



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y
GEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA Y
EMBALSE DEL PARQUE NATURAL LA
NITRERA**

Autora

Diana Elizabeth Morales Quintero

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

Agosto 2019



Caracterización hidrogeológica y geomorfológica de la cuenca y embalse del parque natural
la nitrera

Diana Elizabeth Morales Quintero

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Director

Ingeniero, M. Sc. Fabio de Jesús Vélez Macías

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Medellín, Colombia
Agosto 2019

AGRADECIMIENTOS

A Fabio de Jesús de Vélez Macías, Profesor asociado y Coordinador Grupo Geolimna, Asesor de este trabajo.

A la Secretaria de agricultura del municipio de Concordia, Antioquia.

A las Empresas Publicas Municipales (EPM) de Concordia, Antioquia.

A la Universidad de Antioquia y la Facultad de Ingeniería

Al grupo de investigación GeoLimna

TABLADE CONTENIDO

Resumen	9
Abstract	9
Capítulo I: Generalidades.....	11
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	11
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.3 HIPÓTESIS	12
1.4 OBJETIVOS.....	13
<i>1.4.1 Objetivo General.....</i>	<i>13</i>
<i>1.4.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>13</i>
Capítulo II: Marco Teórico	13
2.1 GEOMORFOLOGÍA E ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS.....	15
2.1.1 Parámetros de tamaño de cuenca.....	17
1). Longitud, perímetro y ancho	17
2). Área de la cuenca.....	17
2.1.2 Parámetros de forma de la cuenca	18
1). Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius	19
2). Factores de forma de Horton.....	19
2.1.3 Parámetros relativos al relieve.....	20
1). Pendiente promedio de la cuenca	21
2). Histograma de frecuencias altimétricas	21
3). Curva hipsométrica.....	22
4). Perfil altimétrico del cauce principal.....	23
5). Altura y elevación promedio del relieve.	24
2.1.4 Caracterización de la red de canales	24
1). Índices de Horton	24
2). Densidad de drenaje.....	25
2.1.5 Tiempo de concentración.....	26
A). Método de la USDA	26
B). Método de Bransby-Williams	26
C). Método de Kirpich.....	26
2.2 SUELO	27
2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	32
2.4 PARQUE NATURAL LA NITRERA.....	33
Capítulo III: Metodología	36
3.1 OBJETIVO 1.....	36
3.2 OBJETIVO 2.....	38
3.3 OBJETIVO 3.....	41
3.4 OBJETIVO 4.....	49
Capítulo IV: Área de Estudio	50
Capítulo V: Resultados	56
5.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	56

5.2 CLIMATOLOGÍA REGIONAL	58
5.3 GEOMORFOLOGÍA	60
5.3.1 Características hidrogeológicas, estructurales y geomorfológicas	61
5.3.2 Índices Geomorfológicos	64
5.4 SUELO	68
5.4.1 Análisis granulométrico	69
5.4.2 Límites líquido y plástico	70
5.4.3 Colorimetría	72
5.4.4 Compresión inconfínada	72
5.4.5 pH o acidez activa de los suelos	75
5.4.6 Toposecuencia o catena.....	75
Capítulo VI: Discusión	80
Capítulo VII: Conclusiones	82
Capítulo VIII: Recomendaciones	84
Bibliografía.....	86
ANEXO 1: GRANULOMETRÍA	94
Tabla A.11. Reporte de datos Granulometría Estación 1	94
Grafica A.1.1 Granulometría Estación 1.....	96
Grafica A.1.2. Distribución Granulométrica	96
ESTACIÓN 2.....	97
Tabla A.1.2. Reporte de datos Granulometría Estación 2	97
Grafica A.1.3. Granulometría Estación 2.....	98
Tabla A.1.3. Reporte de datos Granulometría Estación 8	99
Grafica A.1.5 Granulometría Estación 8.....	100
Grafica A.1.6 .Distribución Granulométrica	100
Tabla A.14. Reporte de datos Granulometría Estación 9	101
Grafica A.1. 7. Granulometría Estación 9.....	102
Grafica A.1.8 . Distribución Granulométrica	102
Tabla A.1.5. Reporte de datos Granulometría Estación 6	103
Grafica A.1.9 Granulometría Estación 6.....	104
Grafica A.1.10 . Distribución Granulométrica	104
Tabla A.1.6. Carta de Clasificación tamaño de grano	105
Tabla A.1.7 Clasificación UCSC	105
ANEXO 2: LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO.....	106
TablaA.2.1. Reporte de datos Límites de Attemberg Estación 1	106
Tabla A.2.2. Reporte de datos Límites de Attemberg Estación 2	107
Tabla A.2.3. Reporte de datos Límites de Attemberg Estación 8	108
Tabla A.2.4. Reporte de datos Límites de Attemberg Estación 9	109
Tabla A.2.5. Reporte de datos Límites de Attemberg Estación 6	110
ANEXO 3: COMPRESIÓN INCONFINADA.....	111
Tabla A.3.1 Medidas promedio de los cilindros de muestra	111
ANEXO 4: DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS	112
Tabla A.4.1 Descripción de muestras	112
Descripción Rocas.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Longitud y perímetro de una cuenca.....	17
Figura 2. Divisoria de aguas superficiales y de aguas subterráneas	18
Figura 3 Hidrógrafas según la forma de la cuenca	20
Figura 4 Método para hallar la pendiente S, en una cuenca	21
Figura 5 Histograma de frecuencias altimétricas	22
Figura 6 Curvas hipsométricas características	22
Figura 7 Hidrógrafas según el perfil altimétrico del cauce principal.....	23
Figura 8 Orden de una cuenca	24
Figura 9 Componentes de suelo.....	28
Figura 10 Perfil general de suelo común	29
Figura 11 Propiedades del Suelo	31
Figura 12 Clasificación estructura del Suelo.....	32
Figura 13 A. Localización Suroeste Antioqueño. B. Localización Concordia	34
Figura 14 Localización Embalse "La Nitrra"	35
Figura 15 Esquema de Metodología General.....	36
Figura 16 Zona de Estudio	40
Figura 17 Mapa Estaciones de muestreo.....	42
Figura 18 Grafica de Índice de Plasticidad	46
Figura 19 Localización Concordia.....	51
Figura 20 Panorámica cabecera municipal Concordia	52
Figura 21 Estado inicial embalse	53
Figura 22 Visión actual embalse.....	54
Figura 23 Mapa Geología Concordia.....	55
Figura 24 Vista del Embalse y las cuencas	57
Figura 25 Precipitación mensual 2012 y 2013	59
<i>Figura 26 Precipitación 2010 y 2011.....</i>	<i>59</i>
Figura 27 Precipitación Mensual	60
Figura 28 Precipitación Mensual	60
Figura 29 Unidades geomorfológicas	61
Figura 30 Mapa Unidades Geomorfológicas	62
Figura 31 Carta Hidrogeomorfológica	64
Figura 32 Tipo de Pendiente.....	66
Figura 33 Graficas de Frecuencia altimétrica vs cota y área	67
Figura 34 Orden de los cauces	68
Figura 41 Prueba compresión inconfnada.....	73
Figura 42 Ensayo compresión inconfnada.....	74
Figura 43 Perfiles de Toposecuencia	76
Figura 44 Localización Perfiles	77
Figura 45 Suelo Residual y tipo de pendiente.....	79
Figura 46 Embalse en desabastecimiento. Fuente: EE.PP. MM. Del Municipio de Concordia.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de horizontes del suelo	30
Tabla 1 Actividades Objetivo 1	38
Tabla 2 Índices geomorfológicos.....	39
Tabla 3 Actividades Objetivo 2.....	40
Tabla 5 Normas aplicadas en pruebas de laboratorio.....	43
Tabla 5 Escala de vidrios de color normalizado (Invias, 2007)	44
Tabla 7 Índice de Clasificación	44
Tabla 8 Índice de Asimetría	45
Tabla 8 Clasificación Unificada del Suelo	45
Tabla 9 Clasificación índice de plasticidad	47
Tabla 10 Grado de consistencia.....	48
Tabla 11 Límites de clasificación de compresión inconfiada	48
Tabla 13 Actividades Objetivo 3	49
Tabla 14 Actividades Objetivo 4	50
Tabla 16 Resultados índices geomorfológicos	65
Tabla 17 Resultados Límites líquido y plástico	71
Tabla 18 Colorimetría Parque Natural la Nitrera.....	72
Tabla 19 Valores de pH.....	75
Tabla 20 Descripción perfiles de toposecuencia.....	76
Tabla 21 Resultados de Carga axial	111

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ancho de la cuenca	17
Ecuación 2 Índice de Gravelius	19
Ecuación 3 Factor Horton.....	19
Ecuación 4 Longitud Horton	19
Ecuación 5 Factor Adimensional Horton.....	20
Ecuación 6 Relación de longitudes de corriente	25
Ecuación 7 Relación de áreas	25
Ecuación 8 Densidad de drenaje.....	25
Ecuación 9 Tiempo de concentración USDA	26
Ecuación 10 Tiempo de concentración de Bransby -Williams.....	26
Ecuación 11 Tiempo de Concentración de Kirpich	26
Ecuación 12 Índice de Clasificación.....	44
Ecuación 13 Coeficiente de curvatura	46
Ecuación 14 Coeficiente de Uniformidad.....	46
Ecuación 15 Grado de consistencia	48
Ecuación 16 Deformación Unitaria Axial.....	74
Ecuación 17 Sección Transversal promedio	74
Ecuación 18 Esfuerzo de Carga aplicada.....	74

Resumen

El Parque Natural la Nitrera, creado como una reserva natural clasificada como Bosque Húmedo de montaña baja y con una topografía altamente quebrada, está situado al suroeste antioqueño en la zona rural del municipio de Concordia, Antioquia. Este parque posee un embalse que es la única fuente que proporciona el servicio de agua para los habitantes del municipio en la zona urbana, en los meses de diciembre a marzo presenta desabastecimiento y caída de las paredes de contención por la temporada seca y para los meses de mayo a agosto temporada de lluvias presenta problemas de movimientos gravitacionales sobre el cauce. Debido a la recurrencia cíclica de esta problemática que desencadena en la restricción del servicio del agua, se planteó un estudio geomorfológico sobre la cuenca y el embalse para evaluar como las estructuras presentes y su dinámica repercuten. En la evaluación se identificaron unidades tales como filos con altas pendientes y topes planos. En conjunto con la evaluación con estas unidades se hizo una caracterización del suelo con la cual se contrasto la relación entre el suelo residual y las altas pendientes.

Palabras clave: Unidades superficiales, geomorfología, hidrogeología, suelo

Abstract

La Nitrera Natural Park, created as a natural reserve in a classified as Humid Mountain Forest with a highly broken topography; is located in the southwest of Antioquia in the rural area of Concordia municipality. This park has a dam being the only tap water provider for the urban inhabitants. During the December-March lapse, a water shortage occurs, the water level descends and therefore the earthed walls suffer partial falling outs; between May and August, the rainy season carries problems on of gravitational movements. Due to the cyclical recurrence of this problem that triggered the restriction of the water service, a geomorphological study was proposed on the basin and the reservoir to evaluate how the present structures and their dynamics have repercussions. In the evaluation we found units of high slope and great length. In conjunction with the evaluation with these units, a soil characterization was made with which the relationship between the residual soil and the high slopes was contrasted.

Keywords: superficial formations, Surface units, geomorphology, hydrogeology, soil.

Introducción

La interacción mutua de los tres dominios atmósfera, litósfera e hidrósfera, generan constantes cambios o procesos geológicos, responsables del origen y evolución del relieve (Phillips, 2016). Los procesos geológicos se relacionan con la interacción entre el medio físico y el ser humano, en relación con esta interacción, la geología desde su perspectiva dinámica estudia procesos que por sí mismos no son peligrosos, o lo son en la medida que el hombre no se exponga a ellos o no los induzca a través de sus actividades, como la erosión, los deslizamientos, flujos y avalanchas (Rincon, 2010). Estos procesos constituyen el motor de la dinámica morfológica (Souza, Siqueira, & Pereira, 2012).

Como plantean Mata y González (Mata & González, 2011), la geomorfología es la ciencia que tiene por objeto la descripción del relieve terrestre, continental y submarino. Constituye una disciplina de síntesis orientada, especialmente hacia el estudio de uno de los componentes del medio natural. En la geomorfología se pueden distinguir 3 ámbitos de estudio principales estructural, dinámico y climático.

En las ciencias de la tierra ha sido reconocida la dependencia de la geomorfología entre la interacción de la geología, el clima y el movimiento del agua sobre la tierra. Las características físicas de una cuenca forman un conjunto que influyen profundamente en el comportamiento hidrológico de dicha zona tanto a nivel de las perturbaciones como de las respuestas de la cuenca tomada como un sistema.

Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad en los estudios hidrológicos (Universidad de los Andes Venezuela, 2013).

Mediante una caracterización hidrogeológica, se definen unidades de importancia en el área de la cuenca, considerando la geología, la hidrografía y usando métodos de SIG. A partir de la caracterización hidrogeológica, se estudia y analiza el desempeño de la cuenca, lo que conduce a la estimación y a la caracterización de los parámetros morfométricos de una cuenca (Piñeiro Toro, 2015).

Tanto la geomorfología como la hidrogeología pueden ser utilizadas como herramientas para la interpretación de la prospección, captación y protección de recursos hídricos (Florez, 2015). Así mismo, es necesario estudiar y analizar los procesos geomorfológicos y la disposición de estructuras geológicas superficiales que afectan la calidad de vida y la disposición de recursos de la población asentada en cualquier región (Gonzalez & Soto, 2010).

La revisión bibliográfica para este estudio, permitió encontrar dos referencias sobre el embalse La Nitrera, enfocados en las dimensiones y capacidades físicas. El primero, el diseño del plan maestro municipio de Concordia realizado por la Universidad de Antioquia en el año 1996 y la evaluación de la capacidad del embalse realizado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en el año 2002.

Esta investigación busca entender de forma detallada las relaciones entre hidrosfera, litosfera (rocas, depósitos y estructuras) y los productos e impactos de la meteorización, erosión, y comportamiento del suelo, transcurridos desde entonces, en aras del desarrollo de la gestión del embalse la Nitrera, de tal forma que se puedan elaborar planes de prevención para la protección del cuerpo de agua, tan importante para la población del municipio.

Capítulo I: Generalidades

1.1 Descripción del problema

En Colombia se ha identificado un área cubierta por cuerpos de agua lenticos equivalente a 831.163,7 ha; de las que 397.613,7 corresponden a ciénagas, 51.864,3 a embalses y 123.412 hectáreas son lagunas. Los embalses se encuentran, en forma mayoritaria, en la cuenca alta del Magdalena y en la zona de Antioquia y se han tomado como recursos hídricos disponibles en el caso de los períodos de sequía y como reguladores para evitar la escasez (IDEAM, 2014).

El municipio de Concordia, ubicado en el Suroeste del Departamento de Antioquia sobre la cordillera occidental, tiene una población total de 21,420 habitantes de los cuales 8,150 habitantes se encuentran en la zona urbana. La mayor parte de la población está ubicada en la zona rural y la principal actividad económica es la agricultura, con producción de pastos para ganadería en las zonas de mayor altitud, en la zona intermedia (1700 – 2050 m.s.n.m.) cultivos de café, intercalados con algunas parcelas de yuca, plátano, tomate y frijol (Alcaldía, Concordia, 2015).

Parte de las aguas que surten el acueducto del Municipio de Concordia, tienen su nacimiento en la finca conocida como la Nitrera. El suministro de agua para el área urbana es proporcionado por el embalse que posee dicho predio, con una capacidad inicial de 80,000 m³ que se encuentra en el área rural y comprende dos microcuencas principales: la Santa Mónica y la Nitrera.

Un amplio número de lugares en Colombia son altamente propensos a la acción de eventos severos de erosión, deslizamiento, aludes e inundaciones (Restrepo, 2015) por desconocimiento de la dinámica a la que está expuesta la población (Banco Mundial, 2012). Por lo cual es necesario determinar el origen y causa de los mismos para incorporar esta información a la planificación y ocupación del territorio (Unidad Nacional para la gestión del Riesgo, 2013).

Tanto la geomorfología como la hidrogeología pueden ser utilizadas como herramientas para la interpretación de la prospección, captación y protección de recursos hídricos (Florez, 2015). Así mismo, es necesario estudiar y analizar los procesos geomorfológicos y la disposición de estructuras geológicas superficiales que afectan la calidad de vida y la disposición de recursos de la población asentada en cualquier región (Gonzalez & Soto, 2010).

El moldeamiento de los canales y la sedimentación de un embalse son consecuencia de los procesos hidrodinámicos, pues finalmente de ellos depende el transporte de los sedimentos. Los embalses modifican el flujo y la transferencia por sedimentos que impulsan los cambios de forma de canal a lo largo de la cuenca que las provee. Dentro de los procesos naturales se encuentra la dinámica de los sedimentos, que tiene relación directa con la hidrodinámica de la zona.

Los funcionarios de las empresas públicas de Concordia han reportado la disminución de la capacidad del embalse y el deterioro de las paredes del cauce. Con una tasa de erosión de 2 mm/año para las zonas más altas de la quebrada Santa Monica, 1mm/año para la quebrada la Nitrrera y de 0.09mm/año para la zona del embalse, dada la geografía tan quebrada de la zona del Suroeste de Antioquia y las condiciones antes mencionada (Cárdenas & Restrepo, 2010). Es por tanto de suma importancia hacer la identificación de las unidades geomorfológicas y las condiciones del suelo que predominan en la zona. Para la identificación de dichas unidades es necesario hacer una caracterización morfométrica, además de tener un conocimiento mínimo sobre las estructuras geológicas presentes en el Parque Natural la Nitrrera, que tienen un amplio dominio sobre la disposición de lineamientos.

La investigación busca entender si las condiciones actuales benefician la permanencia del embalse y cuáles son las características del suelo de la cuenca que lo provee. Esto se logra a través de una caracterización de las unidades geomorfológicas presentes en el Parque Natural la Nitrrera, el cálculo de parámetros morfométricos de la cuenca e identificación de las propiedades y estructura del suelo. Esto llevara al entendimiento de la evolución del parque natural y a encontrar las soluciones adecuadas para el manejo en pro de la conservación del embalse y sus afluentes.

1.2 Pregunta de investigación

¿Cómo inciden las condiciones actuales de geomorfología y suelo en la vida útil del embalse del Parque Natural la Nitrrera?

1.3 Hipótesis

Por las condiciones morfométricas y geomorfológicas en la cuenca, principalmente asociados a los cambios que se presenten por efectos de fallas o trazas de fallas a nivel regional, la permanencia y vida útil del embalse puede verse reducida puesto que las condiciones de una topografía altamente quebrada, cambios extremos en cuanto a la precipitación en la zona y las características arcillosas del suelo muestran una tendencia a movimientos en masa e inestabilidad de las paredes de contención del embalse y del cauce de las quebradas que lo proveen.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Determinar las características geomorfológicas, hidrogeológicas y morfométricas del Parque Natural la Nitrera en Concordia, Antioquia a partir del cálculo de parámetros geomorfológicos y la identificación de la toposecuencia de la zona.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas por medio de una revisión estructural y geológica del Parque Natural la Nitrera.
- Determinar y calcular parámetros geomorfológicos y morfométricos de la cuenca que provee el embalse del parque Natural la Nitrera.
- Medir las propiedades físicas y químicas del suelo de la cuenca y el embalse usando el marco normativo para Colombia del Parque Natural la Nitrera.
- Identificar las principales características del suelo del Parque Natural la Nitrera .

