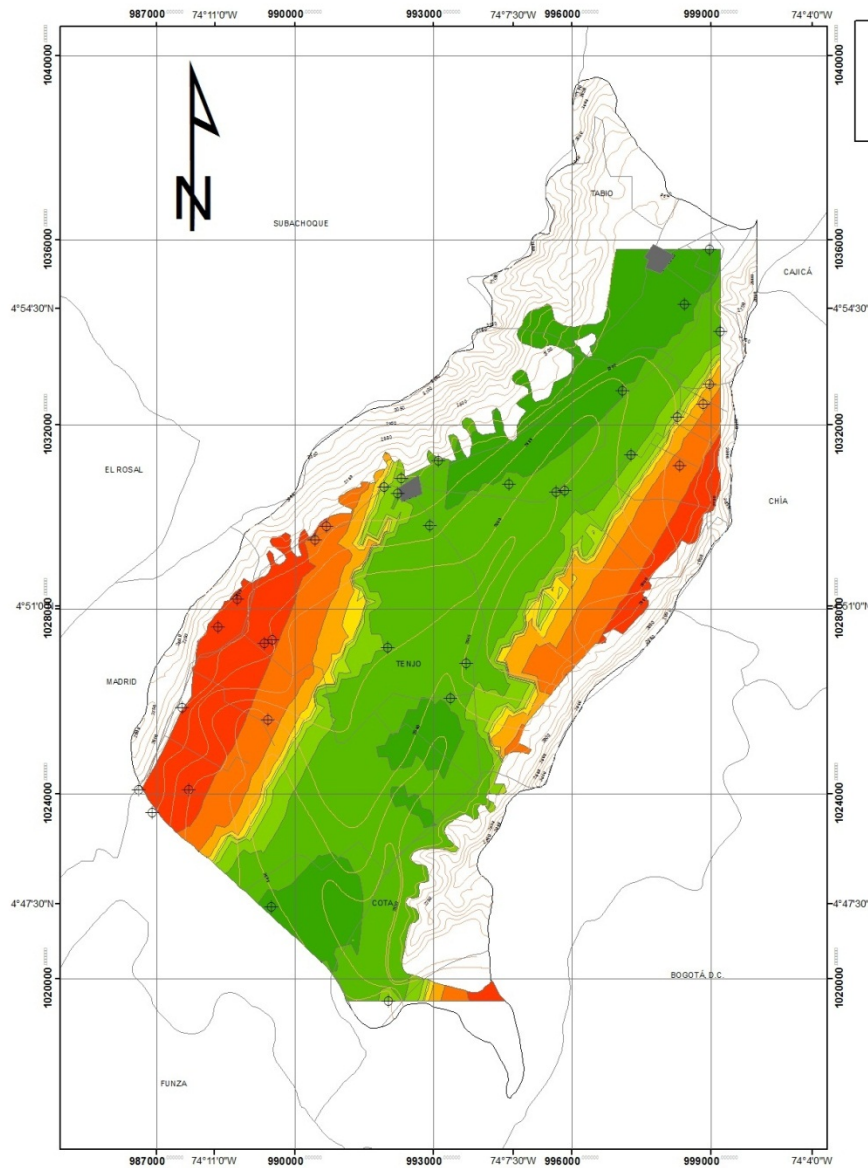
Agosto de 2014

Normal QQPlot
Transformation: Log



Data Source: Cuater_2012 Attribute: Value_Max





MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA VARIACIÓN 1998 - 2007

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- + Pozos

Niveles Freáticos Variación Año 1998 - 2007 (m.s.n.m.)



Elaborado y Digitalizado por:

**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:

**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

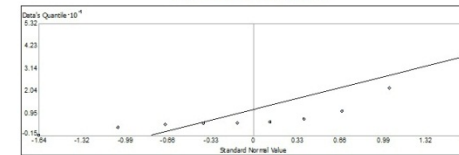
Escala Grafica:



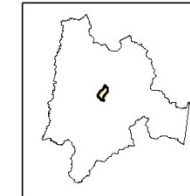
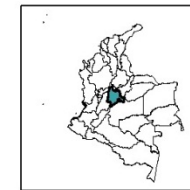
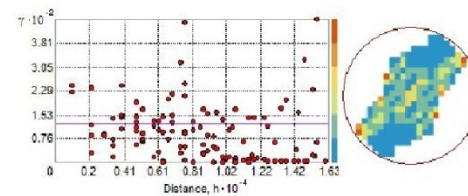
Plano N°: **16** de 32

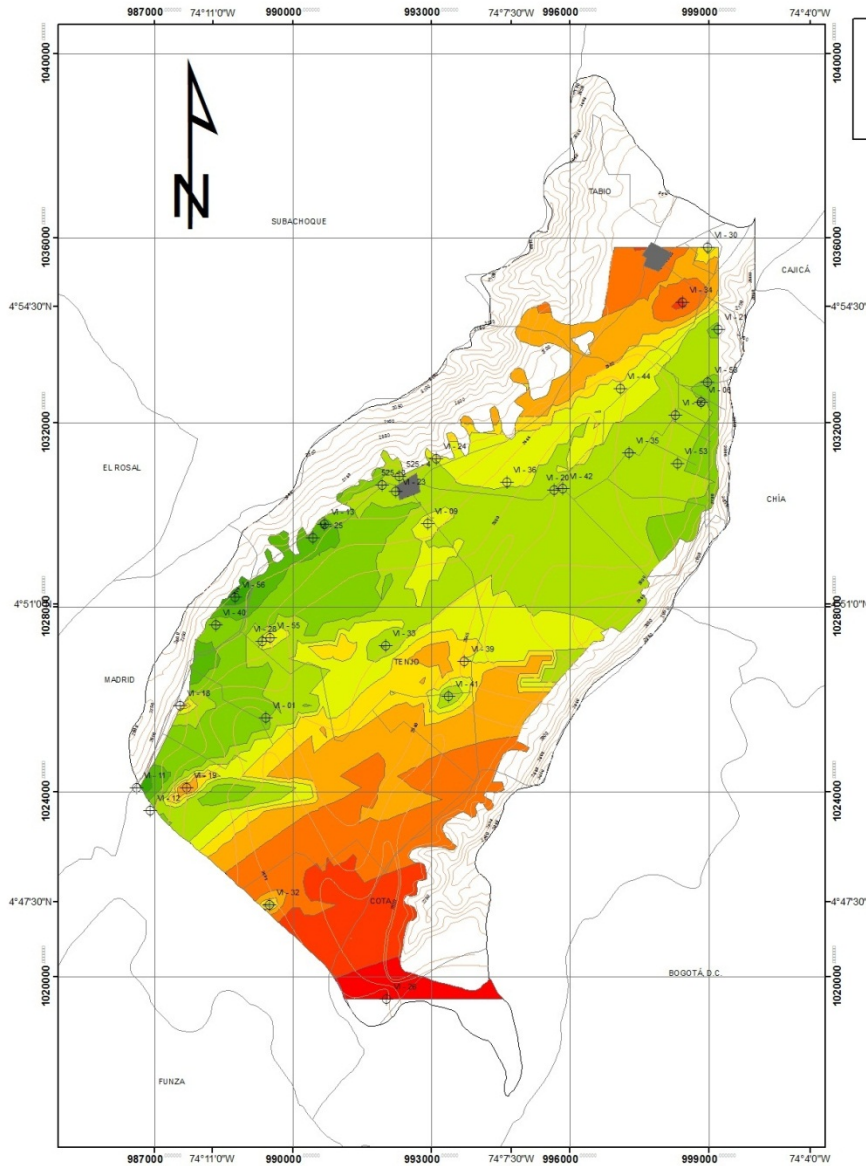
Fecha: **Agosto de 2014**

Normal QQPlot
Transformation: None



Data Source: Cuater_98_07 Attribute: Value_Max



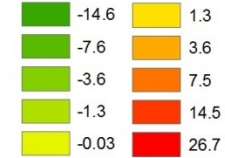


MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA VARIACIÓN 2007 - 2011

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Niveles Freáticos Variación Año 1998 - 2007 (m.s.n.m.)



Elaborado y Digitalizado por:

**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:

**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

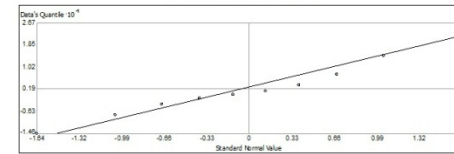
Escala Grafica:



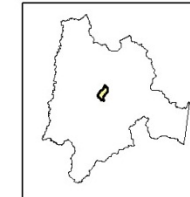
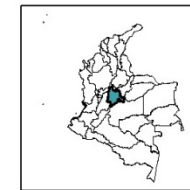
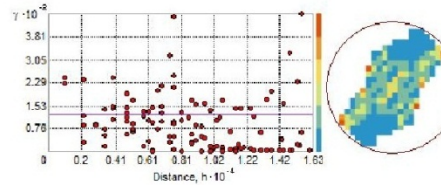
Plano N°: **17** de 32