Capítulo II: Marco Teórico

Luego de una búsqueda y análisis de información se procede en este capítulo a desarrollar el estado del arte. Se inicia describiendo los ciclos, procesos e índices geomorfológicos e hidrogeomorfológicos y como intervienen en los procesos de modelación de cuencas y embalses, se abordan temas de procesos erosivos y la influencia de estos, posteriormente una descripción del uso del suelo comprendiendo los procedimientos de evaluación de sus características, finalmente se describen metodologías existentes para cuantificar propiedades del suelo y parámetros para evaluar la gestión de un embalse. Así mismo, se incluye un apartado con la determinación de las principales características del Parque Natural La Nitrera. A modo de introducción a los temas principales se hace una descripción de la disposición del recurso hídrico de forma global y la gestión de los embalses.

Aunque el agua en la tierra es abundante, sólo el 2.5 % es agua dulce, siendo el resto los mares salinos y los océanos del mundo. De esa pequeña fracción, un 69.5% por ciento se congela estando fuera del alcance en forma de glaciares y permafrost (Stewart raf, 2014). De la precipitación total que cae sobre la tierra, la mayoría cae en el mar y una gran parte de lo que cae en la tierra termina en forma de escorrentía. Sólo el 2% del total se infiltra para reponer el agua subterránea (NATO, 2016). Las aguas dulces constituyen un recurso escaso, amenazado y en peligro; de acuerdo con los estudios sobre los balances hídricos del planeta solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran realmente disponibles a todos los usos humanos directos (Stewart raf, 2014). De esta pequeñísima porción dependen procesos sociales vitales. Recientes evaluaciones de los especialistas y organizaciones internacionales

conectadas con los problemas del agua, sugieren que para el año 2025 más de las dos terceras partes de la humanidad sufrirá algún estrés por la falta de este líquido (CEPAL, 2013).

La cantidad media de agua disponible por persona varía de menos de 50 m³ por año en algunas partes de Oriente Medio, a más de 100,000 m³ por año en zonas húmedas y escasamente pobladas (Jongerden, 2012). Los recursos hídricos se enfrentan a una multitud de amenazas graves, todas ellas originadas principalmente por las actividades humanas como la contaminación, el cambio climático, el crecimiento urbano y cambios en el paisaje resultado de la deforestación (Restrepo, 2015). Cada una de ellas tiene un impacto específico, por lo general directamente sobre los ecosistemas y, a su vez, sobre los recursos hídricos. Con una gestión inadecuada, actividades como la agricultura, el desmonte, la construcción de carreteras, entre otras, pueden provocar una acumulación excesiva de tierra y partículas en suspensión en los ríos (sedimentación), lo que causa daños en los ecosistemas acuáticos, deteriorando la calidad del agua (Martel, 2013).

Las actividades humanas tienen una estrecha relación con la accesibilidad al agua, y el valor asignado al recurso es directamente proporcional a la escasez que se produce en cada región (Muleta & Nicklow, 2010). Satisfacer una demanda de agua continua y cada vez mayor requiere esfuerzos para compensar la variabilidad natural y mejorar tanto la calidad como aumentar la cantidad del agua disponible. Las presas y los embalses se construyen a fin de almacenar agua para el riego y el consumo, y pueden proporcionar electricidad y ayudar a controlar las inundaciones, aunque también pueden generar impactos sociales y medioambientales negativos (Lejon, Renöfält, & Nilsson, 2009).

Los embalses modifican el flujo y la transferencia de sedimentos que impulsan los cambios de forma del canal a lo largo del río aguas abajo. Estos cambios se han implementado desde hace más de 50 años (Petts & Gurnell, 2010). Hay tres temas de influencia identificados: (i) la dinámica del canal, (ii) el papel de la vegetación de ribera, y (iii) cambio de canal del conducto ecológico. Los cambios pueden ser rápidos en las regiones semiáridas, pero en otros lugares, períodos de relajación puede extenderse hasta milenios.

En Colombia se ha identificado un área cubierta por cuerpos de agua lénticos equivalente a 831,163.7 ha, de las cuales 51,864.3 ha corresponden a embalses destinados a uso energético, doméstico y agrícola (IDEAM, 2014), que generan una huella hídrica de gran tamaño en el territorio. Teniendo como huella hídrica el volumen de agua dulce extraída de un cuerpo de agua superficial o subterránea y que es evaporada en el proceso productivo se tiene discriminada la huella por servicio, así: Energía 286.7 Mm³/año, Doméstico 14.6 Mm³/año, Riego 1.1 Mm³/año, otros usos 0.4 Mm³/año y sin información de uso 29.1 Mm³/año, para un Total de 331.9 Mm³/año (MINAMBIENTE, 2017). Los embalses se encuentran, en forma mayoritaria, en la cuenca alta del Magdalena y en la zona de Antioquia y se han contemplado

como recursos hídricos disponibles en el caso de los períodos de sequía y como reguladores para evitar la escasez (IDEAM, 2014).

Esmed & Ismad (2006) afirman que “La gestión integrada de los recursos hídricos es hoy un prerrequisito para la preservación medioambiental y para el desarrollo económico. Sin embargo, las acciones propuestas se encuentran con dificultades de implementación por falta de datos necesarios y por el desconocimiento de las interacciones entre los componentes hidrológicos y geomorfológicos“, citado en (Torres-Bejarano, Padilla Caba, & Cuevas, 2015).

2.1 Geomorfología e índices geomorfológicos

La geología como ciencia que estudia los procesos de la tierra, cuenta con diversas ramas que estudian los procesos con más detalle, como la geomorfología y la hidrogeología (Dokmanovic, 2013). El relieve terrestre evoluciona por la dinámica de la litósfera a partir de una serie de procesos tanto destructivos como constructivos, que dan las formas del relieve y son el tema central de estudio de la geomorfología, y por otro lado la hidrogeología se encarga del estudio de la geodinámica del agua tanto superficial como subterránea, así como sus condicionamientos geológicos y su captación (Hernani T. & Ramírez, 2012).

La geomorfología es la disciplina científica encargada de estudiar en forma integral los procesos y factores influyentes asociados al origen de las geoformas que configuran los paisajes terrestres, así también como de interpretar la evolución de la configuración superficial actual, y la futura por medio del análisis de secuencias sedimentarias fósiles, meteorización, erosión, transporte y diagénesis de sedimentos, análisis de secuencias de suelos, dinámica de la escorrentía y reconocimiento de estructuras fósiles o soterradas, entre otras (Casali, 2013).

De acuerdo a Huggett (Huggett, 2007) los procesos endógenos y exógenos en términos geomorfológicos son determinantes para la evolución del relieve e influyen directamente en fenómenos modeladores de la superficie terrestre. Dichos fenómenos modeladores se pueden clasificar en tres ciclos, el primero concierne al ciclo hidrológico que incluye los procesos de circulación del agua a través de la hidrósfera, atmósfera y la parte superior de la corteza terrestre; el segundo corresponde al ciclo de las rocas, asociado al permanente proceso de modificación de los materiales de la corteza como consecuencia de la meteorización, erosión, diagénesis y litificación. Por último corresponde al ciclo biogeoquímico que abarca ciclos tales como los del Carbono, Oxígeno e Hidrógeno entre otros, que tienen su circulación e intercambios en la ecósfera (Citado por (Niño, 2015)).

Reconociendo la dependencia de la geomorfología de la interacción entre la geología, el clima, y el movimiento del agua sobre la tierra, las características físicas de una cuenca forman un conjunto de gran influencia en el comportamiento hidrológico, tomando la cuenca como un sistema (Ministerio de ambiente y desarrollo Sostenible, 2014). Debido a la relación que se presenta entre el comportamiento hidrológico y la geomorfología surge la

hidrogeología que es la encargada del estudio integral del agua, su distribución y evolución en un tiempo dentro del marco de la geología regional (Servicio Geológico Mexicano, 2016). Factores como la precipitación, evaporación, escorrentía y vegetación son determinantes para comprender el comportamiento hidrológico y su papel como agente modelador del relieve (Werner, 1996).

Afirma Slaymaker (Slaymaker, 1980), que la geomorfología se basa en técnicas cuantitativas y experimentales; uno de los aspectos más sobresalientes es la amplia incorporación del trabajo de campo y de laboratorio. Dentro del trabajo de laboratorio se desarrollan las pruebas necesarias para conocer las propiedades de la zona de estudio, mientras que para los trabajos en campo se encuentran tres objetivos (i) Mediciones de la evolución en magnitud y frecuencia del relieve, (ii) Mediciones de los cambios morfológicos en diferentes unidades de paisaje y por último, (iii) Mediciones de la acción de un proceso bajo el control artificial de alguna de las variables (Citado por (Sala, 2010)).

Para determinar la respuesta hidrológica de una cuenca ante un evento es necesario determinar los parámetros geomorfológicos que permitan buscar relaciones entre la geometría, la red de drenaje y el relieve de una cuenca para así determinar las tasas de erosión, con las cuales se pueden estimar los volúmenes de sedimentos y dinámica geológica (Verdú, 2003). El cálculo de los parámetros geomorfológicos se estima mediante la información cartográfica, de la topografía, medición del uso del suelo y de las medidas en campo. Los planos para estos análisis son usados en escalas variables dependiendo de los objetivos del estudio y del tamaño de la cuenca en cuestión. Se podría decir que para cuencas de un tamaño superior a los 100 km² un plano topográfico en escala 1:100,000 es suficiente (Universidad de los Andes Venezuela, 2013).

La necesidad de contrastar las conclusiones logradas a partir de un análisis estructural es propiciado por el uso de diversas técnicas de análisis geomorfológico o morfométrico, tales como la geomorfometría con sensores remotos y SIG para definir el entorno geodinámico; la cuantificación de la morfología del terreno permite comparar distintos entornos para caracterizar así áreas de comportamientos particulares (Sociedad Geológica de España, 2010). Uno de los usos particulares y más implementados de los índices geomorfológicos es en la caracterización de cuencas hídricas.

Dentro de las características geomorfológicas relevantes que se asumirán en este trabajo están, el área, longitud de la cuenca y su perímetro, pendiente promedio de la cuenca, curva hipsométrica, histograma de frecuencias altimétricas, altura y elevación promedia, relación de bifurcación de los canales, densidad de drenaje, perfil y pendiente promedia del cauce principal y coeficiente de cubrimiento de bosques o vegetación.

2.1.1 Parámetros de tamaño de cuenca.

1). Longitud, perímetro y ancho:

Como se puede ver en la *figura 1* la longitud, L, de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo y otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Hernani T. & Ramírez, 2012).

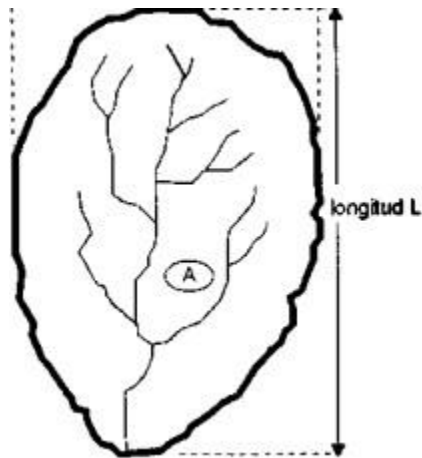


Figura 1. Longitud y perímetro de una cuenca

Tomada y modificada de (M. Villón, 2014)

El perímetro de la cuenca es un parámetro importante, pues en conjunto con el área, indica sobre la forma de la cuenca. La definición de perímetro está dada por el cálculo de la longitud de la línea de proyección en el plano horizontal (Jardi, 1985).

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) y se designa como W. De tal forma que:

$$W = \frac{A}{L}$$

Ecuación 1 Ancho de la cuenca

2). Área de la cuenca:

Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Rojo, 2014). Para efectos del balance hídrico, si se presenta una situación como la mostrada en la *figura 2*, el área superficial puede ser mucho menor que el área total contribuyente al caudal de un río.

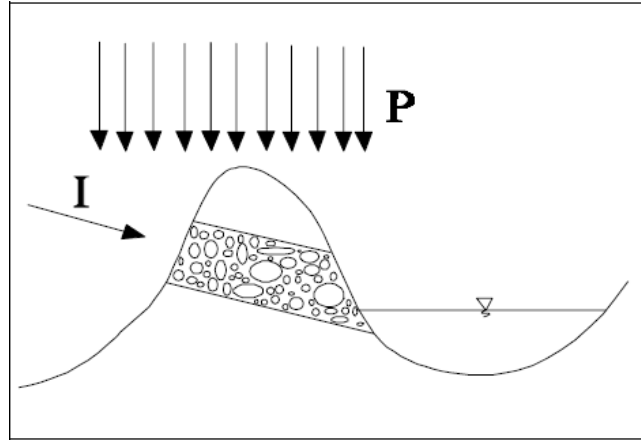


Figura 2. Divisoria de aguas superficiales y de aguas subterráneas.

Tomada de (Universidad de los Andes Venezuela, 2013)

Si se presentan estructuras geológicas que favorecen la infiltración de aguas de otras cuencas, es necesario tener en cuenta estos aportes que pueden ser bastante significativos (Lykoudi & Angelaki, 2014).

El área es un parámetro geomorfológico muy importante y su importancia radica en las siguientes razones (Sanchez San Roman, 2015):

- (i) Es un valor que se utilizará para muchos cálculos en varios modelos hidrológicos.
- (ii) Para una misma región hidrológica o regiones similares se puede decir que a mayor área mayor caudal medio.
- (iii) Bajo las mismas condiciones hidrológicas, cuencas con áreas mayores producen hidrógrafas con variaciones en el tiempo más suaves y más llanas. Sin embargo, en cuencas grandes, se pueden dar hidrógrafas con picos cuando la precipitación fue intensa en las cercanías, aguas arriba, de la estación de aforo.
- (iv) El área de las cuencas se relaciona en forma inversa con la relación entre caudales extremos: mínimos/máximos.

2.1.2 Parámetros de forma de la cuenca

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento.

Los principales factores de forma son (Hommes, Boelens, & Maat, 2016):

1). *Coficiente de compacidad o índice de Gravelius.*

Se define como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 2 Índice de Gravelius

Donde K es el radio del círculo equivalente en área a la cuenca. Por la forma como fue definido: $K \geq 1$. Obviamente para el caso $K = 1$, se tiene una cuenca circular (Universidad de los Andes Venezuela, 2013). El motivo para usar la relación de área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores dadas su simetría (Ibisate González de Matauco, 2004). A pesar de lo antes mencionado, este índice de forma ha sido criticado pues las cuencas en general tienden a tener la forma de pera.

2). *Factores de forma de Horton.*

Las observaciones de un buen número de cuencas reales en todo el mundo permiten establecer la siguiente relación entre el área de la cuenca A y el área de un cuadrado de longitud L, siendo L la longitud del cauce principal:

$$\frac{A}{L^2} = 1.41 A^{-0.136}$$

Ecuación 3 Factor Horton

Despejando el valor de L se tiene:

$$L = 1.41 A^{0.568}$$

Ecuación 4 Longitud Horton

En la *Figura3* se presentan varias hidrógrafas para cuencas con la misma área y diferentes formas ante una lámina precipitada igual.

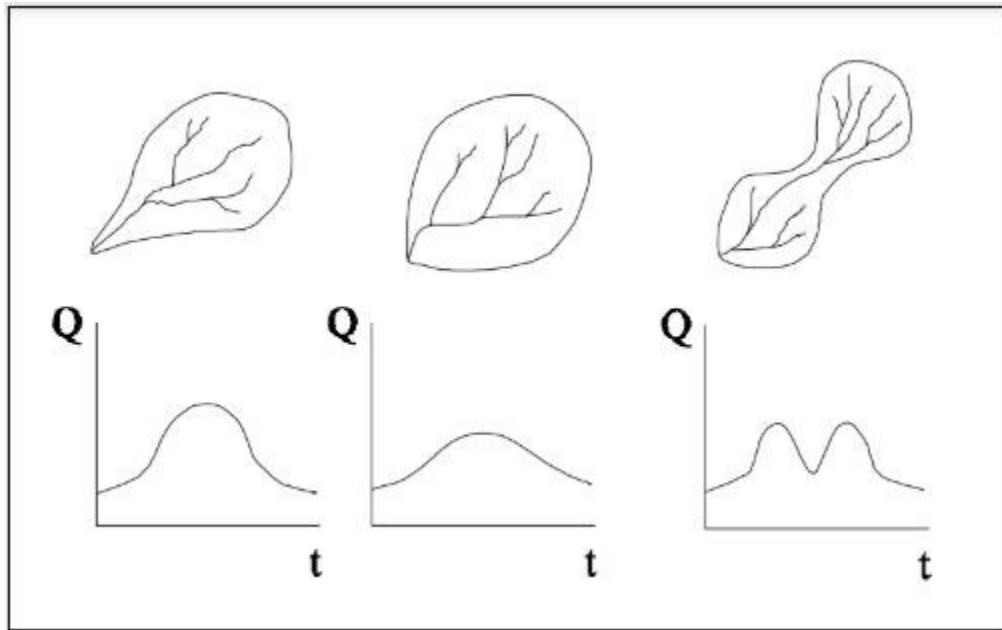


Figura 3 Hidrógrafas según la forma de la cuenca
Tomada de (Cardona, 2014)

La ecuación 3, muestra que las cuencas no son similares en su forma. A medida que el área aumenta, su relación $\frac{A}{L^2}$ disminuye, lo cual indica una tendencia al alargamiento en cuencas grandes (Cardona, 2014). La forma de la cuenca afecta los hidrogramas de caudales máximos, por lo que se han hecho numerosos esfuerzos para tratar de cuantificar este efecto por medio de un valor numérico. Horton sugirió un factor adimensional R_f (Cardona, 2014), como índice de la forma de una cuenca así:

$$R_f = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación 5 Factor Adimensional Horton

Donde A es el área de la cuenca y L es la longitud de la misma, medida desde la salida hasta el límite de la hoya, cerca de la cabecera del cauce más largo, a lo largo de una línea recta. Este índice y su recíproco han sido usados como indicadores de la forma del hidrograma unitario (Ashburner & Friston, 2003).

2.1.3 Parámetros relativos al relieve.

Son de vital importancia puesto que el relieve de una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma misma de la cuenca. Los parámetros relativos al relieve son:

1). Pendiente promedio de la cuenca.