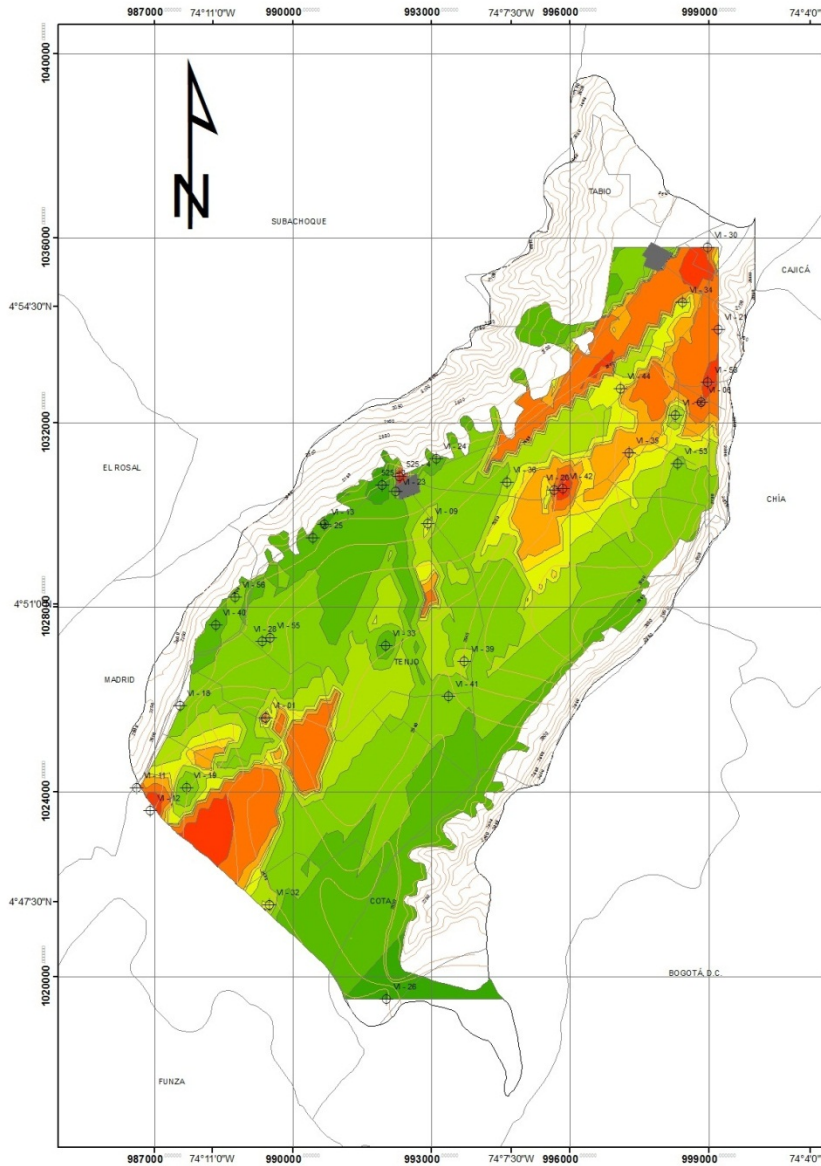
Fecha: **Agosto de 2014**

Normal QQPlot
Transformation: None



Data Source: Cuater_07_11 Attribute: Value_Max



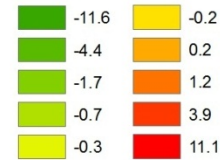


MAPA DE NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA VARIACIÓN 2011 - 2012

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Niveles Freáticos Variación Año 2011 - 2012 (m.s.n.m.)



Elaborado y Digitalizado por:

**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:

**CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL
DE CUNDINAMARCA
2012**

Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree

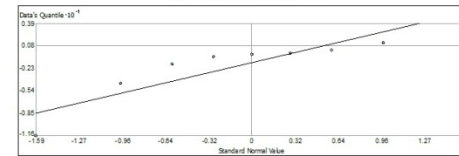
Escala Grafica:



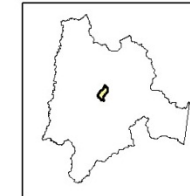
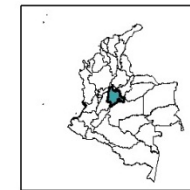
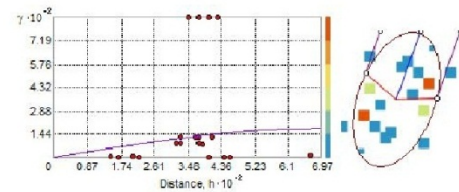
Plano N°: **18** de 32

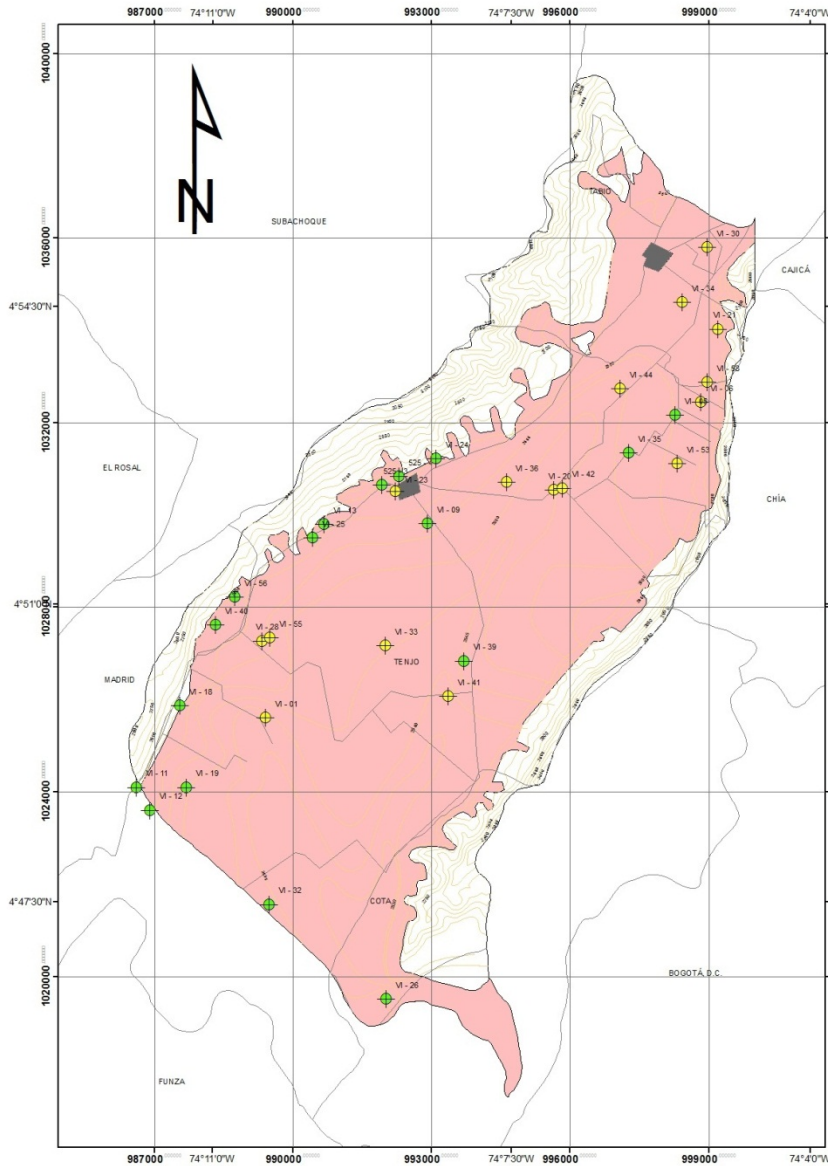
Fecha: **Agosto de 2014**

Normal QQPlot
Transformation: None



Data Source: Cuater_11_12 Attribute: Value_Max





MAPA DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD MÉTODO GOD ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA

Convenciones

- Vías
- ZU
- Municipios
- Curvas Topográficas
- Acuífero Formación Sabana y Chía

Pozos Indices de Vulnerabilidad Método GOD

- ◆ Moderado tendiente a bajo (0.3)
- ◆ Moderado (0.4)

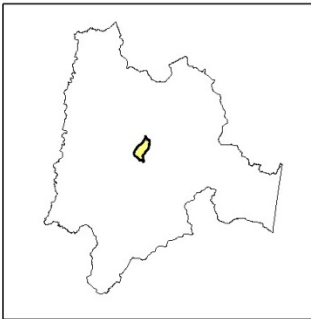
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