La pendiente promedio de la cuenca aporta una importante información que es un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca (M. Villón, 2014). Uno de los métodos rudimentarios más representativos para el cálculo es el muestreo aleatorio por medio de una cuadrícula; llevando las intersecciones de la cuadrícula sobre el plano topográfico y calculando la pendiente para todos puntos arbitrariamente escogidos ver *Figura4*. Con todos estos valores se puede construir un histograma de pendientes que permite estimar el valor medio y la desviación estándar del muestreo de las pendientes. Las pendientes para los puntos dados por las intersecciones de la cuadrícula se calculan teniendo en cuenta la diferencia de las dos curvas de nivel entre las cuales el punto quedó ubicado y dividiéndola por la distancia horizontal menor entre las dos curvas de nivel, pasando por el punto ya determinado (Binjolkar & Keshari, 2012).

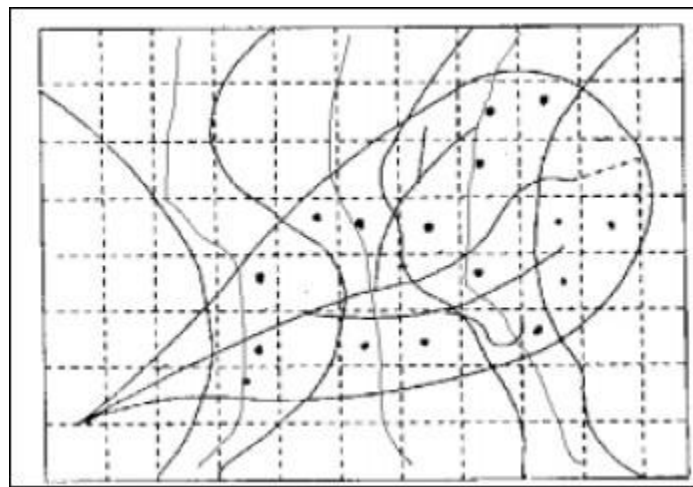


Figura 4 Método para hallar la pendiente S, en una cuenca.

Tomada y modificada de (Universidad de los Andes Venezuela, 2013)

2). Histograma de frecuencias altimétricas.

Contiene la representación de la superficie, en porcentaje, comprendida entre dos cotas, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. Realmente contiene la misma información de la curva hipsométrica pero con una representación diferente, dando una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca (Torres Buesaquillo & Téllez Páez, 2016) como se muestra en la *Figura5*.

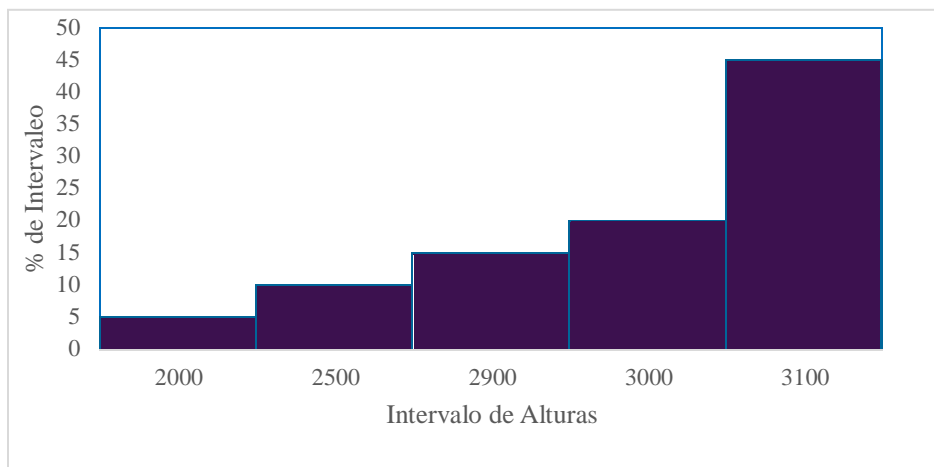


Figura 5 Histograma de frecuencias altimétricas.

Fuente Elaboración propia

3). Curva hipsométrica.

Es la curva que representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca. La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en km² o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros. Normalmente se puede decir que los dos extremos de la curva tienen variaciones abruptas. La función hipsométrica es una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación (S. Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2010).

Es posible convertir la curva hipsométrica en función adimensional usando en lugar de valores totales en los ejes, valores relativos: dividiendo la altura y el área por sus respectivos valores máximos (Nuñez, Triana, Verdugo, German, & Martinez, 2014). La figura 6, presenta el gráfico adimensional que es muy útil en hidrología para el estudio de similitud entre dos cuencas, cuando ellas presentan variaciones de la precipitación y de la evaporación con la altura.

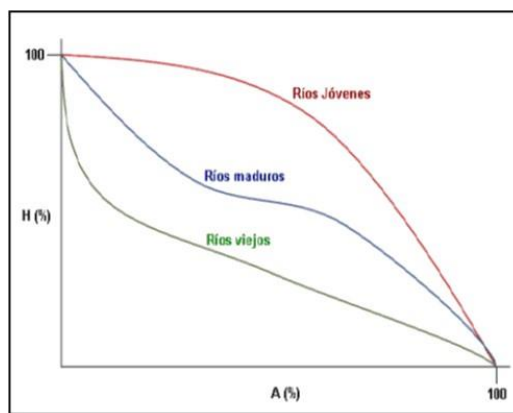


Figura 6 Curvas hipsométricas características.

Tomado de (S. Ibáñez et al., 2010)

4). Perfil altimétrico del cauce principal.

Es simplemente el gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del cauce principal. Con base en la forma del perfil altimétrico del cauce se puede inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica de la cuenca en su expresión de la hidrógrafa. También los perfiles se usan para estudios de prefactibilidad de proyectos hidroeléctricos, producción de sedimentos, ubicación de posibles sitios susceptibles de avalanchas, etc. Generalmente cuencas con pendientes altas en el cauce principal tienden a tener hidrógrafas con ángulos más agudos y más cortas que cuencas con pendientes menores. En la figura 7 se presentan los perfiles de algunas hidrógrafas de distintos perfiles altimétricos.

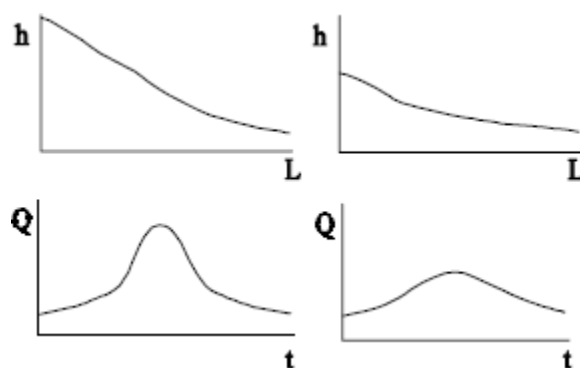


Figura 7. Hidrógrafas según el perfil altimétrico del cauce principal

Tomada de (Universidad de los Andes Venezuela, 2013)

La pendiente promedio puede ser encontrada de varias formas. Entre ellas se podrían citar:

- (i) El valor obtenido de dividir la diferencia en elevación entre el punto más alto y el punto más bajo del perfil del río en el cual estamos interesados, por la longitud a lo largo del cauce en su proyección horizontal entre los dos puntos antes determinados.
- (ii) Con base en el perfil altimétrico a lo largo del río se puede encontrar la pendiente de la recta ajustada a parejas de valores obtenidos en intervalos iguales a lo largo del cauce. Se aplica la técnica de los mínimos cuadrados.
- (iii) Por medio de una recta ajustada usando el criterio de la denominada curva de masas. Este método se efectúa ajustando la recta tal que las áreas de corte o positivas y de lleno o negativas sean iguales y mínimas.
- (iv) Usando cualquiera de los métodos anteriores pero sin tener en cuenta toda la trayectoria del cauce principal, ignorando por lo tanto de un 10% a un 15% de los tramos extremos (nacimiento y desembocadura).

5). *Altura y elevación promedia del relieve.*

La elevación promedia en una cuenca tiene especial interés en zonas montañosas pues nos puede dar una idea de la climatología de la región, basándonos en un patrón general climático de la zona. La elevación promedia está referida al nivel del mar. Este valor puede ser encontrado usando la curva hipsométrica o el histograma de frecuencias altimétricas. La estimación por una media aritmética ponderada en el caso del histograma, o de la curva hipsométrica calculando el área bajo la curva y dividiéndola por el área total.

La altura media, H , es la elevación promedia referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca (Sunkar & Tonbul, 2011).

2.1.4 Caracterización de la red de canales.

La forma en que estén conectados los canales en una cuenca determinada, influye en la respuesta de esta a un evento de precipitación. Se ha desarrollado una serie de parámetros que tratan de cuantificar la influencia de la forma del drenaje en la escorrentía superficial directa. El orden de los canales es uno de ellos. Uno de los criterios para determinar el orden de los canales en una hoya es el definido por el modelo de STRAHLER (Chavan & Srinivas, 2015). Según este modelo se toman como canales de primer orden todos aquellos que no tengan afluentes. Cuando se unen dos canales de primer orden forman un canal de segundo orden y así sucesivamente como lo muestra el diagrama de la *Figura 8*.

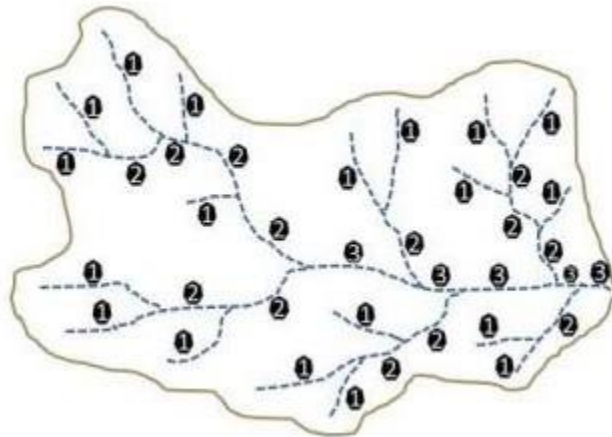


Figura 8 Orden de una cuenca

Tomada de (Fallis, 2013)

1). *Índices de Horton.*

La idea de Horton de cuantificar las propiedades geomorfológicas de una cuenca lo llevó a deducir ciertas relaciones que se conocen como los números o índices de Horton. Los principales son:

- *Relación de longitudes de corriente L.*

Relaciona la longitud promedio de las corrientes de orden i (L_i) a la relación de la longitud de la corriente (r_l) y a longitud promedio de las corrientes de primer orden (l_1), así:

$$L_i = l_1 r_l^{i-1}$$

Ecuación 6 Relación de longitudes de corriente

La relación de longitud de la corriente se define como el promedio de la longitud de las corrientes de cualquier orden sobre la longitud promedio de las corrientes de orden inmediatamente inferior.

- *Relación de áreas.*

Relaciona el área de las cuencas de orden i (A_i), el área de las cuencas de orden 1 (A_1) y la relación de área de corrientes (r_a) así:

$$A_i = A_1 r_a^{i-1}$$

Ecuación 7 Relación de áreas

La relación de área de corrientes, r_a es la relación del área promedio de las corrientes de un orden i , sobre el área promedio de las corrientes de orden inmediatamente inferior.

2). *Densidad de drenaje.*

Está definida como la relación, Dd entre la longitud total a lo largo de todos los canales de agua de la cuenca en proyección horizontal y la superficie total de la hoya:

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A}$$

Ecuación 8 Densidad de drenaje.

Donde:

$\sum L_i$: Longitud total de todos los canales de agua en km

A: área en km²

L_i : Longitud de cada cauce.

La densidad de drenaje es una pauta para conocer parámetros asociados como la resistencia a erosión o la permeabilidad, valores bajos de Dd generalmente están asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Valores altos fundamentalmente son encontrados en regiones de suelos impermeables, con poca vegetación y de relieve montañoso (Tucker, Andrea, & LBras, 2010).

2.1.5 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es una de las variables más importantes a determinar en la planificación de usos del suelo y en la conservación de suelos y aguas o gestión de recursos hídricos. Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida (Alvarez, 2006).

Para el tiempo de concentración se han diseñado distintos métodos cada uno de ellos requiere algunas variables como la longitud del cauce, la pendiente promedio, el área de drenaje. Entre estos métodos se encuentran los siguientes:

A). Método de la USDA :

Es para cuencas menores a 1250 ha que relaciona el tiempo de concentración, con la longitud del punto más alejado (L) , la pendiente media (S) y la diferencia de altimetría donde se halla un factor K como se ve en la ecuación 9 (Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2010).

$$T = 3.3 \frac{L}{S} \sqrt{L}$$

Ecuación 9 Tiempo de concentración USDA

B). Método de Bransby-Williams

Este método esta descrito en la ecuación 10. Donde

$$T = \frac{L}{1.5S} \sqrt[5]{\frac{M^2}{F}}$$

Ecuación 10 Tiempo de concentración de Bransby -Williams

T= tiempo de concentración (horas), L= distancia máxima a la salida (km), D= diámetro del círculo de área equivalente a la superficie de la cuenca (km²), M= área de la cuenca (km²), F= pendiente media del cauce principal (%)

C) Método de Kirpich

descrito en la ecuación 11.

$$T = 0.02 L^{0.77} S^{-0.385}$$

Ecuación 11 Tiempo de Concentración de Kirpich

Dónde: T= tiempo de concentración (minutos), L= longitud máxima a la salida (m), S= pendiente media del lecho (m/m)

2.2 Suelo

El uso de la tierra es uno de los principales factores que afecta la calidad y la accesibilidad en los ríos y embalses (Forneron, Piccolo, & Carbone, 2010); cada tipo de uso de la tierra genera una huella identificable a través del análisis visual de imágenes satelitales. La correcta identificación de las características físicas del suelo y su evolución con la intervención antropogénica es de vital importancia para caracterizar una zona (Liu & Shi, 2017). La vegetación juega un papel muy importante en el balance hídrico y en la estabilidad de una cuenca ya que retarda la erosión superficial. Procesos erosivos generales ligados con el uso de la tierra como surcos con abarrancamiento y cárcavas asociadas con la deforestación y el sobrepastoreo generan deslizamientos que tienen que ver con la socavación lateral de los cauces y caños; la identificación de estos procesos provee la base para identificar estructuras más susceptibles y cercanas a modificar el paisaje (Brown, Zhang, McMahon, Western, & Vertessy, 2005).

El suelo procede de la roca madre, la cual se altera por la acción de los se desarrolla una serie de procesos que transforman el material original hasta darle una morfología y propiedades (Badía, Martí, Aznar, & León, 2013). La intensidad de los cambios que se desarrollan en el paso de roca a suelo se puede intuir si se compara la morfología de una roca granítica y del suelo que a partir de ella se forma. Los cambios se producen tanto a nivel de alteración de los granos de los minerales en la roca en lo referente a su estructura. A nivel de alteración mineral la transformación comienza afectando a los minerales más inestables piroxenos, anfíboles y plagioclasas (Okewale & Coop, 2017).

La aproximación al estudio del suelo desde los “factores formadores”, ha sido clave en el desarrollo de la ciencia del suelo; estos definen el estado del sistema y permiten predecir procesos de formación y propiedades de un suelo, si se conoce la combinación de los factores que describen el sistema (Birkeland, 2005). Los factores formadores del suelo son, el clima que influye directamente en la humedad y la temperatura del suelo e indirectamente a través de la vegetación, la litología, la roca sobre la que se forma el suelo suele denominarse material parental u originario que puede tratarse de una roca consolidada, un depósito no consolidado e incluso un suelo pre-existente. Se constituye en un elemento pasivo sobre el que actúan el resto de factores formadores (Pirrís & Rica, 2011). Otro de los factores es, el relieve puesto que la formación del suelo se ve condicionada por la posición que ocupa en el relieve que afecta la redistribución de masa y energía. Los organismos también son un factor formador ya que una amplia variedad de formas biológicas (animales, bacterias, hongos, algas) resulta trascendental en el funcionamiento de los ciclos del carbono, del nitrógeno, etc. La vegetación ejerce una serie de acciones tanto directas como indirectas en la formación y conservación del suelo y por último se tiene el tiempo dado que cada uno de los factores anteriormente mencionados ejercen su influencia en la formación del suelo a lo largo del tiempo dando lugar a características morfológicas distintas (Irisarri, 2014). Al estudiar la evolución del suelo, desde un factor específico, manteniendo los otros constantes, se obtienen las relaciones conocidas como secuencias (Schaetzl & Anderson, 2011).

El suelo en general está compuesto por minerales, materia orgánica, agua y aire como se ve en la Figura 9, los minerales componen casi el 50% del suelo, mientras que la materia orgánica es apenas un 5 % de la composición total. La composición y proporción de estos componentes influyen mucho en las propiedades físicas, incluyendo estructura, porosidad y la fracción de espacio poroso. Estas propiedades afectan el movimiento del aire y del agua en el suelo, y por lo tanto la capacidad e intercambio del mismo. Aunque la materia orgánica comprende una porción relativamente pequeña de suelo, típicamente sólo entre 1 a 4% en los suelos agrícolas, desempeña un papel clave en muchos procesos del suelo (McCauley, Jones, & Jacobsen, 2005).



Figura 9 Componentes de suelo.

Tomada y modificada de (McCauley et al., 2005)

El desarrollo del suelo depende tanto del material original generado por la roca madre por procesos de meteorización de minerales como de materia orgánica, todo esto condicionado por la topografía (Weil & Brady, 2016). Como resultado de estos procesos el perfil del suelo se ve representado por distintas capas llamadas horizontes. Como se puede ver en la *Figura 10*, el primer horizonte O es el compuesto por material orgánico que está fresco o parcialmente descompuesto. El horizonte A es la parte mineral del suelo, la cual es una capa que se ve muy afectada por la actividad biológica y humana. El horizonte E es la zona de lavado donde están los procesos de lixiviación; posteriormente se encuentra la zona de acumulación (Horizonte B) que como su nombre lo indica es donde se depositan partículas como las arcillas y los carbonatos. La zona C representa la zona de material meteorizado original. Por último se encuentra la roca madre o la zona más profunda de acumulación de materiales arrastrados por el viento, agua, gravedad o glaciares según sea el caso (McCauley et al., 2005). Esta descripción básica de perfil es la sugerida por la USDA.

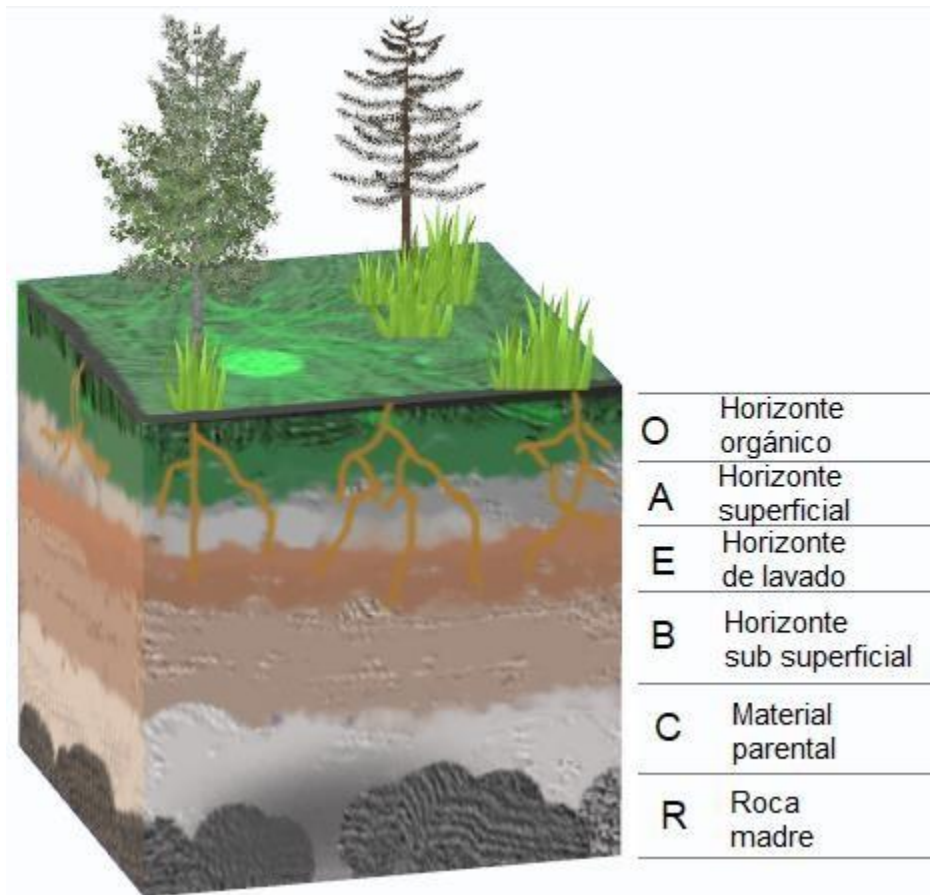


Figura 10 Perfil general de suelo común.

Elaboración propia

Pero no solo la USDA tiene descrita la caracterización de los perfiles de suelo, tal es el caso del modelo propuesto por Deere y Patton, en el cual se tiene para regiones tropicales altamente meteorizada (Deere & Patton, 1971), que define 3 zonas : suelo residual, roca meteorizada y roca fresca.

El suelo residual se origina cuando los productos de meteorización no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan en el sitio de formación. Cuando la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de la descomposición y por tanto se produce una acumulación de suelo residual.

El perfil de un suelo residual puede dividirse en tres zonas:

1A. Zona superior, en la que existe un elevado grado de meteorización, pero también cierto arrastre de materiales.

1B. Zona intermedia, en la parte superior existe meteorización de menor grado que la zona superior, pero también cuenta con un grado de acumulación hacia la parte inferior de la misma.

1C. zona parcialmente meteorizada, que sirve de transición del suelo residual a la roca original inalterada.

Los suelos residuales se desarrollan principalmente en condiciones tropicales húmedas, de meteorización química intensa.

En cuanto a la roca meteorizada se tienen estructuras de la roca madre. El espesor de los horizontes saprolíticos de suelo residual puede variar de unos pocos metros a más de 20 m con valores típicos de 5 a 9 m. Aunque presentan gran heterogeneidad es común que se observe cambios graduales de sus características con la profundidad, especialmente en lo relacionado con la resistencia al corte y la permeabilidad.

En esta zona se tienen 2 horizontes que presenta tantas condiciones de roca alterada y en la parte del horizonte más bajo se tiene una roca con condiciones de dureza de roca madre.

Para la zona III se tiene un único horizonte que consta de la roca fresca que presenta las características de la roca madre, baja o nula meteorización y alta cohesión.

Tabla 1 Descripción de horizontes del suelo.

Fuente: Elaboración Propia

Zona	Horizonte	Descripción
Zona I Suelo residual (regolito)	1A	Suelo superficial, raíces y m.o. Zona de lavado y eluviación
	1B	Enriquecido en arcillas y acumulaciones de Fe, Al y Si. Ausencia de estructuras heredadas
	1C	
Zona II Roca meteorizada	2A	Transición de suelo residual (saprolito) a roca parcialmente meteorizada.
	2B	Roca blanda a dura
Zona III	3	Roca fresca

El suelo ha sido caracterizado en tres ítems en especial, propiedades físicas, químicas y biológicas, como las más representativas dentro de un estudio ambiental; en la *Figura 11* se esquematizan las principales para cada ítem (McCauley et al., 2005).



Figura 11 Propiedades del Suelo.

Fuente :Elaboración Propia ,A partir de (FAO, 2017)

Dentro de las características químicas se hace mención a la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) que evalúa la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener, dentro de los nutrientes se enmarca la presencia de elementos como el N, Cl, S, Na y Ca dentro de los procesos de Oxidación, salinización y alcalinización y por último el pH que determina el grado de adsorción de iones H^+ por las partículas del suelo indica la acidez del suelo(FAO, 2017).

Las propiedades físicas comprenden estructura, textura, densidad y porosidad como las principales. Las partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados. La estructura (*Figura 12*) del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. Una de las formas de describir la estructura del suelo es en función del grado de desarrollo, según la formación y el tipo de empaquetamiento. Dentro del grado de desarrollo se describe en la intensidad de agregación y expresa la diferencia entre la cohesión de los agregados y la adherencia que hay entre ellos, según el empaquetamiento se refiere al tamaño medio de los agregados individuales y de donde proceden los agregados. En cuanto a la forma se tiene que es la forma de describir la forma o configuración de loa agregados individuales (FAO, 2017). El agua es la sustancia elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia debido a su solución y precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas (FAO, 2017). La textura del suelo es una de las características más importantes puesto que conduce las propiedades y procesos físicos, químicos, biológicos e hidrológicos (Poggio & Gimona, 2017).

ESTRUCTURA DEL SUELO

Por agregados



Figura 12 Clasificación estructura del Suelo.

Fuente :Elaboración Propia ,A partir de (FAO, 2017)

2.3 Sistemas de información Geográfica

Afirman Remondo y Oguchi (Remondo & Oguchi, 2009), que los avances y la popularidad de la tecnología SIG junto con el incremento de la disponibilidad de modelos de elevación digital (MED) y otros recursos espaciales como las imágenes satelitales y sensoramiento remoto han provocado un gran crecimiento de la aplicación de herramientas SIG en muchas áreas de la geomorfología. Las bases de datos geoespaciales disponen de la representación y caracterización de superficies de la tierra, facilitan la comprensión de la estructura de la superficie terrestre y otros fenómenos geomorfológicos y revelan las relaciones espacio - temporales entre procesos naturales, estructuras y factores antropológicos. Inicialmente los SIG solo eran utilizados como herramientas de mapeo, pero hoy en día se han convertido en una poderosa herramienta tecnológica para evaluar una zona.

En geomorfología, las relaciones espacio temporales entre las características de la zona de estudio y procesos morfodinámicos son esenciales, así los SIG se convierten en una técnica muy útil para la representación, visualización, análisis y comprensión de las formas (Remondo & Oguchi, 2009). En la literatura reciente sobre geomorfología y el uso integrado de SIG se pueden encontrar muchas aplicaciones para definir las formas de la tierra tales como abanicos aluviales (Hashimoto et al., 2008), dolinas (Lamelas, Hoppe, de la Riva, & Marinoni, 2009), formas glaciales (Napieralski, Harbor, & Li, 2007), laderas (Fernández, Irigaray, El Hamdouni, & Chacón, 2008), dunas de arenas (Wilkins & Ford, 2007) y el fondo marino (Fernández-Salas et al., 2007).

Los SIG también están provistos de herramientas para la hidrología, puesto que es una ciencia con relaciones espacio temporales. Por el gran impacto que han tenido los SIG, el desarrollo de modelos hidrológicos y el análisis de datos de redes de comunicación hídrica son base del desarrollo de aplicaciones estándar usadas en el análisis de cuencas. Dentro del análisis estándar propuesto para la aplicación en la hidrología están incluidos procesos tales como el análisis de la dirección de flujo, delineamiento de las cuencas, red de drenaje y las interpolaciones espaciales de datos puntuales. La aplicación de SIG para el manejo de recursos hídricos se ha masificado tanto en instituciones nacionales como portales de servicios; el manejo de recursos hídricos requiere un cuidado adicional por los intereses y necesidades que estos representan y dependen del conocimiento exhaustivo de la dinámica del agua a nivel espacio-temporal (Korres & Scheider, 2017).

2.4 Parque Natural la Nitrera

Está localizado en el Municipio de Concordia, en el suroeste del departamento de Antioquia, a 97 kilómetros de Medellín, la capital del departamento, como se observa en la Figura 13. El municipio tiene una extensión de 237 km², tiene una topografía muy quebrada y se extiende desde el río Cauca, en la cota 450 m hasta su máxima altura el cerro Penderisco en la cota 3000 m; en este territorio nacen las quebradas La Comiá, Magallo y la Fotuta (Uribe, 1996). El Suroeste antioqueño se encuentra localizado entre la vertiente oriental de la cordillera Occidental y la vertiente occidental de la cordillera Central, que conforman el cañón del río Cauca y la cuenca del río San Juan, al suroccidente del departamento de Antioquia (Gobernacion de Antioquia, 2016). Es un área privilegiada en lo referente a la riqueza de sitios de interés geológico y minero (Cárdenas & Restrepo, 2010).

Los terrenos del área de la zona donde se encuentra construido el embalse están localizadas aguas debajo de la confluencia de las quebradas la Nitrera y Santa Monica, en donde se estrecha el valle aluvial excavado en rocas sedimentarias areno- arcillosas del Miembro Urrao (Empresas publicas de Concordia, 2000). La zona del embalse se encuentra dentro de un área caracterizada por un valle relativamente amplio, relleno de materiales aluviales están conformados principalmente por gravas sueltas y cantos. El relleno aluvial en el área del embalse parece tener su origen en parte por la sedimentación provocada por el dique de concreto que se levanta para el desarenador del actual acueducto de Concordia. Las rocas sedimentarias son de características turbidíticas. En general las areniscas corresponden a las grauvacas, las cuales presentan una pobre selección, frecuentemente de material más grueso.

Las diferentes cuencas que proveen al embalse de Concordia no sólo se considerarán lugares de protección por contener recursos hídricos que suministra agua a los acueductos, sino que también son considerados lugares de espacio público rural, que estarán condicionados para uso ambiental y recreativo (CORANTIOQUIA, 2012). En la figura 13 se muestra la localización tanto del Suroeste de Antioquia , como del municipio de Concordia.

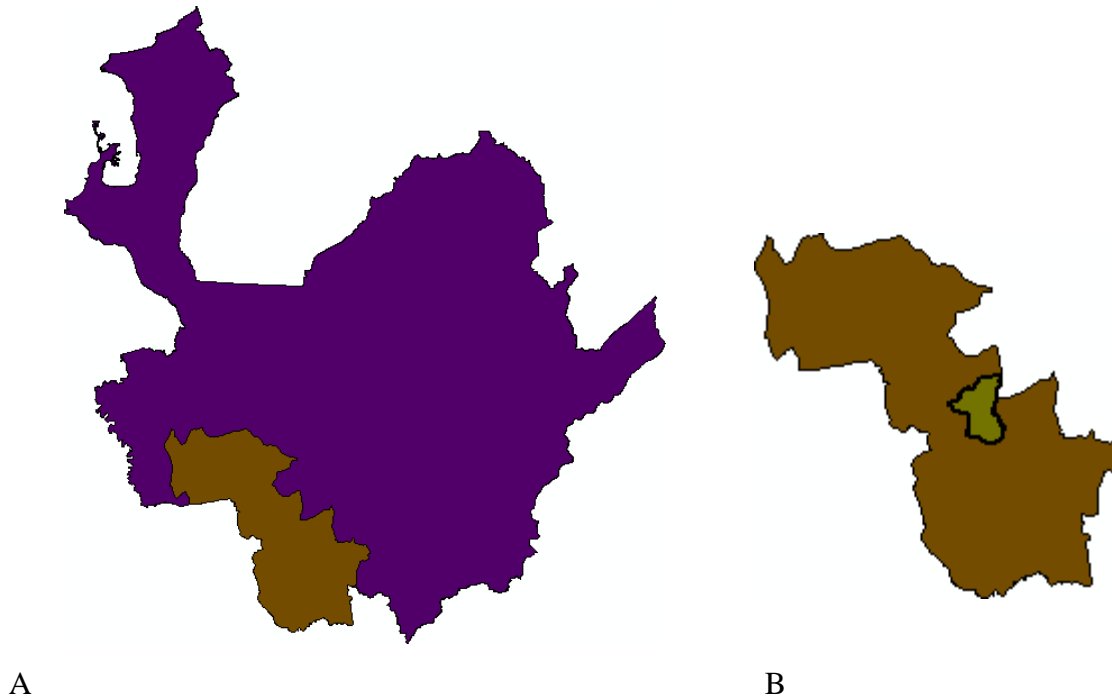


Figura 13 A. Localización Suroeste Antioqueño. B. Localización Concordia.

Fuente: Elaboración Propia.

Muy cerca de la zona urbana, a 15 minutos, en la cima de una montaña, se encuentra el parque embalse que abastece de agua el acueducto municipal y que tiene una connotación ambiental y turística ya que en sus alrededores se encuentra una amplia zona destinada a bosques y senderos naturales que son la continuación de los antiguos caminos indígenas y de herradura, y que aún permanecen en el lugar (Alcaldía de Concordia, 2015). En la figura 14 se muestra la localización del embalse en el municipio de Concordia.

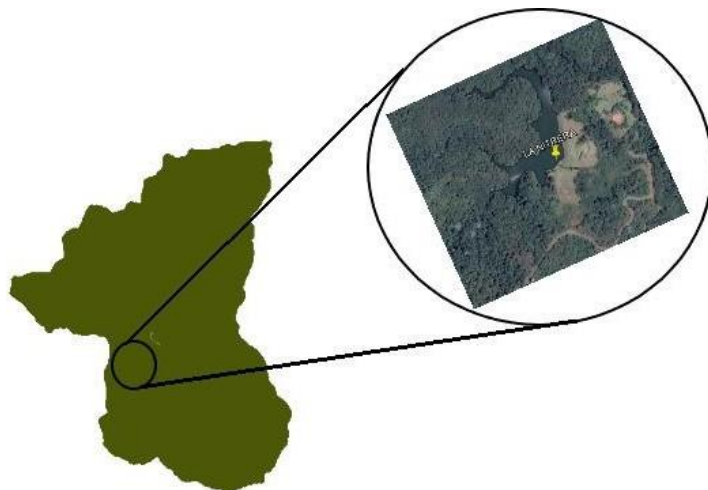


Figura 14 Localización Embalse "La Nitrera"

Elaboración Propia, A partir de Google. (s.f.). [Localización la Nitrera]. Recuperado el 3 de Octubre, 2017,

El embalse La Nitrera en el municipio de Concordia tiene por objeto almacenar las aguas de las quebradas Santa Mónica y La Nitrera para el suministro de agua potable a la población asentada en el casco urbano del municipio. La confiabilidad del suministro se ha visto afectada en épocas de sequías severas lo cual ha obligado a las autoridades municipales a mejorar las políticas de distribución, tarifarias y de educación, especialmente, reevaluar las condiciones actuales del sistema de abastecimiento (CORANTIOQUIA, 2012).

Capítulo III: Metodología

El desarrollo de este trabajo de investigación se llevó a cabo entre el año 2016 y el primer semestre de 2017, teniendo como parte central de trabajo de campo el año 2016 y el procesamiento y análisis de datos para el 2017. Con la intención de dar una descripción detallada de la metodología a desarrollar, se procederá a enumerar las actividades y herramientas para cada uno de los objetivos específicos propuestos y desarrollados dentro de una metodología general de cuatro fases como se ve a continuación en la *Figura 15*.

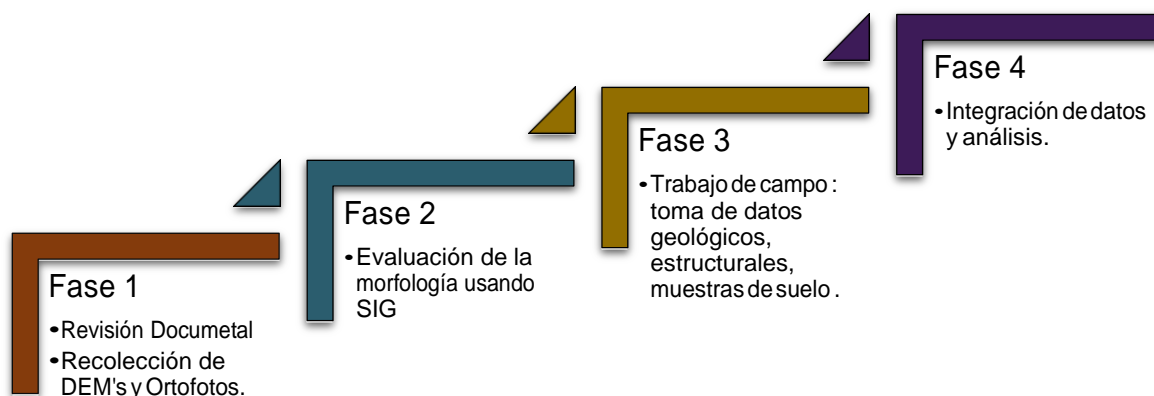


Figura 15 Esquema de Metodología General.

Fuente: Elaboración Propia

3.1 Objetivo 1.

Según lo planteado en el objetivo 1: Evaluar las condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas por medio de una revisión estructural y geológica del Parque Natural la Nitrrera, contemplado en la fase 1, fue necesario hacer una revisión documental (revisión bibliográfica), en la cual se consultaron publicaciones, libros, artículos, datos, informes de la alcaldía y CORANTIOQUIA. Se buscó información en las bases de datos que permitieron conceptualizar y definir el problema con información académica. Dentro de esta revisión documental se encontró el primero Diseño del Plan Maestro del Municipio de Concordia realizado por la Universidad de Antioquia en el año 1996 y la evaluación de la capacidad del Embalse realizado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en el año 2002.

Para tener un consolidado de la información a nivel geográfico se consultaron mapas y el DEM disponible del ALOS con resolución espacial de 12.5 m, para ubicar espacialmente las estructuras de interés. Solo se encontró un ortofotomosaico de la zona, provisto por Corantioquia a escala 1:10,000 del año 2014, adquirido con las especificaciones cartográficas del IGAC.

Los resultados cartográficos obtenidos están referidos al sistema de coordenadas Magna Sirgas, siguiendo los lineamientos del documento “Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano” (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2014). Los mapas son

presentados en un sistema de proyección cartesiana (N, E). El plano de proyección se definió de acuerdo con el origen cartográfico que corresponde al área de este estudio, según la regionalización de los parámetros de transformación del IGAC Magna Oeste Colombia.

Para la zonificación en SIG, se requiere de la definición de una unidad de cálculo adecuada o tamaño de celda que es la Unidad de cálculo de terreno (UCT) y también la unidad de zonificación del terreno (UZT) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

De acuerdo con la experiencia del Servicio Geológico Colombiano en la elaboración de cartografía temática de geología y geomorfología, se sugiere que el tamaño de la UZT mínima cartografiable sea de 2,500 m² (0.25 Ha.) en mapas a escala 1:5,000, que correspondería a polígonos aproximados en el papel de 1 x 1 cm y para la UCT se calculó para escala 1:50,00 de longitud 5 m y área 25 m².