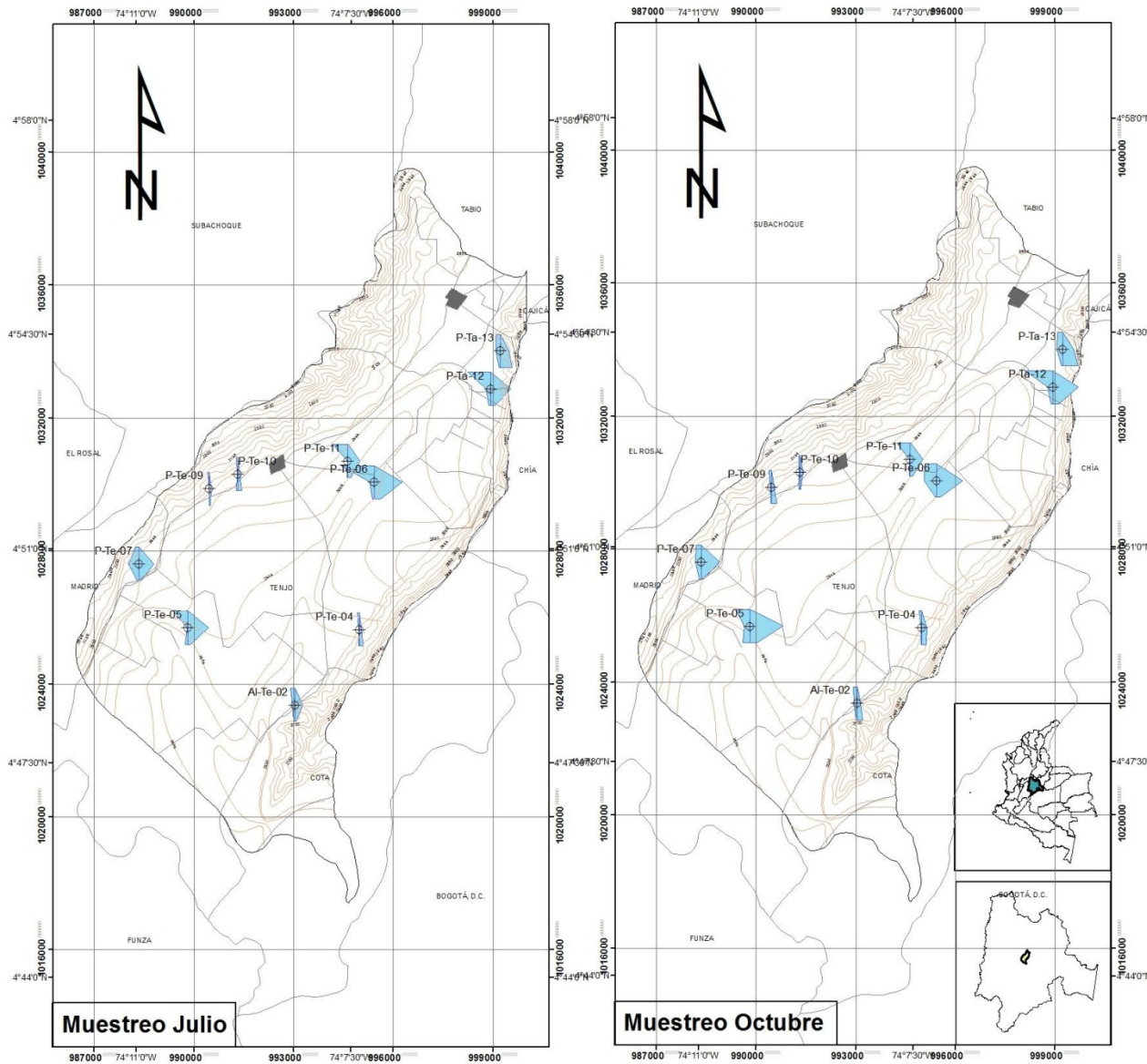
Fuente:
CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA 2012

Información de Referencia:
 Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.00000000
 Norte Falso: 1000000.00000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59520042
 Unidad Lineal: Meter
 Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N°: **19** de 32
Fecha: **Septiembre de 2014**





**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Facies Hidroquímicas**

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Municipios

Diagrama de Stiff

Na ⁺	Cl ⁻
Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻
Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻

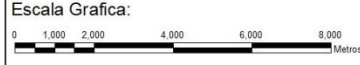
7 5.6 4.2 2.8 1.4 1.4 2.8 4.2 5.6 7 (meq/L)

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

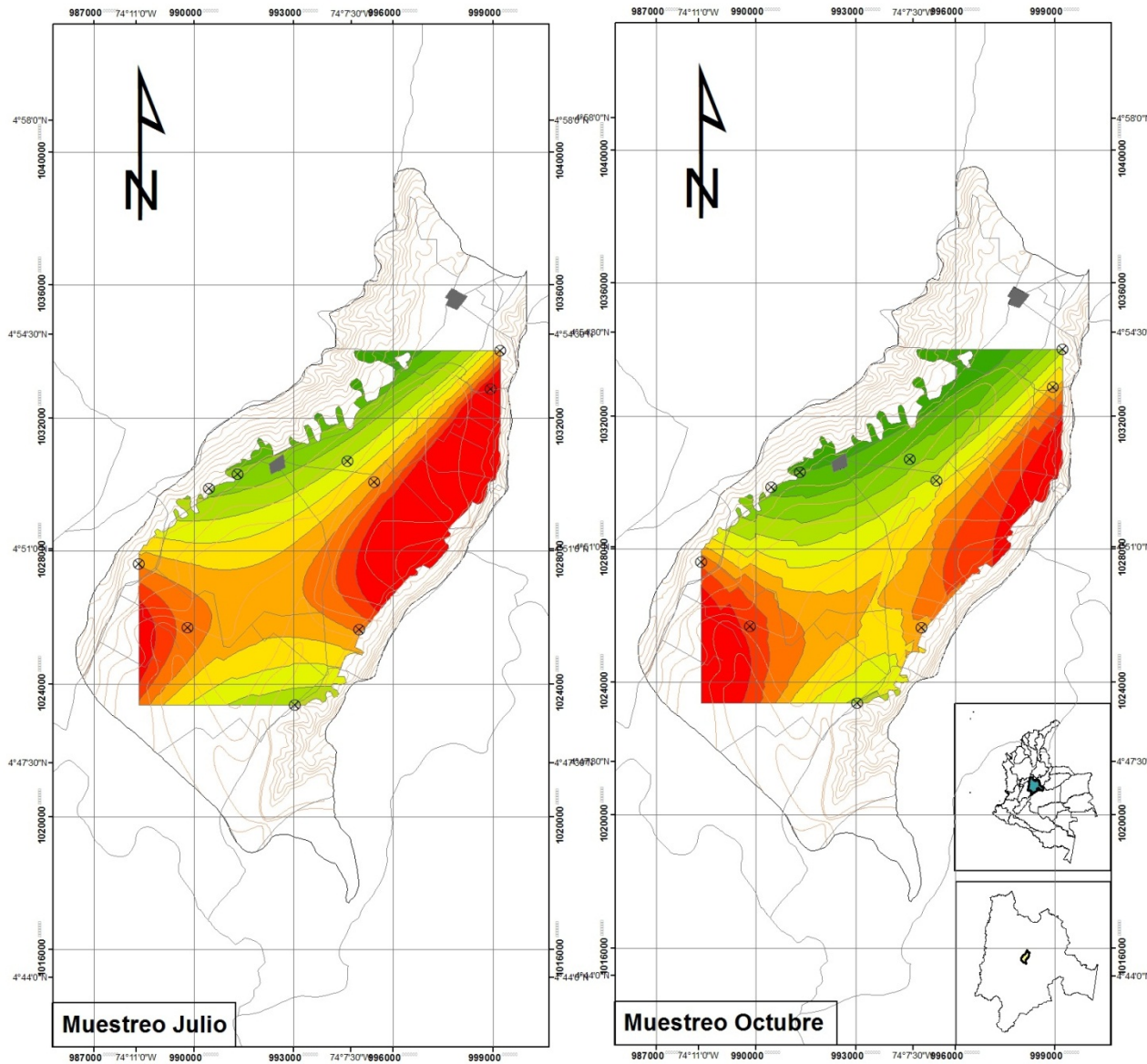
Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **20** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Potencial de Hidrogeno (pH)**

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Unidades [-]

Julio

5.2	6.3	6.8
5.5	6.5	6.9
5.8	6.7	7.0
6.1		

Octubre

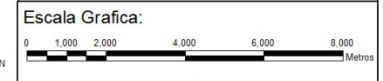
5.4	6.3	6.6
5.7	6.4	6.7
5.9	6.5	6.9
6.1		

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

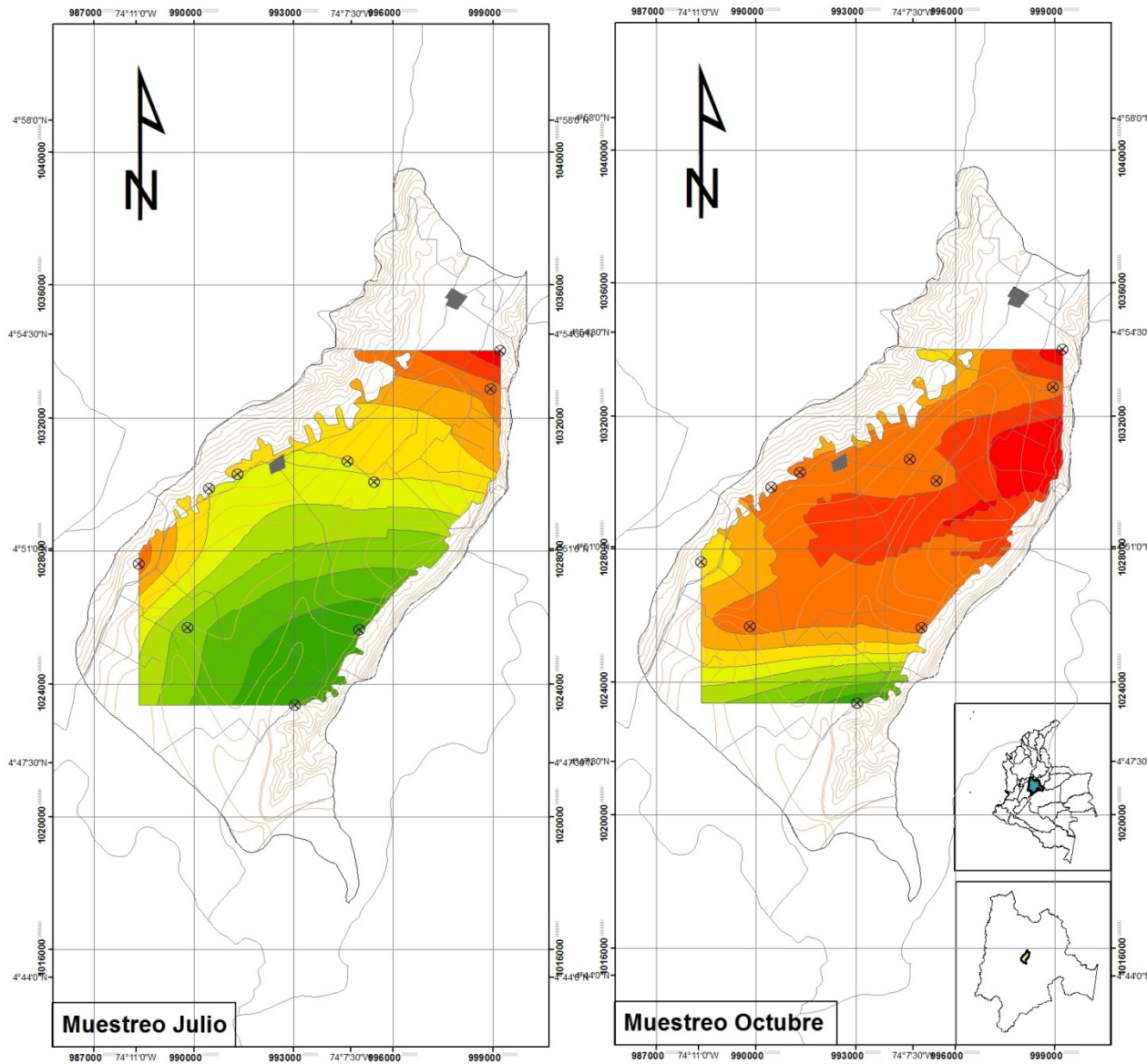
Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **21** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA Temperatura

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Unidades [°C]

Julio

15.4	17.0	18.2
15.8	17.4	18.6
16.2	17.8	19.0
16.6		

Octubre

16.4	18.0	19.2
16.8	18.4	19.6
17.2	18.8	20.0
17.6		

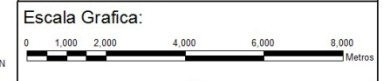
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
Autor 2014

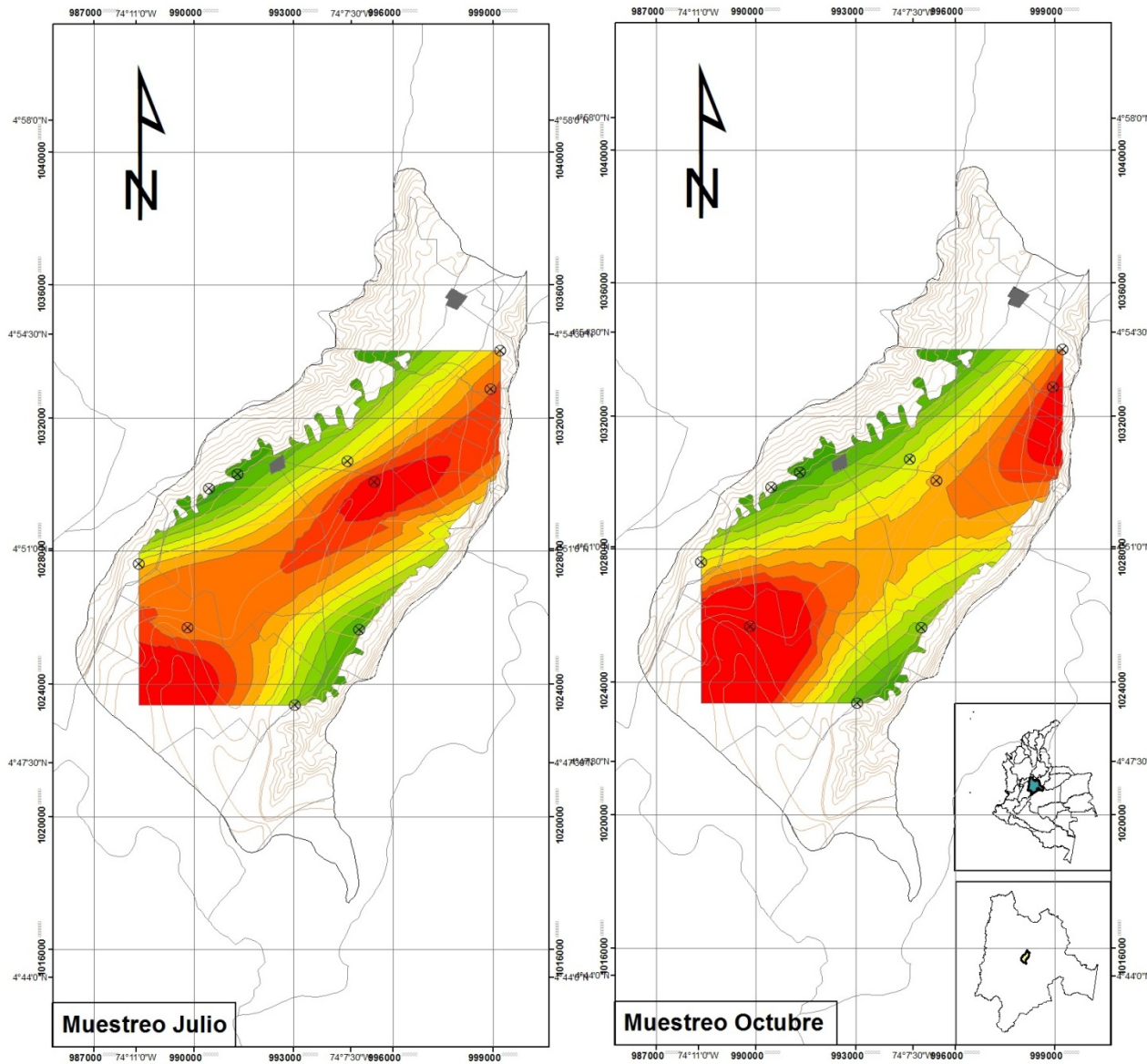
Información de Referencia:

Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.00000000
 Norte Falso: 1000000.00000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59620042
 Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N° **22** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Sólidos Totales Disueltos (TDS)**

Convenciones

Zonas Urbanas	Curva de Nivel Topográfico (m)
Vías	Pozos
Municipios	

Concentración [mg/L]

Julio

93.3	269.2	455.9
130.9	325.4	531.6
172.5	387.4	615.3
218.5		

Octubre

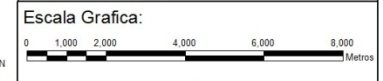
89.5	261.3	431.4
126.2	316.1	481.0
166.8	376.6	525.9
211.7		

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

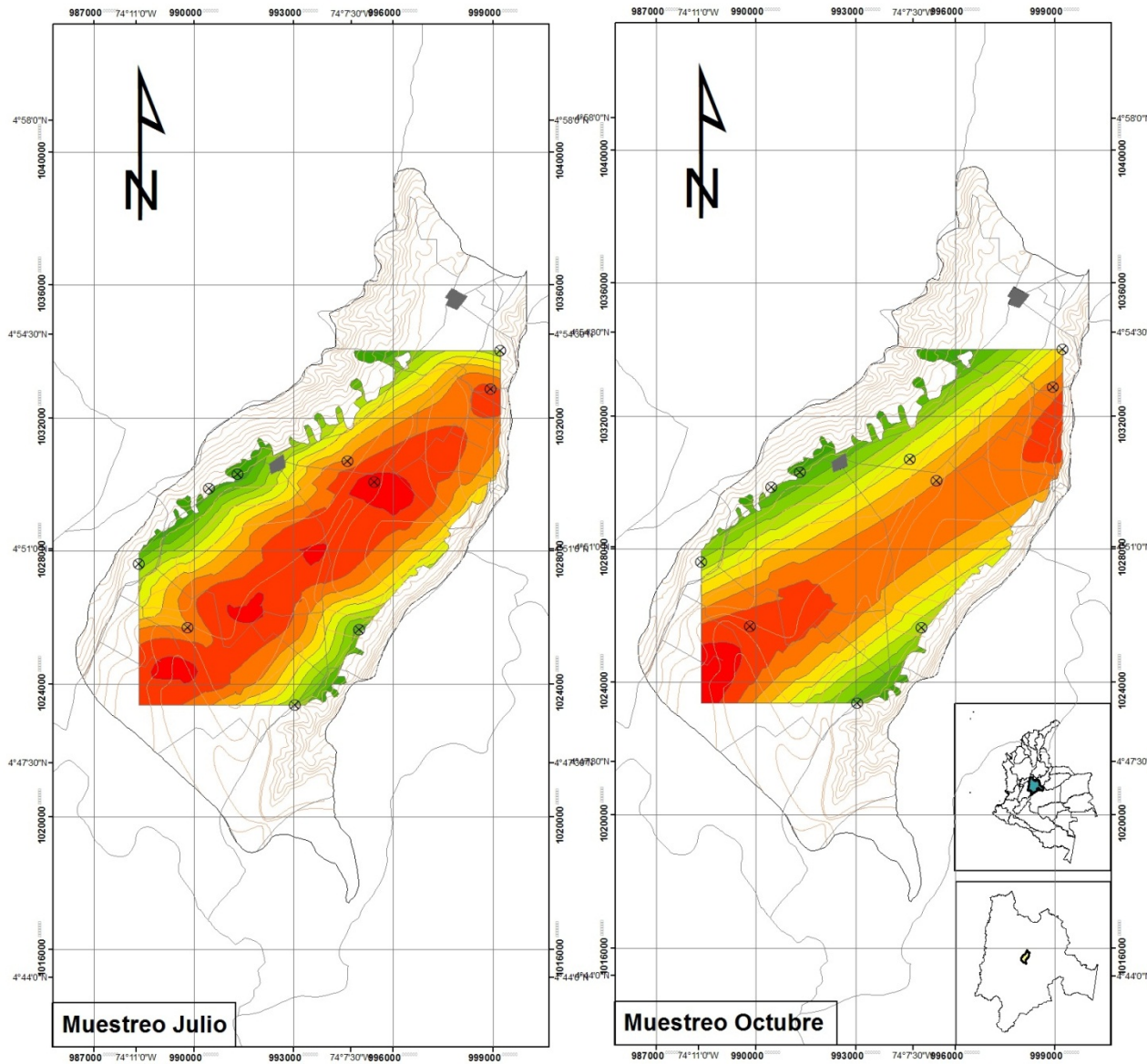
Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **23** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA Sodio (Na)