De acuerdo con la guía metodológica para elaboración de mapas de geología para ingeniería del Servicio Geológico Colombiano. Los mapas de geología para ingeniería se pueden elaborar a partir de las Unidades de Geología para Ingeniería (UGI) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Las UGI permiten diferenciar tres aspectos fundamentales para obtener los modelos que permitan realizar los análisis sobre la geología de la región: (i) diferenciar los materiales aflorantes entre suelos y rocas, (ii) definir los espesores de suelo o las características estructurales del macizo rocoso, y (iii) caracterizar los materiales de acuerdo con sus propiedades (Varela, 2014).

Las etapas básicas para el desarrollo de este primer objetivo fueron la recopilación de información secundaria relacionada, la definición del marco geológico y estructural de la región, la delimitación y caracterización de las unidades, posteriormente elaborar un mapa base a partir de la cartografía básica, y el modelo digital de elevación. Para la geomorfología, se identificaron las unidades del relieve de primer y segundo orden por medio del análisis de modelos de elevación digital (Patiño et al., 2011), siguiendo las pautas propuestas de “Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia” (Carvajal, 2011), se hizo una clasificación de la clase a la que pertenecen por su magnitud y su pertinencia para el estudio. Además se contó con las curvas de nivel para el embalse y las cuencas.

Para el análisis de las condiciones geológicas, estructurales y geomorfológicas se siguió la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la cual indica que para realizar un estudio geológico que favorezca el uso de SIG sugiere disponer de la cartografía básica en formato digital proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el respectivo Modelo de elevación (MDT o DEM). A continuación, en la tabla 1 se plantean las respectivas actividades por orden cronológico.

Tabla 2 Actividades Objetivo 1.

Fuente: Elaboración Propia

Objetivo	Actividades
Evaluar las condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas por medio de una revisión estructural y geológica del Parque Natural la Nitrera.	Recopilar la información disponible.
	Compilar información documental secundaria de geología, geomorfología, estructuras y usos del suelo.
	Clasificar la información encontrada.
	Análisis de la información geológica.
	Análisis de ortofotos y mapas.
	Inspección geológica de la zona.
	Evaluación de la zona: litología, orientación y características de discontinuidades en masa rocosa.
	Identificar estructuras geológicas
	Elaborar mapa de unidades geomorfológicas 1:10000.

3.2 Objetivo 2.

Para el objetivo 2 “Determinar y calcular parámetros geomorfológicos y morfométricos de la cuenca que provee el embalse del parque Natural la Nitrera.”. Con la intención de caracterizar la cuenca hídrica, que está definida como un área topográfica drenada que posee influencia de los controles estructurales y litológicos. Dentro de los índices geomorfológicos escogidos están el área, longitud de la cuenca y su perímetro, pendiente promedio de la cuenca, curva hipsométrica, histograma de frecuencias altimétricas, altura y elevación promedio, densidad de drenaje, perfil y pendiente promedio del cauce principal, además de índices de forma de la cuenca y tiempo de concentración (Villaruel, 2013); en el marco teórico de este documento se describe la importancia de cada uno de los índices escogidos.

Los índices geomorfológicos reportados en la Tabla 2 marcaron la pauta del estudio base; debido a la falta de información estructural detallada de la cuenca se necesitó conocer la dirección de la deformación y el efecto de las estructuras que intervienen en el drenaje; en este punto se procedió a realizar un análisis de relación estructural (alineamientos, estratos, contactos, lineamientos entre otros). Para poder hacer este análisis se recopiló toda la información de la empresa encargada de la construcción del embalse, aunque no existía un amplio reconocimiento geológico si aportó indicaciones básicas para el posterior análisis. Aparte de esta recolección de información se procedió a un trabajo de campo.

Tabla 3 Índices geomorfológicos.

Fuente: Elaboración Propia

Índice
Área (km ²)
Longitud de la cuenca (m)
Longitud cauce principal (m)
Elevación media (msnm)
Elevación en la bocatoma del embalse, (msnm)
Elevación máxima (msnm.)
Diferencia de alturas Δh
Precipitación media (mm/año)
Pendiente media del cauce
Tiempo de concentración (s)

Para la evaluación de estos índices se hizo una comparación y correlación de trabajo de campo con ayuda de SIG, además de datos reportados por la CAR encargada del parque natural. Para el parámetro de tiempo de concentración que fue un parámetro escogido sobre la marcha del trabajo de investigación, se escogieron 3 metodologías que fueron las expuestas en el marco teórico para tener una forma de comparación.

Para la identificación de las unidades y formaciones superficiales se hizo una recopilación de información de distintas fuentes como se detalla a continuación:

- Unidades litológicas, haciendo referencia a las unidades de roca que estaban cartografiadas de manera regional en la zona. Recopilando información del tipo de roca encontrada.
- Estructuras presentes en mapas de la región, haciendo referencia a las estructuras regionales que pueden tener incidencia sobre la zona.
- Identificación de posibles depósitos de minerales o que son de aprovechamiento.
- Ubicación de principales unidades que hayan tenido influencia en el relieve del terreno.
- Trabajo de campo, ubicación espacial de la información recolectada en la bibliografía Reconociendo cada característica a partir de las estaciones marcadas en campo.
- De acuerdo con la información recopilada en campo, junto con los distintos análisis de mapas, fotointerpretación y procesamiento de imágenes se identificaron las estructuras y formaciones de mayor importante.

En la *Figura 16* está la localización del embalse dentro del parque Natural y se da la ubicación de las quebradas afluentes.

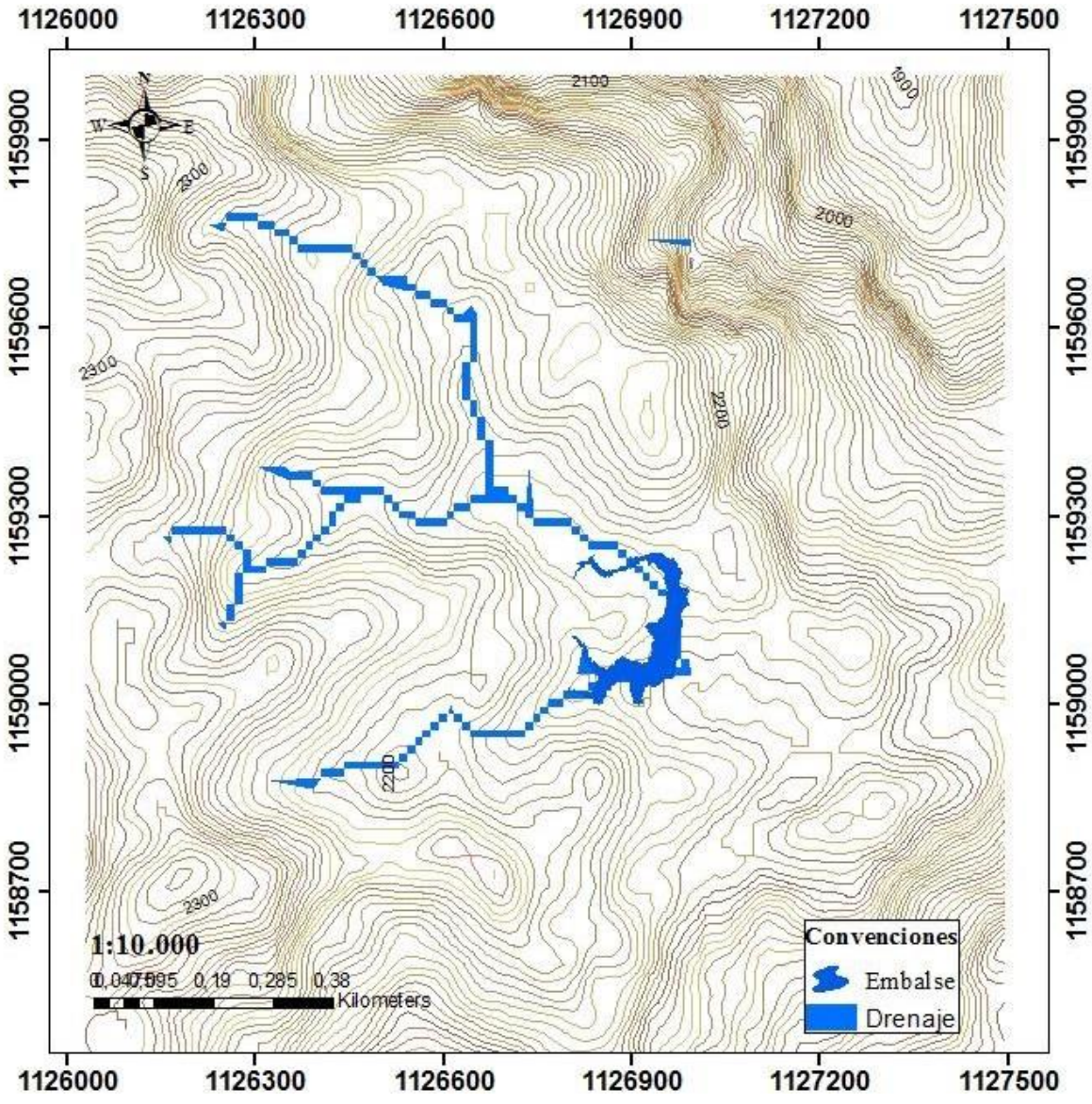


Figura 16 Zona de Estudio

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3 se reportan las actividades escogidas para desarrollar las actividades del Objetivo 2

Tabla 4 Actividades Objetivo 2.

Fuente: Elaboración Propia

Objetivo	Actividades
	Identificar formaciones y estructuras superficiales.
	Identificar subunidades y elementos geomorfológicos
	Escoger los índices geomorfológicos más convenientes.

Determinar y calcular parámetros geomorfológicos y morfométricos de la cuenca que provee el embalse del parque Natural la Nitrera.	Identificar las unidades geomorfológicas
	Calculo de índices geomorfológicos.
	Identificar las alteraciones morfométricas.
	Determinar la respuesta hidrológica de las cuencas.
	Analizar la relación entre índices geomorfológicos.
	Elaborar mapas de representación de estructuras, y morfometría de la cuenca.

3.3 Objetivo 3.

Con el fin de desarrollar el objetivo 3 “Medir las propiedades físicas y químicas del suelo de la cuenca y el embalse usando el marco normativo para Colombia del Parque Natural la Nitrera.”. Para el levantamiento del suelo y la identificación se procedió a utilizar la metodología general propuesta por la USDA, que está dividida en 4 principales tópicos que son:

1. Describir las características de un suelo del área cercana a cuencas y puntos referenciados del parque (*Figura 17*).
2. Clasificar las zonas del suelo de acuerdo con un sistema estándar de clasificación Deere y Patton (Tabla 1)
3. Plotear los límites de los suelos en el mapa.
4. Concluir acerca del comportamiento de los suelos.

En este ítem se tuvo como punto de partida el análisis en laboratorio de las diferentes propiedades físicas y químicas

Las propiedades medidas sobre las muestras de suelo fueron: pH, porcentaje de materia orgánica (colorimetría), granulometría, límites líquido y plástico, y compresión en muestra inconfiada. Fueron escogidas por el interés específico de lo que concierne a la calidad del suelo respecto a la saturación máxima por agua y en la estabilidad del mismo para la gestión del embalse. Los puntos referenciados del parque que son las mismas zonas donde se tomaron las muestras y fueron en algunos casos puntos para el levantamiento de perfiles, se muestran a continuación en la *Figura 17*. En estos puntos referenciados se tomaron las muestras usadas para el trabajo de campo y se escogieron las zonas para los perfiles.

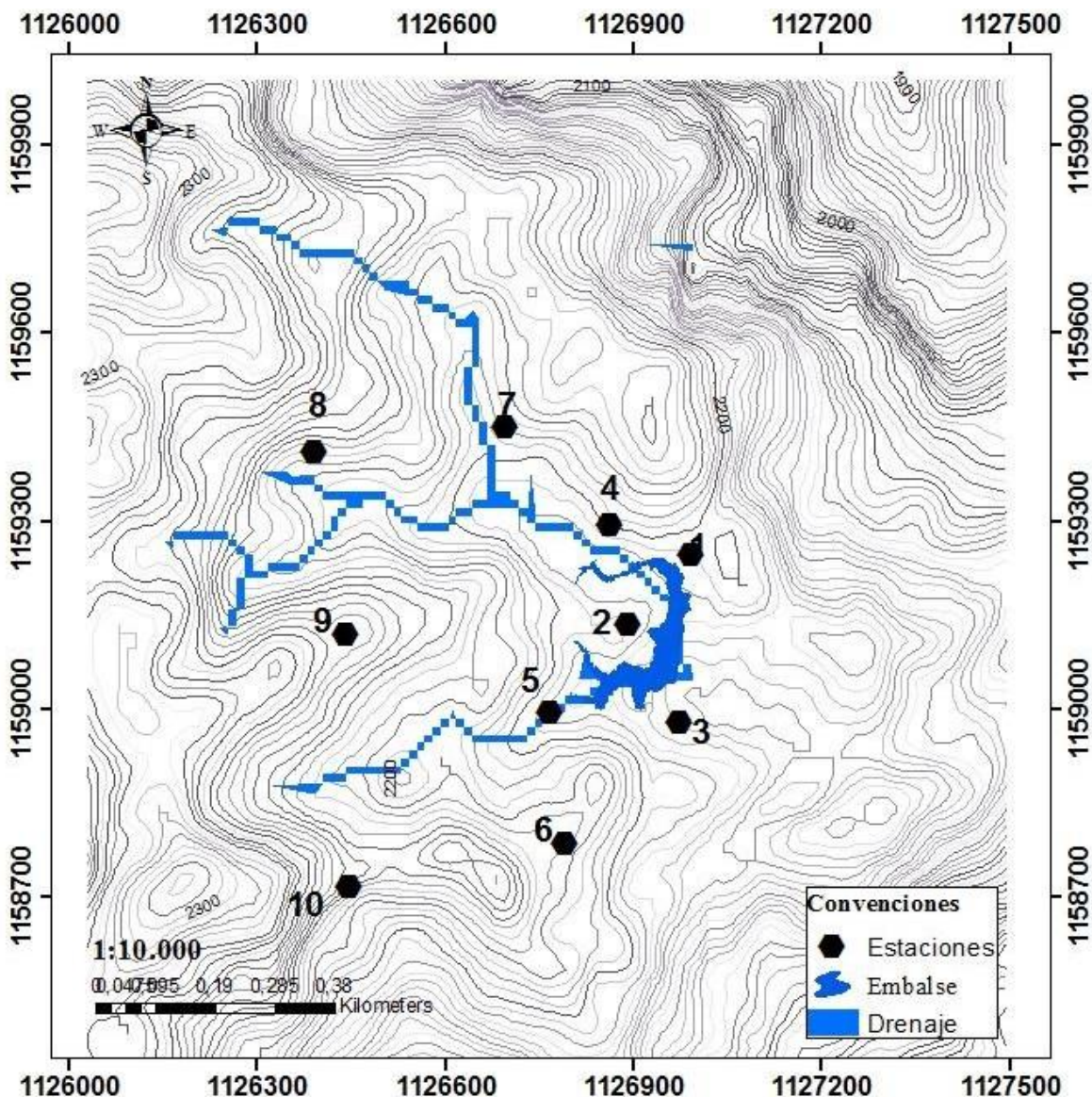


Figura 17 Mapa Estaciones de muestreo.

Fuente: Elaboración Propia

Para la evaluación de estas propiedades se tuvo en cuenta el marco normativo para Colombia propuesto por INVIAS e ICONTEC (ICONTEC, 2006). En la tabla 5 se hace un resumen de cada una de las normas que fueron utilizados como marco principal normativo, se presenta el nombre de la prueba, la norma que rige la descripción básica y la referencia de donde fue extraída. El uso de la norma NTC 1504 fue tomada como primer marco, pero para ciertas clasificaciones se recurrió a la norma ASTM D2487, que está comprendida como un equivalente para la clasificación del suelo.

Tabla 5 Normas aplicadas en pruebas de laboratorio

Fuente: Elaboración Propia

Prueba	Norma	Descripción	Referencia
Limite plástico	INVIAS 126	Contenido más bajo de agua	(I.N.V.E–126, 2007)
Limite Líquido	INVIAS 125	Contenido de agua expresado en porcentaje	(I.N.V.E–125, 2013)
Granulometría	INVIAS 123	Determinación del tamaño cuantitativo del grano	(I.N.V.E–123, 2013)
Colorimetría	INVIAS 121	Método de la determinación del contenido orgánico	(Invias, 2007)
Humedad	INVIAS 122	Evaluación del contenido de Agua.	(INVE 122-07 (NTC 1495), 2007)
Compresión Inconfinada	INVIAS 152-13	Fuerza sobre suelo cohesivo.	(I.N.V.E, 2008)
Determinación del PH	NTC 5264	Determinación de Acidez activa	(ICONTEC, 2008)
Sistema de clasificación suelo	NTC 1504	Clasificación mineral y orgánica de suelo	(ICONTEC, 2006)

Para cada una de las propiedades medidas se procedió a tomar los resultados y evaluarlas. A continuación, se detalla las pautas principales de cada una de las pruebas elegidas que se enunciaron en la tabla 5.

Para la colorimetría como lo indica la norma INVIAS 121, se describe el procedimiento para determinar de manera aproximada la presencia de materia orgánica. El procedimiento emplea una solución de color de referencia y el uso de vidrios de colores de referencia. Para la solución de color de referencia – se disuelve bicromato de potasio ($K_2 Cr_2 O_7$) en ácido sulfúrico concentrado (peso unitario de 1.84 g/cm^3), en la relación de 0.250 g de bicromato de potasio por cada 100 ml de ácido, empleando calor, si fuere necesario, para efectuar la solución. Una vez obtenida la solución se procede a aplicar la solución sobre la muestra (al menos 100 gr) y dejando actuar la solución por 48 h, al término de este tiempo se realiza la comparación con la tabla colorimétrica cuyos valores se encuentran reportados en la tabla 5.

Tabla 6 Escala de vidrios de color normalizado (Invias, 2007)

Color estándar Gardner N°	Placa orgánica N °
5	1
8	2
11	3
14	4
16	5

La prueba de granulometría se desarrolló bajo la norma INVIAS 123 para la clasificación del tamaño de partícula bajo la clasificación de tamaño de grano de Wentworth (Anexo 1. *Tabla 7*).

Además de la clasificación del tamaño de grano por medio de las gráficas de granulometría para las muestras tomadas (*Anexo 1*), se evaluaron otros parámetros como índice de clasificación y simetría, debido a la facilidad que ofrecen las gráficas para hacer la evaluación de percentiles. Dentro de la muestra evaluada para la clasificación de estos parámetros se siguió la clasificación hecha por (Spalletti, 2001) y en las Tablas 7 y 8 a continuación se reporta los rangos y la descripción a la que pertenecen.

$$\square = \frac{\square_{84} - \square_{16}}{4} + \frac{\square_{95} - \square_5}{6.6}$$

Ecuación 12 Índice de Clasificación

Tabla 7 Índice de Clasificación

Tomado (Spalletti, 2001)

Límites de Clase (\square)	Índice de clasificación
<0.35	Muy Bien clasificado
0.35-0.50	Bien clasificado
0.50-0.70	Moderadamente Bien clasificado
0.70-1.00	Moderadamente clasificado
1.00-2.00	Mal clasificado
2.00-4.00	Muy Mal clasificado
> 4.00	Extremadamente Mal clasificado

Tabla 8 Índice de Asimetría

Tomado (Spalletti, 2001)

Límites de Clase ($\square \square \square$)	Índice de asimetría
1.00-0.30	Muy asimétrico hacia las partículas finas
0.30-0.10	Asimétrico hacia las partículas finas
0.10- (-0.10)	Simétrico
(-0.10) – (-0.30)	Asimétrico hacia las partículas gruesas
(-0.30) – (-1.00)	Muy asimétrico hacia las partículas gruesas

Para la clasificación de suelo como lo indica la norma NTC 1504, se recurrió al uso de la clasificación para suelos UCSC (Astm & International, 2006) dicha clasificación se reporta en la Tabla 9.