Convenciones

Zonas Urbanas	Curva de Nivel Topográfico (m)
Vías	Pozos
Municipios	

Concentración [mg/L]

Julio

8.89	37.37	96.82
13.18	51.62	131.87
18.98	70.86	157.83
26.81		

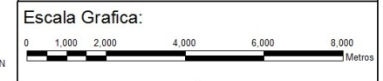
Octubre

7.64	33.59	69.77
12.50	43.56	86.87
18.31	55.49	107.34
25.26		

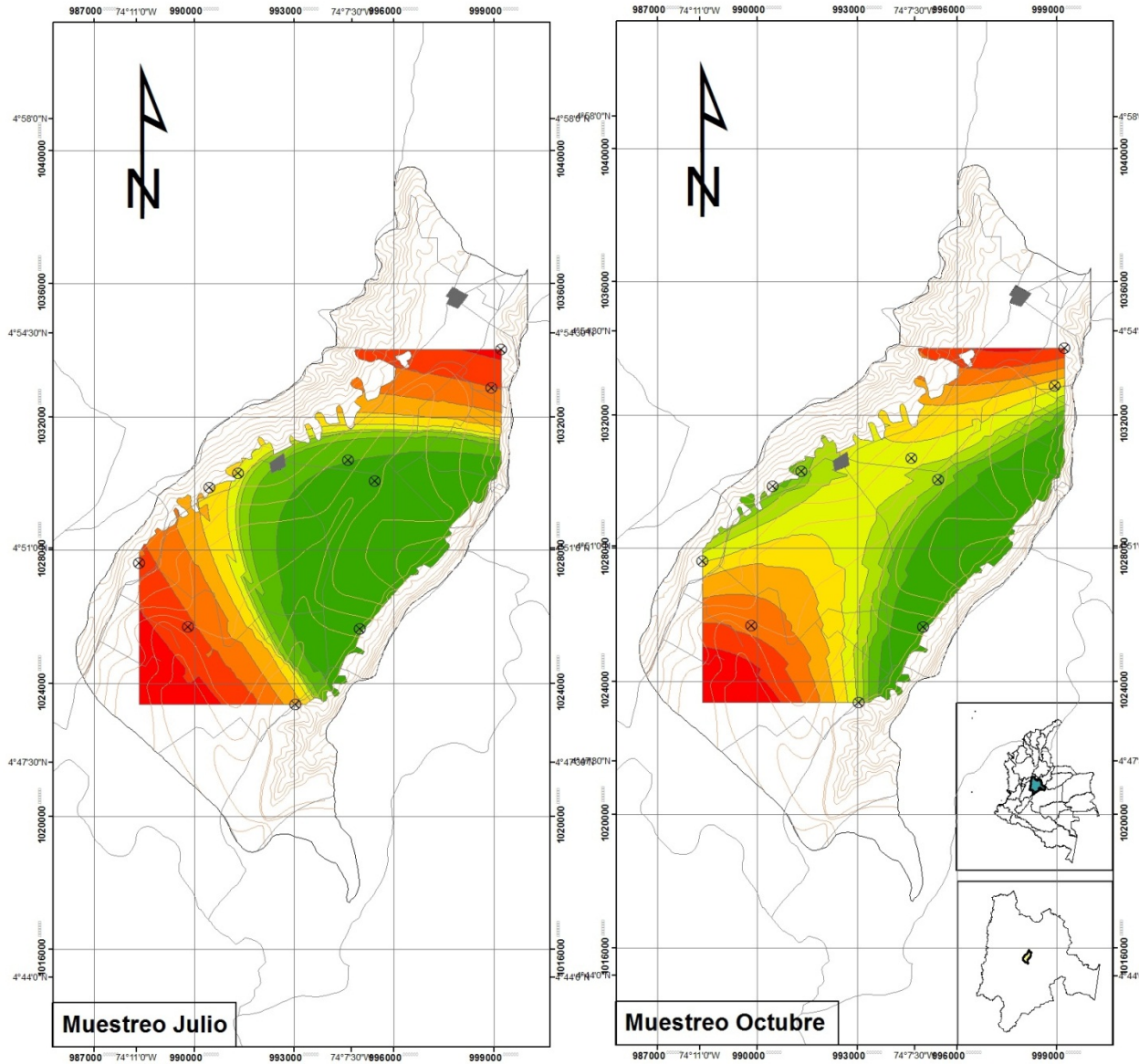
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
Autor 2014

Información de Referencia:
 Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.00000000
 Norte Falso: 1000000.00000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59620042
 Unidad Lineal: Meter
 Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N° **24** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA Potasio (K)

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- + Pozos

Concentración [mg/L]

Julio

- | | | |
|---|---|--|
| 3.52 | 5.32 | 13.95 |
| 4.43 | 6.23 | 27.43 |
| 4.80 | 8.46 | 60.59 |
| 4.95 | | |

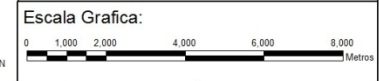
Octubre

- | | | |
|---|--|--|
| 3.30 | 8.08 | 24.44 |
| 4.42 | 11.13 | 38.09 |
| 5.11 | 16.15 | 60.59 |
| 6.23 | | |

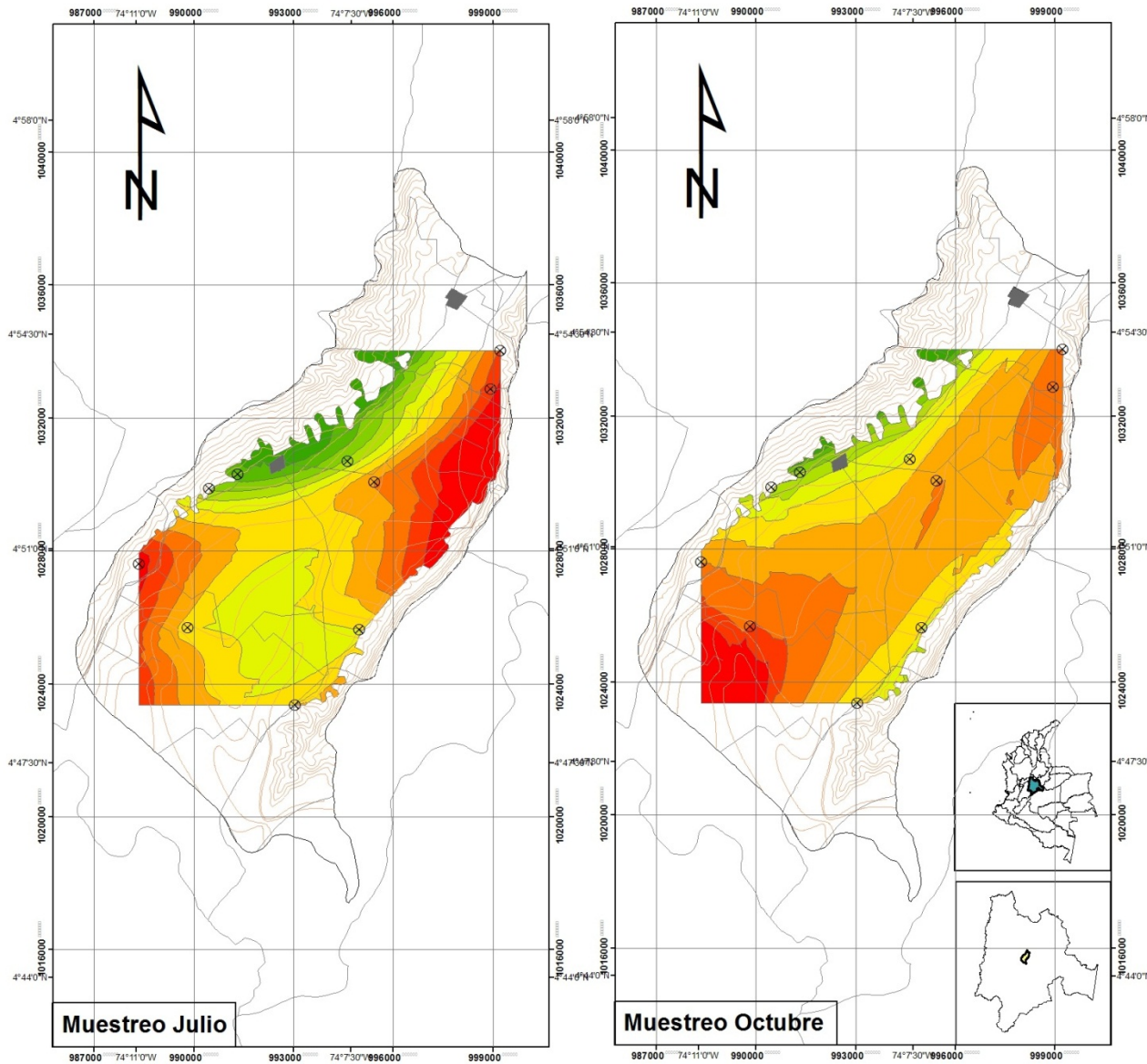
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
Autor 2014