Tabla9 Clasificación Unificada del Suelo

Tomada de (Astm & International, 2006)

Unified Soil Classification (ASTM D-2487-98)					
Material types	Criteria for assigning soil group names			Group Symbol	Soil group names & legend
Course-Grained Soils > 50% retained on No. 200 sieve	Gravels >50% of course fraction retained on No 4.Sieve	Clean Gravels <5% Fines	Cu \geq 4 and 1 \leq Cc \leq 3	GW	Well-graded gravels and gravel
			Cu \geq 4 and/or 1 \geq Cc \geq 3	GP	Poorly graded gravel
		Gravels with Fines <12% Fines	Fines classify as ML or CL	GM	Silty gravel
			Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel
	Sands >50% of course fraction passes on No. 4.Sieve	Clean Sands <5% Fines	Cu \geq 6 and 1 \leq Cc \leq 3	SW	Well-graded sand
			Cu \geq 6 and 1 \geq Cc \geq 3	SP	Poorly graded sand
		Sands and Fines >12% Fines	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand
			Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand
Fine-Grained Soils > 50% passes No. 200 sieve	Silts and Clays Liquid Limit <50	Inorganic	PI>7 and Plots>"A" Line	CL	Lean clay
			PI>4 and Plots>"A" Line	ML	silt
		Organic	LL (oven dried) LL (not dried)<0.75	OL	Organic clay or silt

	Sils and Clays Liquid Limit >50	Inorganic	PI Plots < "A" Line	CH	Fat clays
			PI Plots > "A" Line	MH	elastic silts
		Organic	LL (oven dried) LL (not dried) < 0.75	OH	Organic clay Or silt
Highly Organic Soils		Primarily organic matter dark in color, and organic odor		PT	Peat

Para el uso adecuado de la Tabla 8 se debe hacer el cálculo del coeficiente de curvatura y de Uniformidad (*Ecuaciones*).

$$C_u = \frac{(d_{60})^2}{(d_{10} * d_{30})}$$

Ecuación 13 Coeficiente de curvatura

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Ecuación 14 Coeficiente de Uniformidad

Esta clasificación es netamente cualitativa, y está basada en las curvas de distribución granulométrica evaluando los porcentajes acumulados y son otra forma de corroborar grado de selección en las muestras.

La normativa que se usó en las pruebas de límites fue INVIAS 125 para el limite liquido e INVIAS 126 para el limite plástico, se hizo una recolección de información con trabajo de laboratorio para conocer la cantidad de golpes en la cuchara Casagrande y el contenido de humedad, con estos datos se procedió a llevar a cabo un trabajo en la hoja de cálculo (*Anexo 2*) para determinar el Índice de plasticidad, contenido húmedo y los límites de Atterberg. La grafica que se encuentra en la *Figura 18* fue utilizada para clasificar la plasticidad del suelo de la zona.

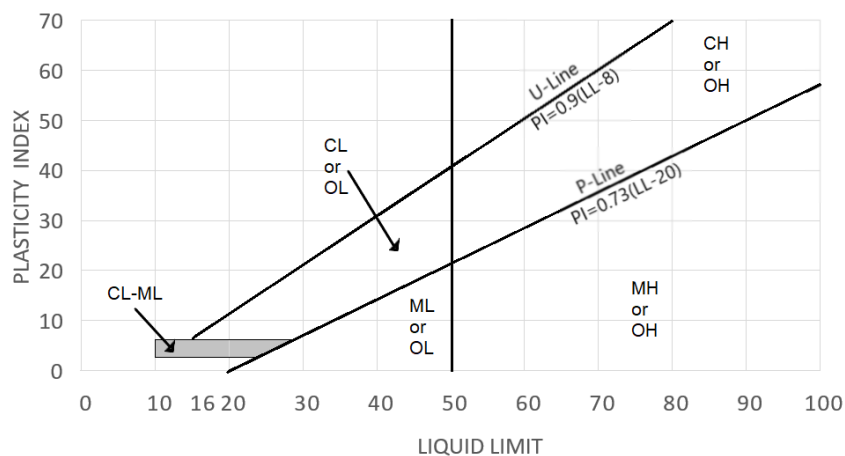


Figura 18 Grafica de Índice de Plasticidad

Tomada De (Braja M, 2010)

Además de esta grafica se tienen los límites de clasificación para el resultado del índice de plasticidad reportados en la Tabla 10

Tabla 10 Clasificación índice de plasticidad
(Astm & International, 2006)

Categoría	Suelo	IP	Grado de plasticidad
I	Arena o limo *trazas de arcilla *poca arcilla	0-1	No plástico
		1-5	Ligera plasticidad
		5-10	Baja plasticidad
II	Franco arcilloso	10-20	Mediana plasticidad
III	Arcilloso limoso Arcilla	20-35	Alta plasticidad
		>35	Muy alta plasticidad

Otra de las clasificaciones que se determinó con los límites es el grado de consistencia (K_w). La ecuación 15 es la forma de calcularlo y en la Tabla 11 se reportan los límites de clasificación.

$$K_w = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \%$$

Ecuación 15 Grado de consistencia
(Astm & International, 2006)

Tabla 11 Grado de consistencia.
(Astm & International, 2006)

Clasificación	Descripción
$K_w < 0$	Consistencia líquida
$0 < K_w < 0.50$	Consistencia viscosa
$0.50 < K_w < 0.75$	Consistencia suave
$0.75 < K_w < 1$	Consistencia plástica
$K_w > 1+$	Consistencia media dura , dura sólida

La prueba de compresión se desarrolló bajo la norma INVIAS 152 el objeto de esta norma es indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remodeladas, aplicando carga axial. En la Tabla 12 se reportan los límites de clasificación de compresión inconfiada.

Tabla 12 Límites de clasificación de compresión inconfiada
(I.N.V.E, 2008)

Consistencia del Suelo	Resistencia a la Compresión Inconfiada	
	Kg/cm ²	KPa
Muy blanda	<0.25	<25
Blanda	0.25-0.50	25-50
Mediana	0.50-1	50-100
Firme	1.00-2.00	100-200
Muy firme	2.00-4.00	200-400
Dura	>4.00	> 400

A continuación en la tabla 13 se enumeran las actividades propuestas para el desarrollo de este objetivo. Para el desarrollo de la actividad de medida de las propiedades físicas del suelo se utilizó el marco de referencia enunciado en la tabla 12

Tabla13 Actividades Objetivo 3

Elaboración Propia

Objetivo	Actividades
Medir las propiedades físicas y químicas del suelo de la cuenca y el embalse usando el marco normativo para Colombia del Parque Natural la Nitrera.	Visita de campo: Selección 10 estaciones para muestreo sobre toda la zona del parque.
	Recolectar muestras de suelo y caracterizarlas (30 muestras)
	Levantamiento de muestras de suelo en zonas referenciadas
	Describir las características principales
	Pruebas de laboratorio con las muestras de suelo (Disponibles en laboratorio UDEA)
	Elaborar gráficas con los resultados de parámetros físicos del suelo.
Elaborar mapas con los resultados de parámetros físicos del suelo	

3.4 Objetivo 4.

Para el desarrollo del objetivo “Identificar las principales características del suelo del Parque Natural la Nitrera.” Por falta de documentación sobre la zona y la dificultad para encontrar zonas libres de vegetación y por el carácter ecológico del Parque Natural la Nitrera no se pueden realizar modificaciones extensas en el paisaje se recurrió a una integración de varias metodologías propuestas utilizando imágenes de cobertura y trabajo de campo con fotografías, muestras y toma de parcelas en las zonas descubiertas de vegetación de la zona para evaluar. Por encontrarse la zona de estudio en una región tropical altamente meteorizada se hizo uso de la metodología de (Deere & Patton, 1971) ya antes mencionada, que define 3 zonas que a su vez poseen horizontes (Tabla1)

A continuación, en la tabla 14 se enumeran las actividades relacionadas con el desarrollo del objetivo.

Tabla 14 Actividades Objetivo 4.

Objetivo	Actividades
Identificar las principales características del suelo del Parque Natural la Nitrera .	Recopilar fotos aéreas u ortofotos y mapas existentes.
	Recopilar información bibliográfica .
	Describir las coberturas presentes.
	Identificar coberturas presentes en el área de estudio
	Determinar la disposición de perfiles de suelo.
	Identificar zonas de mayor presencia de saprolito.
	Elaborar representación mapa de relación de saprolito y altas pendientes.

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo IV: Área de Estudio

La subregión Suroeste limita por el Norte con la subregión occidental, por el Sur con los departamentos de Risaralda y Caldas, al Occidente con el departamento del Chocó y la subregión del Urabá, y al Este con la subregión del Oriente y el sur del Valle de Aburrá. Tiene una extensión territorial de 6,513 km², el 10.4 % del área total del departamento, lo que ubica a esta subregión como la tercera más pequeña pese a ser la que más municipios registra. Su jurisdicción comprende los municipios de Amagá, Andes, Angelópolis, Betania, Betulia, Caicedo, Caramanta, Ciudad Bolívar, Concordia (*figura 19*), Fredonia, Hispania, Jardín, Jericó, La Pintada, Montebello, Pueblo Rico, Salgar, Santa Bárbara, Támesis, Tarso, Titiribí, Urrao, Valparaíso y Venecia (Camara de Comercio de Medellín para Antioquia, 2015).

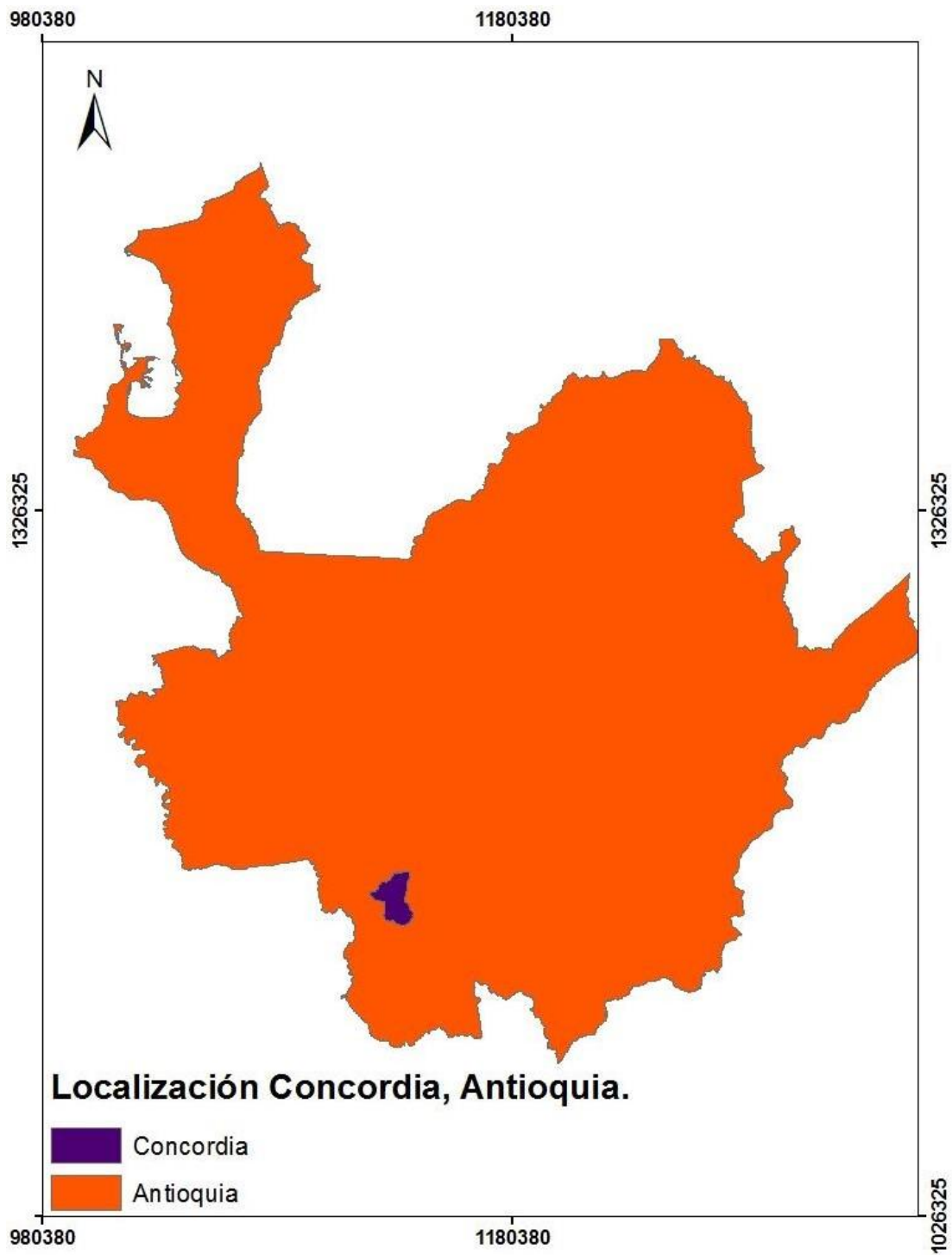


Figura 19 Localización Concordia

Elaboración Propia, A partir de Shapes Gobernación de Antioquia.

Concordia está localizado entre las coordenadas 1118800 – 1138000 E y 1161000 – 117300 N (*Magna Oeste Colombia*), limita por el norte con el municipio de Betulia, por el oriente con los municipios de Armenia, Titiribí y Venecia, por el sur con Salgar y Venecia y por el occidente con Salgar. Su cabecera dista 95 km, por vía pavimentada, de la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia. El municipio posee una extensión de 234 Km², y una altura sobre el nivel del mar de 2200m en la cabecera municipal, está localizado en la parte alta de la cordillera occidental a 2,000 m.s.n.m. (Alcaldía de Concordia, 2015). La población está estimada 21,420 habitantes. de los cuales 8,150 hab. están en la cabecera municipal y 13,270 se encuentran en la zona rural (Gobernación de Antioquia, 2015). En la *figura 20* se observa la panorámica de la cabecera municipal del municipio de Concordia.

Para garantizar el abastecimiento de agua en la cabecera del municipio de Concordia, se realizaron varios estudios (1970, 1981 y 1983) donde básicamente se analizaron dos alternativas, una era bombeo de las aguas de la quebrada Magallo hacia un tanque de almacenamiento para luego tratarla y distribuirla, y la otra era la captación de las aguas de la quebrada Santa Mónica aprovechando el sistema existente en esa época, el cual consistía de un dique-toma en el sitio donde hoy es el embalse, una conducción hasta el desarenador y luego a la planta de tratamiento (Ortega, 2002).



Figura 20 Panorámica cabecera municipal Concordia.

Mejía.C. (Fotógrafo) 2009 Concordia, Antioquia (Fotografía) Recuperado [<https://www.panoramio.com/photo/18765667>].

La alternativa adoptada fue la conducción por gravedad de las aguas de la quebrada Santa Mónica, según los diseños realizados por la firma Integral en 1986, que incluyen una presa de regulación de material homogéneo, con una altura de 14.5 m sobre el antiguo lecho de la quebrada Santa Mónica y construida con el material proveniente de las excavaciones del vertedero; el vertedero de excesos de 6 m de ancho, construido en concreto, en un extremo de la presa; una torre de captación de 12 m de altura, ubicada aguas arriba del terraplén y de

la cual se desprende la tubería de desagüe que atraviesa la presa. El embalse de regulación, con una capacidad inicial de 76,850 m³, se encuentra localizado a unos tres kilómetros al Suroeste de la cabecera municipal, aguas abajo de la confluencia de las quebradas Santa Mónica y la Nitrera aproximadamente en la cota 2100. En la *Figura 21* se ve el estado inicial de los terrenos destinados para la construcción del embalse.



Figura 21 Estado inicial embalse.

Tomada de Uribe .R 1985 Recuperada [Parque ecológico la nitrera (Uribe, 1996)]

La zona de estudio está localizada sobre la vertiente oriental de la cordillera occidental y se caracteriza por un relieve quebrado con laderas de hasta 30° de inclinación con gran longitud (Hasta 1 Km), con drenajes de alta pendiente y caudales promedios bajos; por esta razón (Cárdenas & Restrepo, 2010), la empresa de acueducto de Concordia tiene muy pocas posibilidades de utilizar otras corrientes naturales para ampliar la disponibilidad de agua y poder atender mayor cantidad de habitantes. La quebrada Santa Mónica aporta al embalse, en promedio, un caudal de 34 L/s. Para tener una idea de la visual del Parque Natural la Nitrera en la *Figura 22 A* es la imagen tomada desde el frente del embalse y se puede ver la torre de captación, en la parte B de la figura es una toma con Dron desde la parte Sureste.

Para tener una idea básica de la geología presente en el municipio de Concordia, Antioquia se presenta la *Figura 23*, donde se presentan las formaciones, las fallas y los contactos presentes en la zona y que tienen en algunos casos como la falla Mistrató tiene un efecto directo sobre el Parque Natural

A



B



Figura 22 Visión actual embalse.

A .Plano frontal embalse. Fuente Propia .Tomada Abril 2016.

B. Toma Superior Este del embalse con dron.

Fuente Propia Tomada Marzo2017

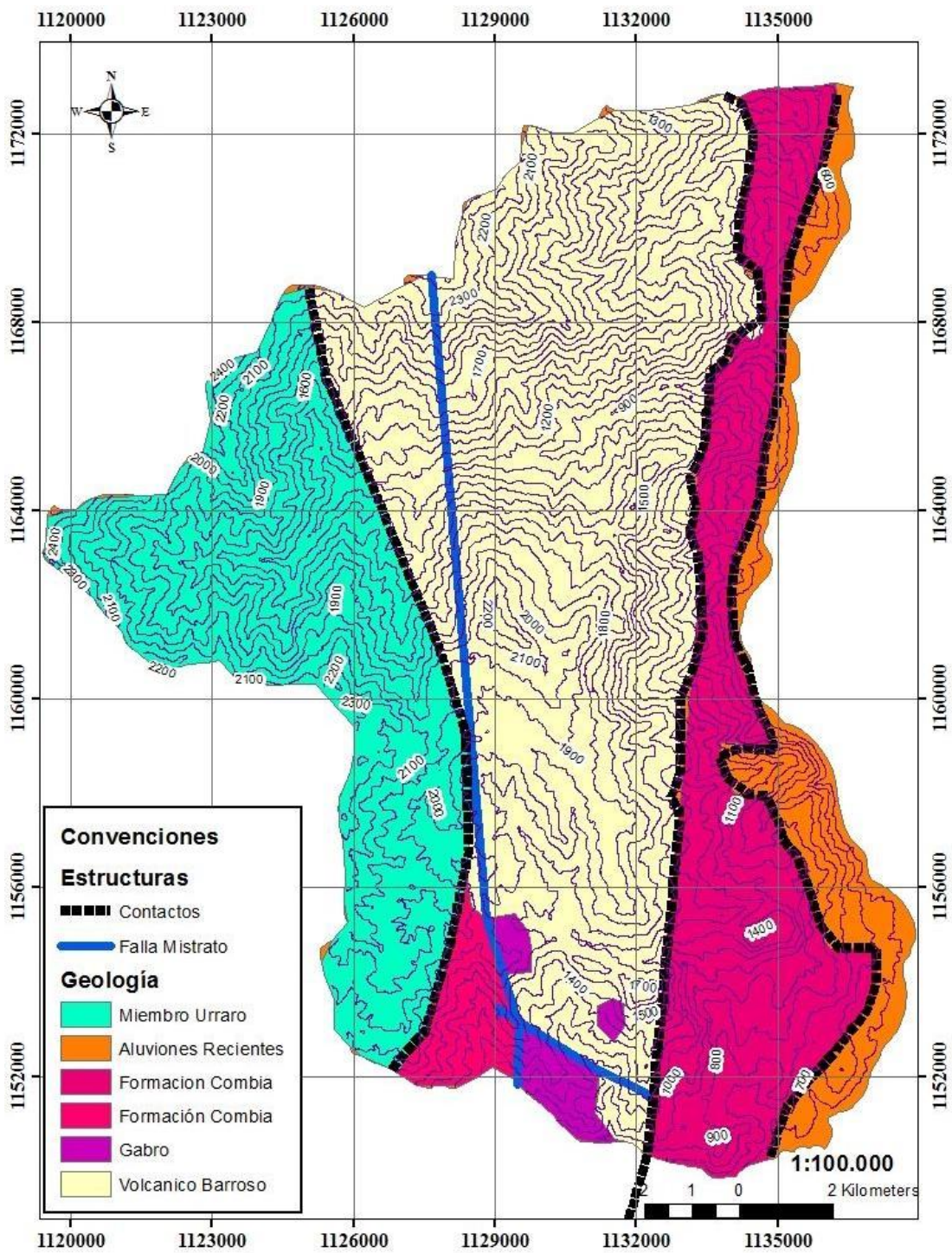


Figura 23 Mapa Geología Concordia

Fuente Propia. A partir de archivo vector de Municipios del Suroeste. (CORANTIOQUIA, 2012)

Capítulo V: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del trabajo en campo y en laboratorio que se realizaron para cumplir cada uno de los objetivos propuestos; en la primera parte se presenta una conceptualización del trabajo de la identificación de estructuras a nivel geológico, presentando las formaciones que dominan la zona y su composición a nivel de roca. Del mismo modo se presenta la climatología regional mediante la representación de la variable precipitación para tener un panorama completo sobre el parque Natural La Nitrera. En los dos siguientes ítems se hace énfasis en las características geomorfológicas y morfométricas de la zona, presentando las principales unidades geomorfológicas presentes y evaluando algunos parámetros por medio de cálculos reportados en la metodología y representando por medio de mapas los resultados más relevantes de la zona. Por último, se presentan los resultados de las características elegidas para la evaluación de la composición y caracterización de las propiedades del suelo presente en la cuenca del embalse.

5.1 Geología Regional

La revisión geológica fue realizada sobre los senderos que tiene el parque natural enfocándose en las estructuras que dominan los lineamientos identificados con las imágenes satelitales, evaluando no solo su composición rocosa sino también su orientación y poder tener así un compilado de trabajo de campo y ser complementado con la literatura disponible de la zona.

La zona media y cercana al embalse se reconoce una roca sedimentaria perteneciente al Miembro Urrao de la formación Penderisco del cretáceo y depósitos no consolidados o poco consolidados del Cuaternario. Las areniscas del Miembro Urrao conforman la mayor parte del porcentaje de los materiales sedimentarios con estratos de espesores variables (10 cm – 1 m) y localmente con delgadas intercalaciones de lutitas, con estructuras sedimentarias como estratificación; laminación paralela y gradación granodecreciente con ocasionales marcas de oleaje, en general se diferencian areniscas margosas, litoarenitas y areniscas conglomeráticas muy pobres en fósiles y mal preservados (Mora, 2011). Las lutitas es la litología predominante en el Miembro Urrao después de las areniscas, las cuales priman hacia el techo de la unidad; las lutitas son de color gris oscuro a negro y presentan laminación fina en estratos delgados y ondulaciones, con abundante materia orgánica y matriz o cemento sílice-arcilla. Los conglomerados del Miembro Urrao se componen de cantos de rocas sedimentarias detríticas además de rocas volcánicas básicas, rocas piroclásticas cuarzos, diabasas y chert, con matriz arenosa-calcárea (ANH-Universidad EAFIT, 2007). En la *figura 24* se presenta la visual de la cuenca Santa Mónica, el frente del embalse y la Nitrera respectivamente.



Figura 24 Vista del Embalse y las cuencas

Elaboración Propia. Tomada abril 2016

En la mayor parte del embalse, al igual que en la mayor parte de la cuenca de las quebradas las rocas se encuentran de moderada a intensamente meteorizadas, dando lugar a la formación de suelos residuales arcillo-arenosos. Por debajo de la zona de intensa meteorización la roca se presenta muy fracturada, las fracturas aparecen abiertas en las proximidades a superficie. En áreas relativamente pequeñas las variaciones de las rocas se tornan evidentes por la meteorización y erosión. Afloramientos de roca meteorizada se pueden observar en los tramos donde se presentan reducción y allí la dirección de los estratos sedimentarios son bastante difíciles de determinar. En el sitio para la fundación del embalse las rocas han desarrollado un perfil de meteorización, compuesto por una capa de suelo residual en su parte superior, conformada por arcilla, limo y arena de color rojizo- amarillo y vetas de material oscuro.

En los valles de las quebradas Santa Mónica y La Nitrera se encuentran los depósitos no consolidados. En la parte superior del embalse se encuentra una amplia zona aluvial; aguas abajo en la parte superior y media de la quebrada Santa Mónica se encuentran aluviones de menor extensión. Existen unos depósitos coluviales arcillosos someros que están en lugares relativamente cercanos al cauce, su conformación es variable desde bloques aislados de gran tamaño hasta fragmentos de roca en una matriz fina que al meteorizarse desarrolla suelos arcillo-arenosos. Debido a la abundancia de materiales arcillosos los suelos no tienen buena capacidad de infiltración y por lo tanto la respuesta de la cuenca es relativamente lenta (Herrera & Toro, 2000).

A 15 Km al oeste de la zona del embalse se localiza la traza de la falla Cauca Oeste, del sistema Cauca Romeral (ANH, 2010). Dentro del trabajo de campo sobre el embalse y los senderos del parque no se evidencian rasgos de fallas, por tanto, se recurrió al uso de fotografías aéreas y ortofomosaico y se alcanzan unos lineamientos que reflejan planos de

estratificación y leves trazas de la falla Mistrató. Se encuentran unas secuencias sedimentarias que fueron de interés porque son de las pocas zonas escarpadas y por ende se tomaron estructuras que presenta la estratificación con rumbo N20W - N45W, para las formaciones afectadas por la traza se encuentran en dirección S-E.

5.2 Climatología Regional

El parque natural La Nitrera está localizado entre las cotas 2050 -2250 m.s.n.m., el clima es frío con temperatura promedio de 17°C (Alcaldía de Concordia, 2015). Presenta una temporada de tiempo seco entre los meses de diciembre a marzo y una temporada de lluvias de mayo a agosto. El municipio cuenta con 3 estaciones del IDEAM una pluviométrica, una limnimétrica y una de Climatología Ordinaria a 1904 m.s.n.m. llamada Concordia (IDEAM, 2016), que fue la escogida para el reporte en este documento porque es la más cercana a la altitud donde se encuentra el embalse y representa de forma más precisa los reportes de precipitación diarios sobre la zona; la humedad promedia es del 68% y la velocidad promedio del viento es de 8 km/h. La precipitación anual es de 2452 mm y aproximadamente se presentaron 215 días de lluvia para el año 2016 (IDEAM., 2017a).

El periodo reportado desde el año 2010 hasta el 2017, los periodos de precipitación son bimodales donde se puede notar que los meses de diciembre y enero presentan unas bajas de precipitación y se extiende el periodo seco hasta abril. En el año 2010 se evidencio una baja en la precipitación que se prolongó hasta el mes de mayo, lo cual se repitió para el mes de agosto. Para el año 2011 se presenta un comienzo de año con un abrupto aumento en la precipitación con un pico para el mes de abril, a pesar de este evento es de notar que la tendencia bimodal se mantiene. En lo concerniente con el último periodo de 2012 hasta enero de 2013 se presenta una sequía bastante marcada, para el mes de febrero se presenta un repunte en la precipitación al igual que en el mes de agosto. Lo antes mencionado se presenta en las figuras 25 y 26.

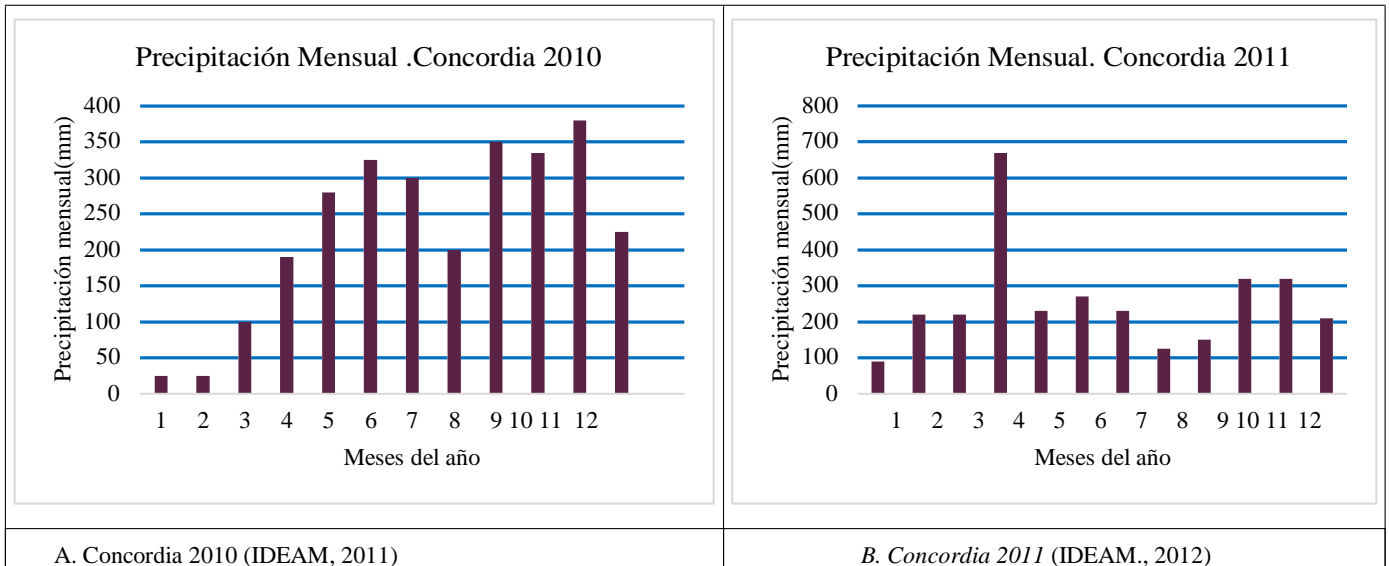


Figura 26 Precipitación 2010 y 2011.

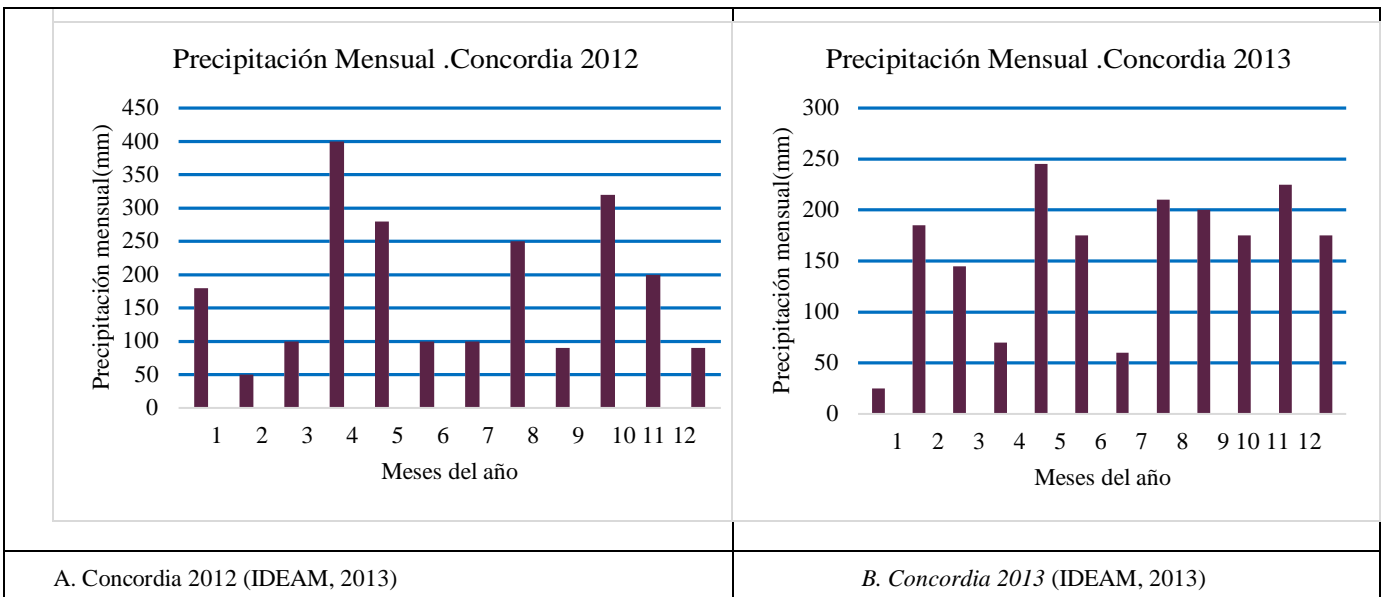


Figura 25 Precipitación mensual 2012 y 2013

Para el primer bimestre de 2016 se ve un descenso extremo en la precipitación que llevo al embalse a tener menos del 50 % de su capacidad. La variable climática precipitación fue escogida para poder tener un parámetro para corroborar los resultados de algunos índices geomorfológicos como el tiempo de concentración en la cuenca y la densidad del drenaje. En las figuras 27 y 28 tienen el reporte de la precipitación mensual entre los años 2014 hasta el primer semestre del 2017.

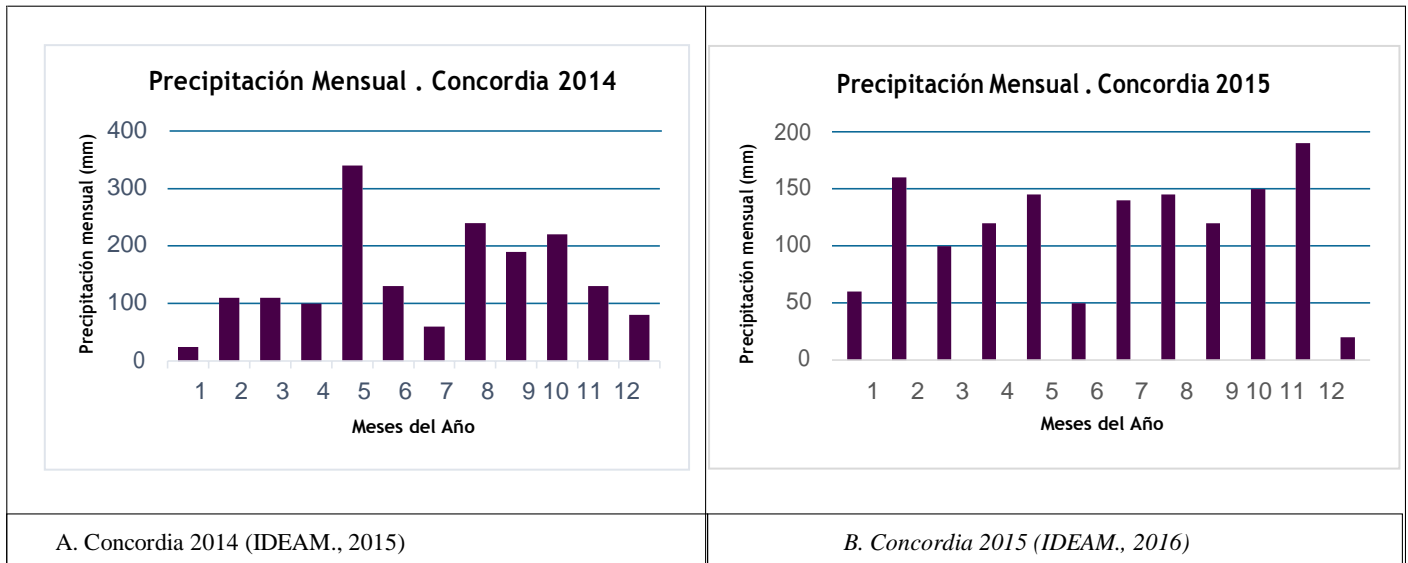


Figura 27 Precipitación Mensual.

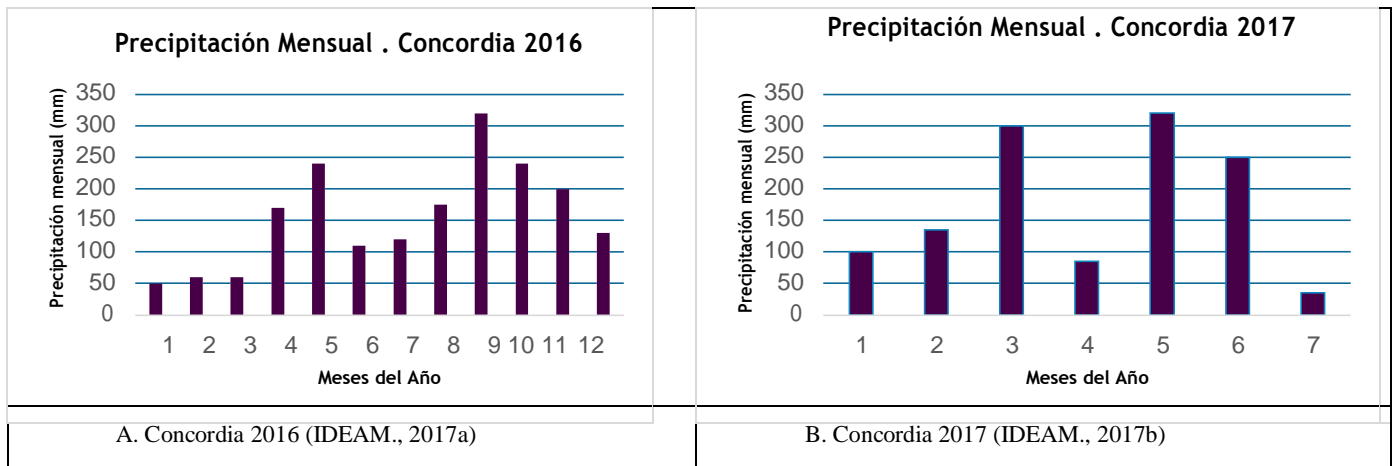


Figura 28 Precipitación Mensual

5.3 Geomorfología

La identificación de las unidades geomorfológicas, partió del conocimiento de estructuras encontradas en la identificación y también como punto base para la identificación de la morfometría de las cuencas, puesto que con el conocimiento de la geomorfología se escogieron algunos parámetros geomorfológicos, que se consideraron de interés para una mejor descripción de la zona.