Información de Referencia:
 Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.00000000
 Norte Falso: 1000000.00000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59620042
 Unidad Lineal: Meter
 Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N° **25** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Calcio (Ca)**

Convenciones

Zonas Urbanas	Curva de Nivel Topográfico (m)
Vías	Pozos
Municipios	

Concentración [mg/L]

Julio

2.37	6.18	18.79
2.81	8.72	28.30
3.49	12.67	43.06
4.54		

Octubre

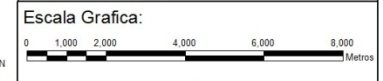
3.27	7.68	30.60
3.65	11.51	37.45
4.32	18.36	41.28
5.53		

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

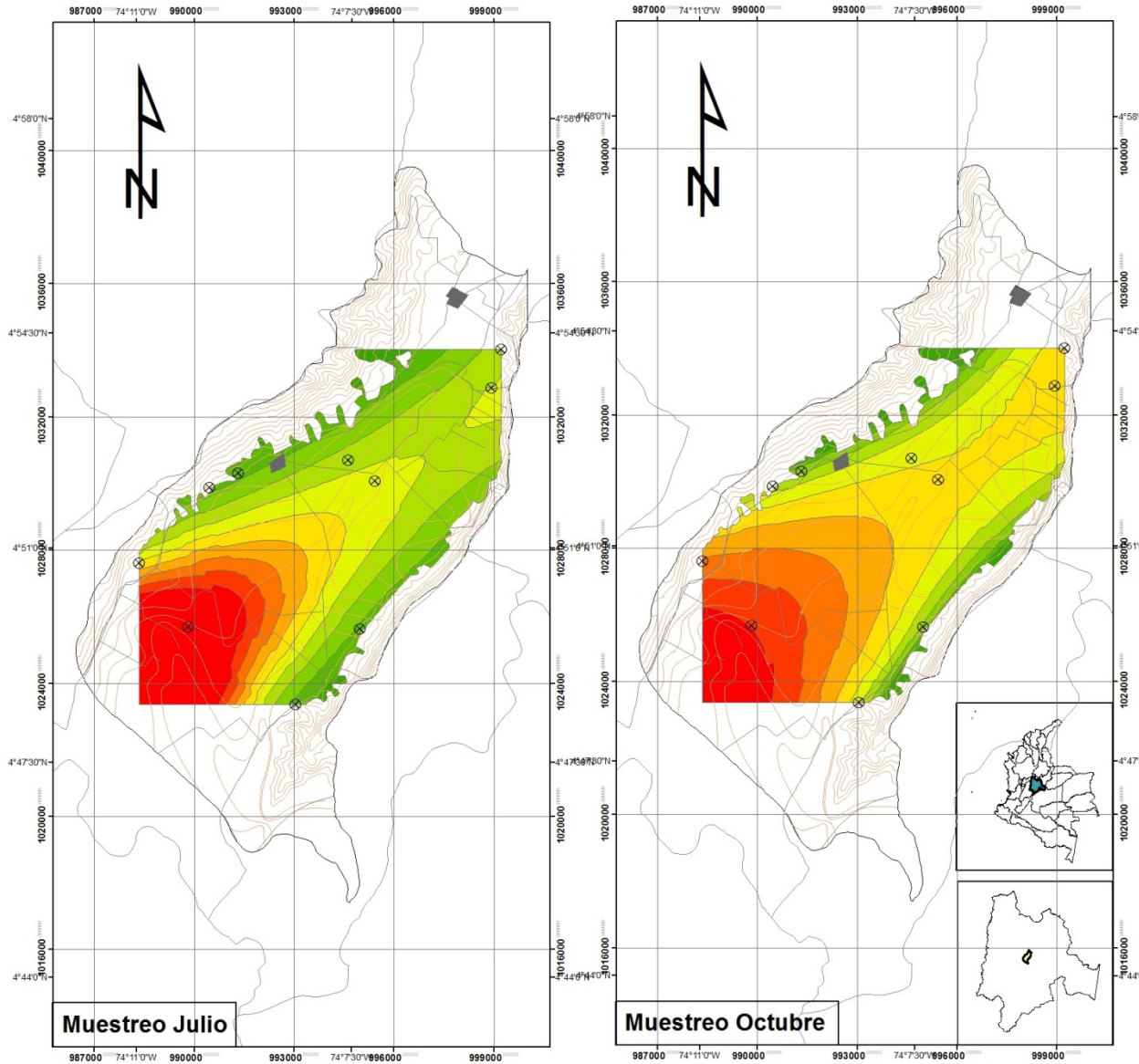
Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **26** de 32 Fecha: Enero de 2015



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Magnesio (Mg)**

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Concentración [mg/L]

Julio

1.52	3.74	5.22
2.11	4.24	5.75
2.68	4.72	6.29
3.22		

Octubre

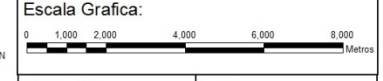
1.33	2.50	7.54
1.44	3.42	11.88
1.63	4.95	14.47
1.96		

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

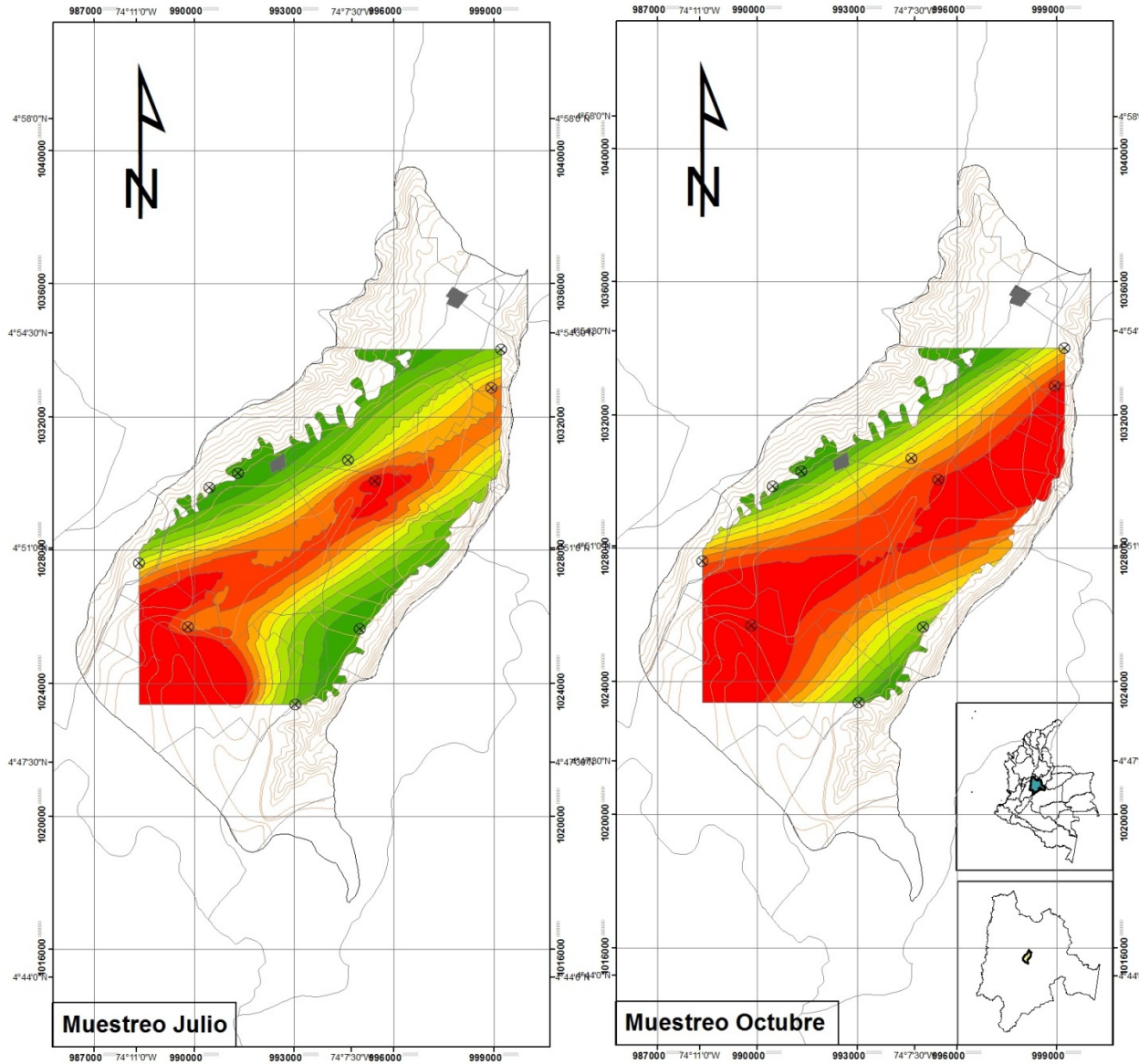
Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **27** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA Bicarbonato (HCO₃)

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Concentración [mg/L]

Julio

 64.3	 202.1	 289.1
 101.9	 231.6	 320.5
 137.3	 259.5	 353.8
 170.6		

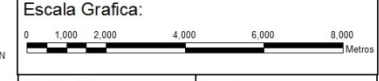
Octubre

 32.9	 96.9	 206.3
 43.7	 125.1	 264.1
 57.4	 160.8	 337.5
 74.8		

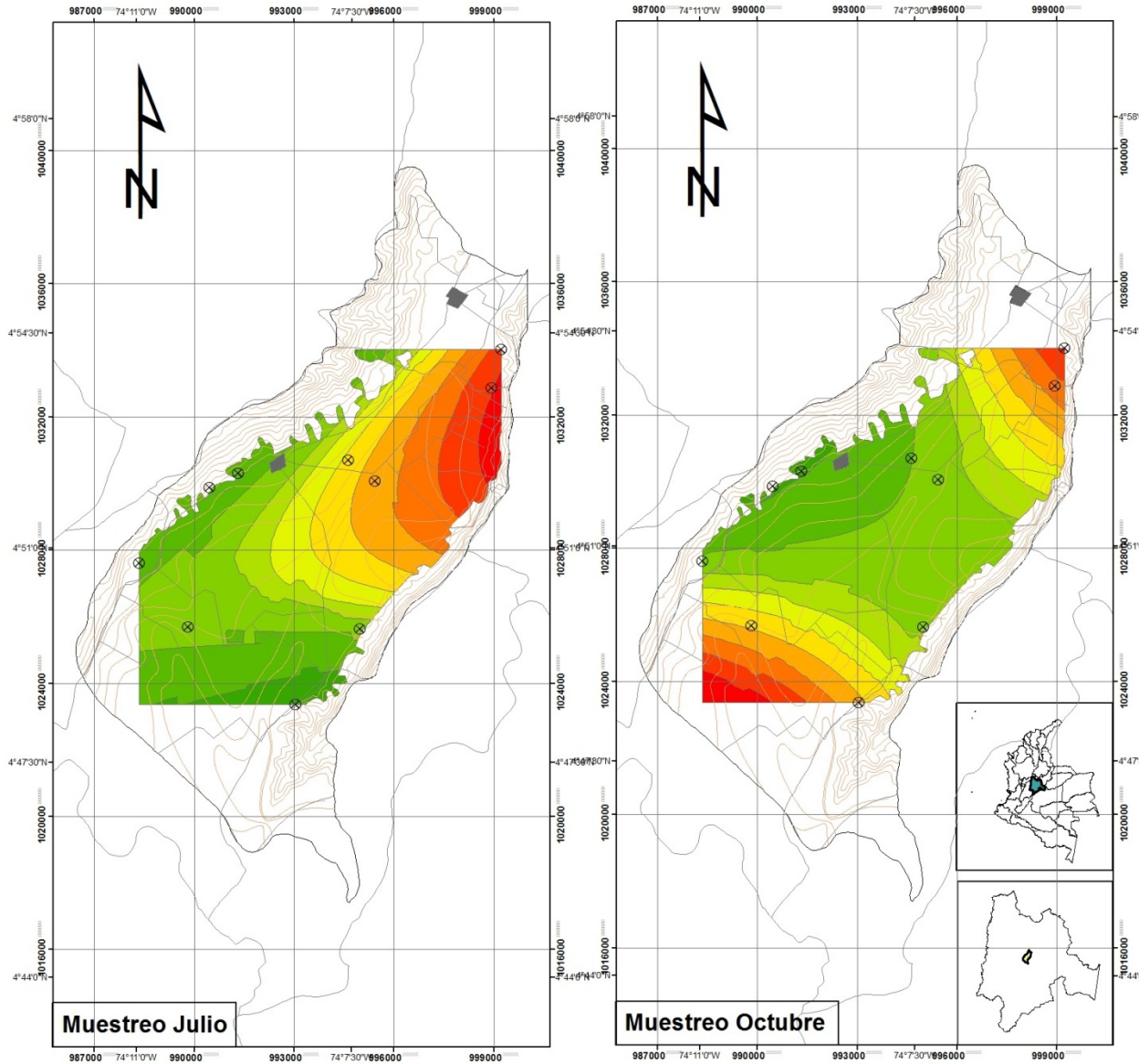
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
Autor 2014

Información de Referencia:
 Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.000000000
 Norte Falso: 1000000.000000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59620042
 Unidad Lineal: Meter
 Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N° **28** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA Sulfato (SO4)

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Concentración [mg/L]

Julio

21.0	42.0	73.2
28.2	49.1	93.0
33.2	59.1	120.8
36.9		

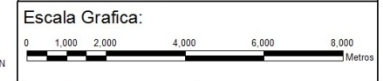
Octubre

19.2	46.8	80.5
27.9	55.5	98.2
34.7	66.5	120.8
40.0		

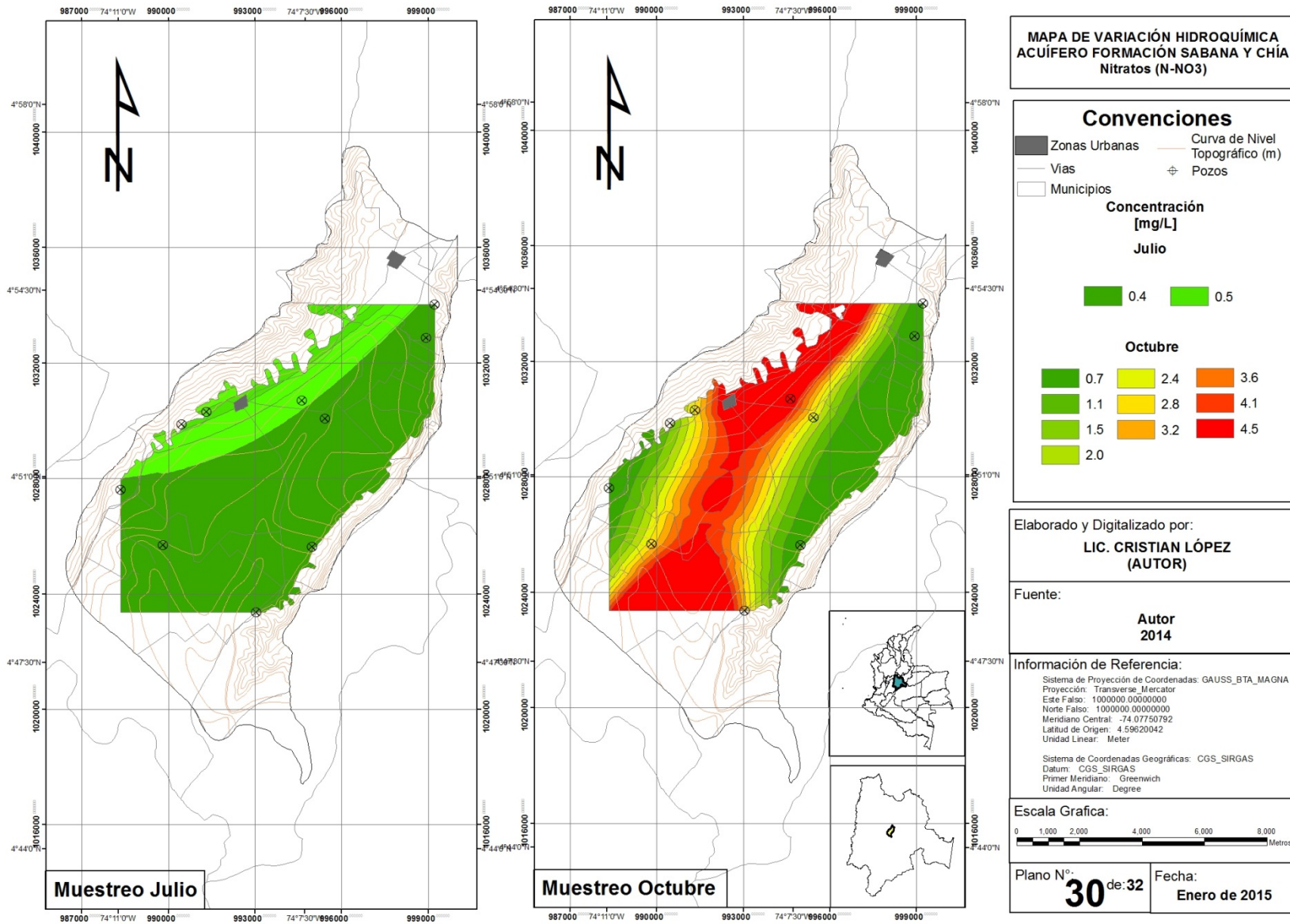
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
Autor 2014

Información de Referencia:
 Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.000000000
 Norte Falso: 1000000.000000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59620042
 Unidad Lineal: Meter
 Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N°: **29** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA Nitratos (N-NO3)

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Concentración [mg/L]

Julio

- 0.4
- 0.5

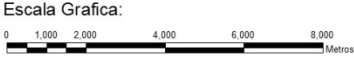
Octubre

- 0.7
- 1.1
- 1.5
- 2.0
- 2.4
- 2.8
- 3.2
- 3.6
- 4.1
- 4.5

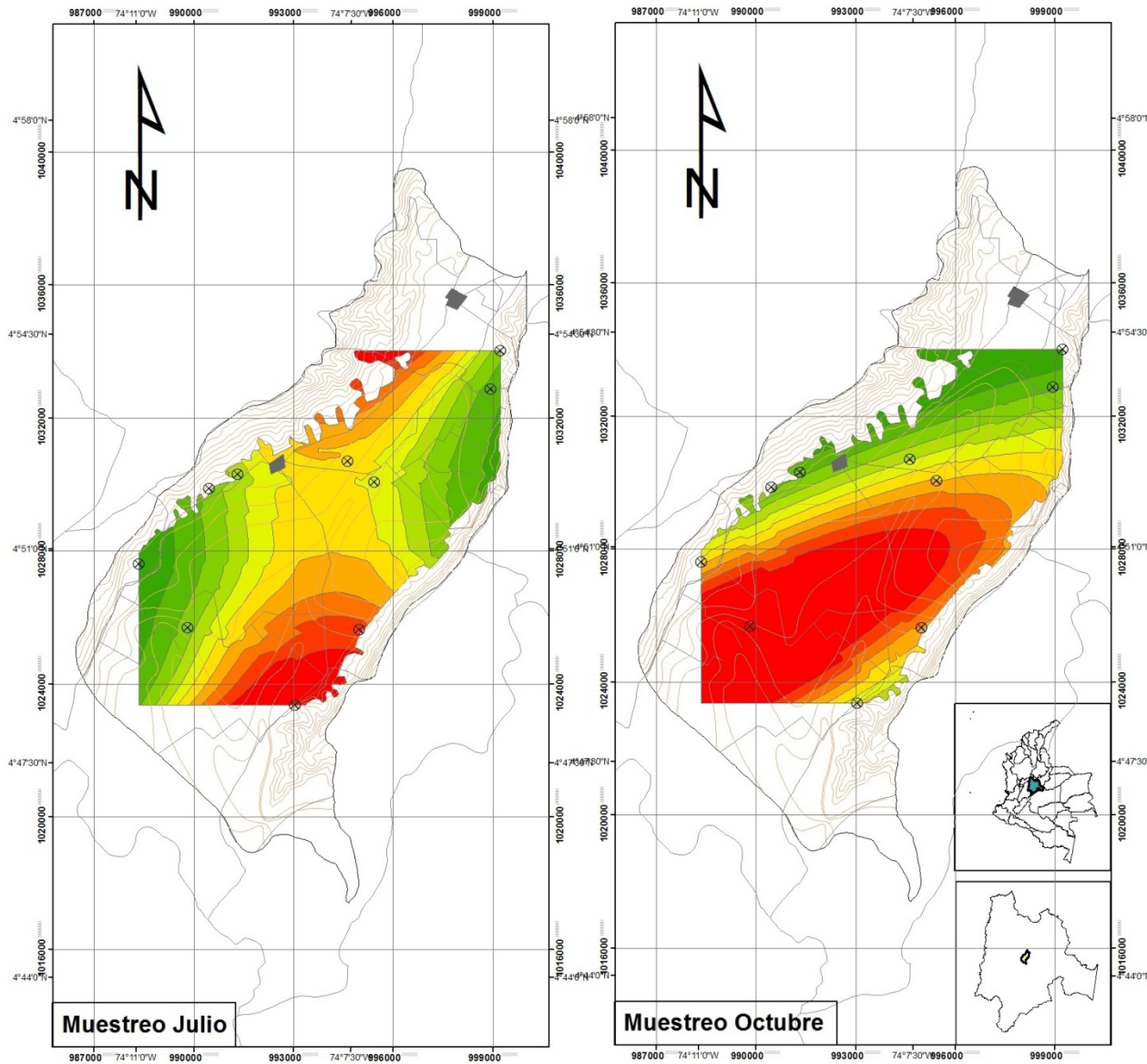
Elaborado y Digitalizado por:
LIC. CRISTIAN LÓPEZ (AUTOR)

Fuente:
Autor 2014

Información de Referencia:
 Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
 Proyección: Transverse_Mercator
 Este Falso: 1000000.00000000
 Norte Falso: 1000000.00000000
 Meridiano Central: -74.07750792
 Latitud de Origen: 4.59620042
 Unidad Lineal: Meter
 Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
 Datum: CGS_SIRGAS
 Primer Meridiano: Greenwich
 Unidad Angular: Degree



Plano N°: **30** de 32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Hierro (Fe)**

Convenciones

Zonas Urbanas	Curva de Nivel Topográfico (m)
Vías	Pozos
Municipios	

Concentración [mg/L]

Julio

2.71	7.69	12.64
4.13	9.11	14.81
5.37	10.75	17.30
6.45		

Octubre

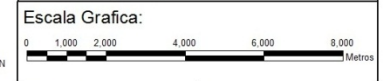
5.22	13.42	20.02
7.21	15.57	22.30
9.24	17.77	24.64
11.31		

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

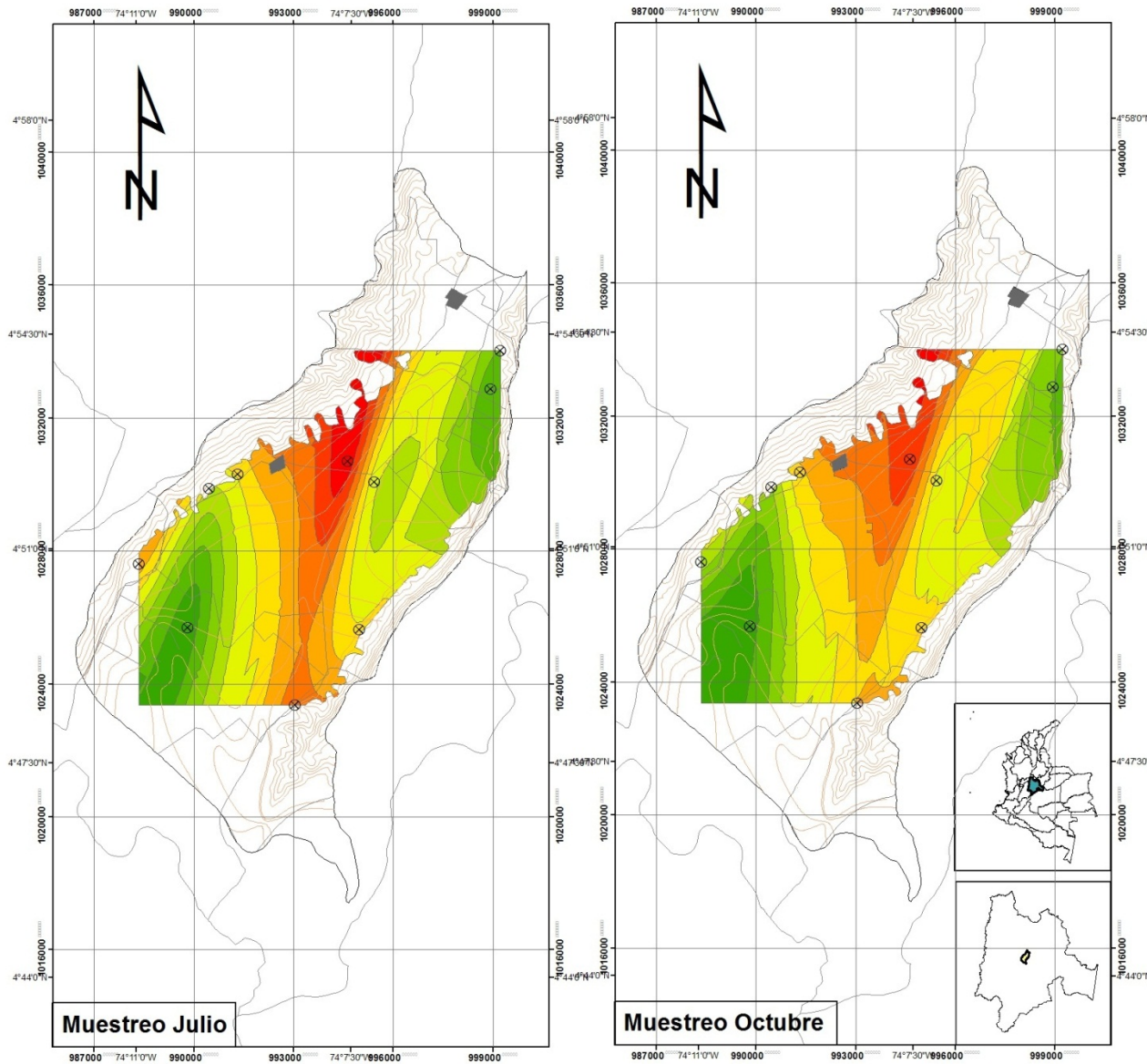
Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **31** de:32 Fecha: **Enero de 2015**



Muestreo Julio

Muestreo Octubre

**MAPA DE VARIACIÓN HIDROQUÍMICA
ACUÍFERO FORMACIÓN SABANA Y CHÍA
Cobre (Cu)**

Convenciones

- Zonas Urbanas
- Vías
- Municipios
- Curva de Nivel Topográfico (m)
- Pozos

Concentración [mg/L]

Julio

- 0.54
- 0.57
- 0.60
- 0.63
- 0.66
- 0.69
- 0.72
- 0.76
- 0.80
- 0.84

Octubre

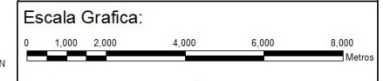
- 0.52
- 0.56
- 0.59
- 0.62
- 0.65
- 0.69
- 0.73
- 0.78
- 0.83
- 0.90

Elaborado y Digitalizado por:
**LIC. CRISTIAN LÓPEZ
(AUTOR)**

Fuente:
**Autor
2014**

Información de Referencia:
Sistema de Proyección de Coordenadas: GAUSS_BTA_MAGNA
Proyección: Transverse_Mercator
Este Falso: 1000000.00000000
Norte Falso: 1000000.00000000
Meridiano Central: -74.07750792
Latitud de Origen: 4.59620042
Unidad Lineal: Meter

Sistema de Coordenadas Geográficas: CGS_SIRGAS
Datum: CGS_SIRGAS
Primer Meridiano: Greenwich
Unidad Angular: Degree



Plano N°: **32** de 32 Fecha: **Enero de 2015**