Dentro de la revisión bibliográfica acerca de las unidades geomorfológicas del municipio de Concordia se encontraron cuatro principales como lo describe Corantioquia, pero en lo que concierne a esta investigación se enfocó la revisión sobre la unidad Las Ánimas que afecta al Parque Natural La Nitrera.

5.3.1 Características hidrogeológicas, estructurales y geomorfológicas

La caracterización de las unidades geomorfológicas del parque llevaron al análisis regional para tener una pauta por ser un espacio tan pequeño a nivel cartográfico La Unidad Geomorfológica Las Ánimas ,descrita por Herrera & Toro, 2000, comprende la zona centro occidental del municipio de Concordia, incluyendo el casco urbano y la cuenca tributaria al embalse La Nitrera. La red de drenaje en esta unidad geomorfológica es dendrítica y a ella pertenece la quebrada Magallo (la quebrada Santa Mónica aporta sus aguas a esta), Las pendientes predominantes están entre 0° y 35° clasificadas como de bajas a moderadamente altas, y en menor proporción se encuentran pendientes de altas a muy altas.

En la cuenca del embalse Santa Monica se observaron pendientes moderadas con filos cortos, mientras que en la cuenca de la quebrada la Nitrera las pendientes son más pronunciadas y rectas debido a la presencia de la traza de la falla Mistrató. Basados en esto, en el Parque Natural se encuentran tres tipos de unidades geomorfológicas (*Figura 30*); para la margen de la Santa Mónica se tienen filos cortos para la parte media, mientras que filos con flancos de topes planos para la vertiente de la Nitrera, que por tener pendientes más pronunciadas presenta filos con flancos de fuerte inclinación. En la *figura 29* se puede observar los filos que se mencionan anteriormente.

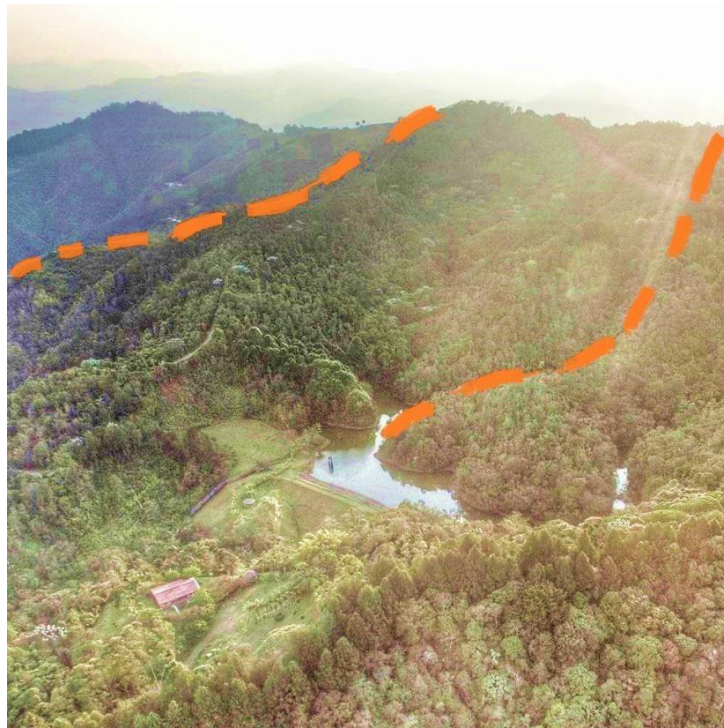


Figura 29 Unidades geomorfológicas
Fuente Propia Tomada Marzo2017

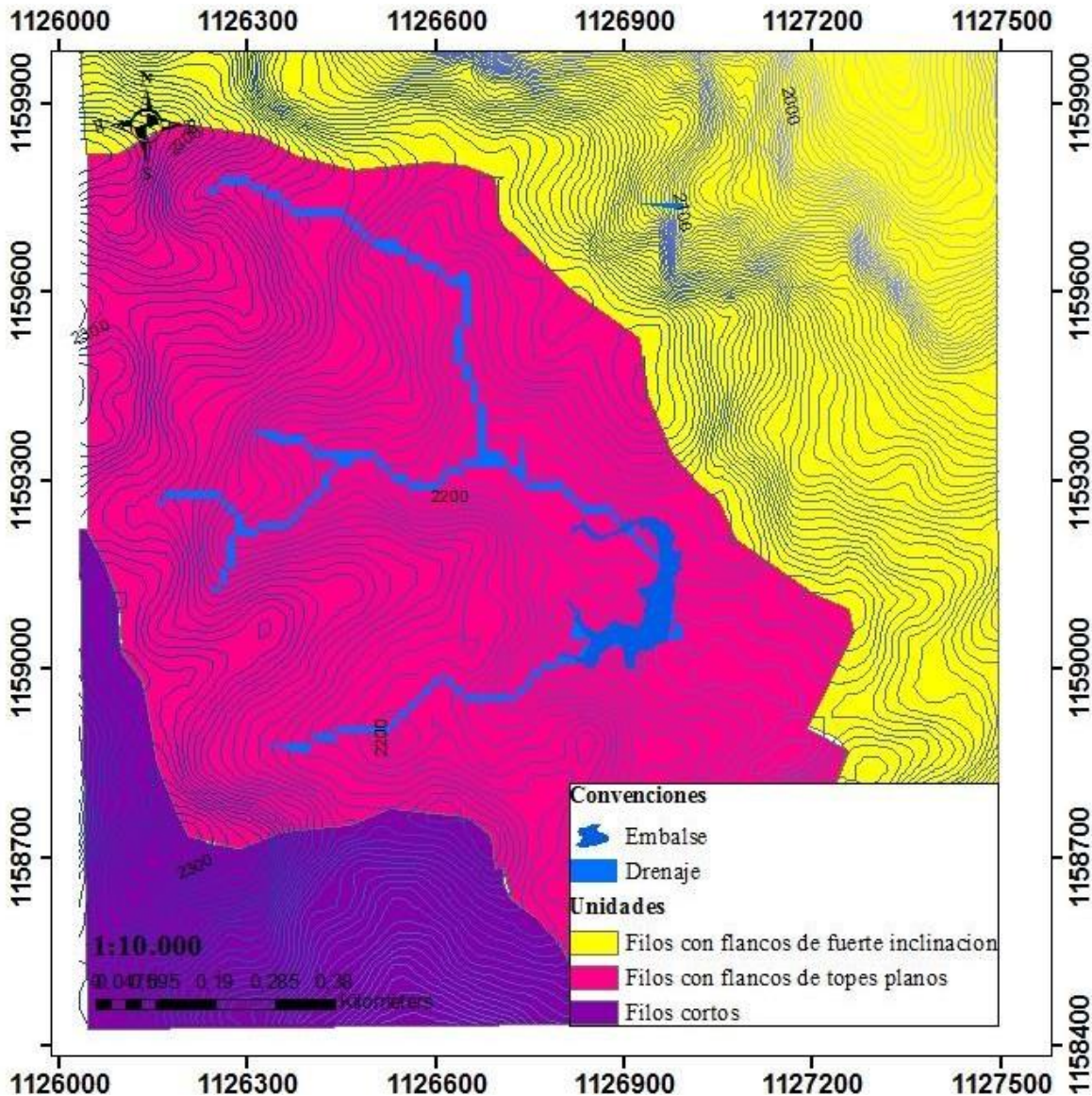


Figura 30 Mapa Unidades Geomorfológicas

Elaboración Propia. A partir de archivos vector de los Municipios del Suroeste.(CORANTIOQUIA, 2012)

Los filos también conocidos como lomos, son caracterizados por un relieve escarpado y pendientes hasta del 45 %, dentro de esta unidad clasifican desde cuchillas largas que sobresalen al marco local y picos aislados, así como también zonas planas en forma de escalones. A pesar de que sean filos las 3 unidades identificadas se debe hacer énfasis en que la inclinación de la pendiente de cada quebrada del embalse es de diferente tipo, por tanto, el tipo de filo también cambia.

En la *Figura 31* se presenta la carta hidrogeomorfológica donde se muestran la ubicación de los lineamientos, la traza de la falla Mistrató con su dirección, los drenajes permanentes e

intermitentes, así como la breve identificación de la dirección de los cauces y la disposición de vegetación.

A partir del reconocimiento geológico y geomorfológico se procedió a elaborar una carta hidrogeomorfología básica que en términos generales recopila a grandes rasgos las ubicaciones de las trazas, lineamientos y orientación de las franjas más importantes del parque natural. Es de destacar que se muestran las zonas por vegetación en verde completo las zonas con más de un 90 % de vegetación y las de mitad negro con del 60 – 50% de vegetación. También se demarcan los lineamientos más notorios en el parque y la traza de la falla mistrato.

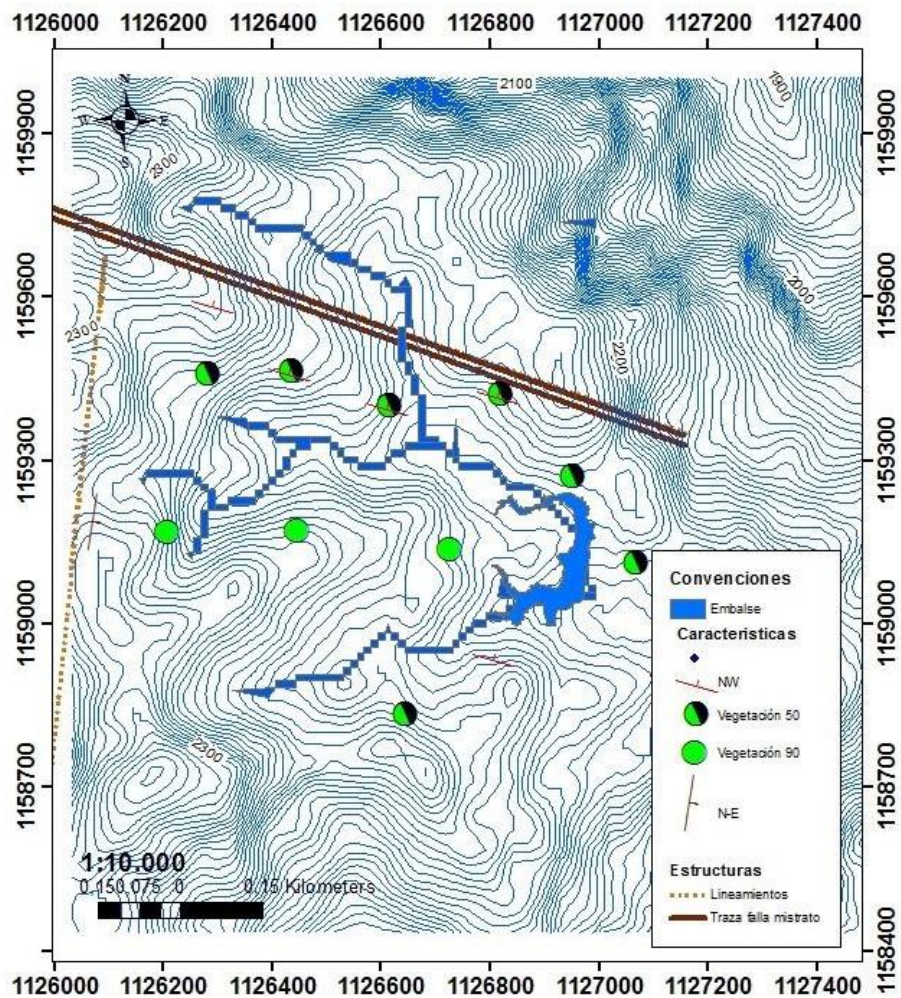


Figura 31 Carta Hidrogeomorfológica

Elaboración Propia. A partir de archivos vector de los Municipios del Suroeste.(CORANTIOQUIA, 2012)

A partir del reconocimiento geológico y geomorfológico se procedió a elaborar un mapa de la cuenca demarcando el perímetro de la cuenca básica, con los respectivos drenajes sobre

un sombreado para reconocer las zonas de mayor pendiente. En la Figura 32 se muestran la ubicación de los lineamientos de la cuenca, los drenajes permanentes e intermitentes, así como la ubicación de las curvas de nivel y las zonas de mayor pendiente.

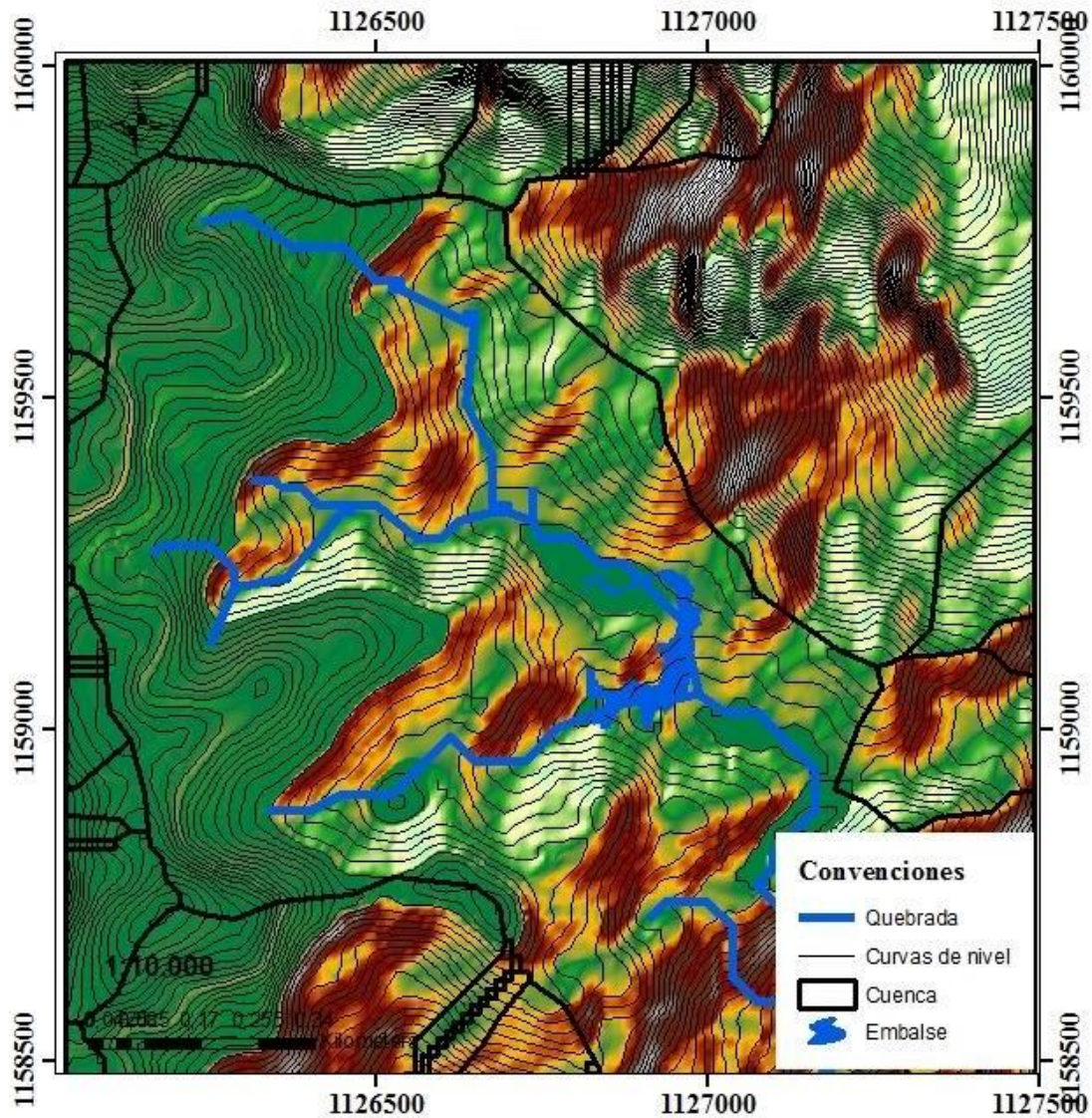


Figura 32 Delimitación de la cuenca.

Elaboración Propia. A partir de archivos vector de los Municipios del Suroeste.(CORANTIOQUIA, 2012)

5.3.2 Índices Geomorfológicos

Para el cálculo de índices geomorfológicos se consideró como punto central los que dieran mayor información para describir los cauces de las cuencas, que dieran o además de los

asociados a la altimetría y a la pendiente del cauce. En la Tabla 15 se reportan los parámetros calculados, con sus respectivas unidades y la magnitud correspondiente.

Tabla 15 Resultados índices geomorfológicos

Elaboración fuente propia

Parámetro		Unidad	Magnitud
Temperatura Promedio		°C	17
Área embalse		m ²	13952
Precipitación media		(mm/año)	2223
Evapotranspiración (mm/año)		(mm/año)	1.15
Longitud de la cuenca		m	4465
Longitud cauce principal		m	1618
Elevación media (msnm)		m	2200
Elevación máxima (msnm.)		m	2250
Pendiente media del cauce		%	20
Área cuenca		m ²	1158305
Perímetro		m	2014
Factor Horton		Adimensional	0.45
Índice de Gravelius		Adimensional	1.18
Relación de Longitudes		Adimensional	1.21
Densidad de drenaje		Km/km ²	0.31
Tiempo de concentración	USDA	mim	20
	Bransby-Williams	hr	0.20
	Kirpich	Min	18

La zona donde se encuentra ubicado el parque Natural La Nitrera es típica de clima frío montañoso, según la clasificación del EOT del municipio, se encuentra en una zona de Bosque muy húmedo montano bajo pero que ha sido intervenido para la creación del embalse. Debido al interés en la gestión del embalse de conservar su capacidad y de las cuencas que lo proveen, esta parte de la investigación se enfocó en conocer los parámetros que describen la zona.

Dentro de los parámetros calculados el de mayor interés es el análisis de la pendiente media del cauce que es del 25%, que está en una categoría moderada, pero al presentarse depósitos sobre la cuenca que son almacenadores temporales de agua generan sobrepeso que pueden dar paso a procesos de remoción en masa; como este parámetro es de interés se hizo un análisis discriminado de las pendientes tanto de La Nitrera como de La Santa Mónica (*Figura*

33), donde se evidencia que las pendientes entre bajas y moderadas predominan en la cuenca, pero en quebrada La Nitrera las pendientes altas se encuentran en mayor proporción

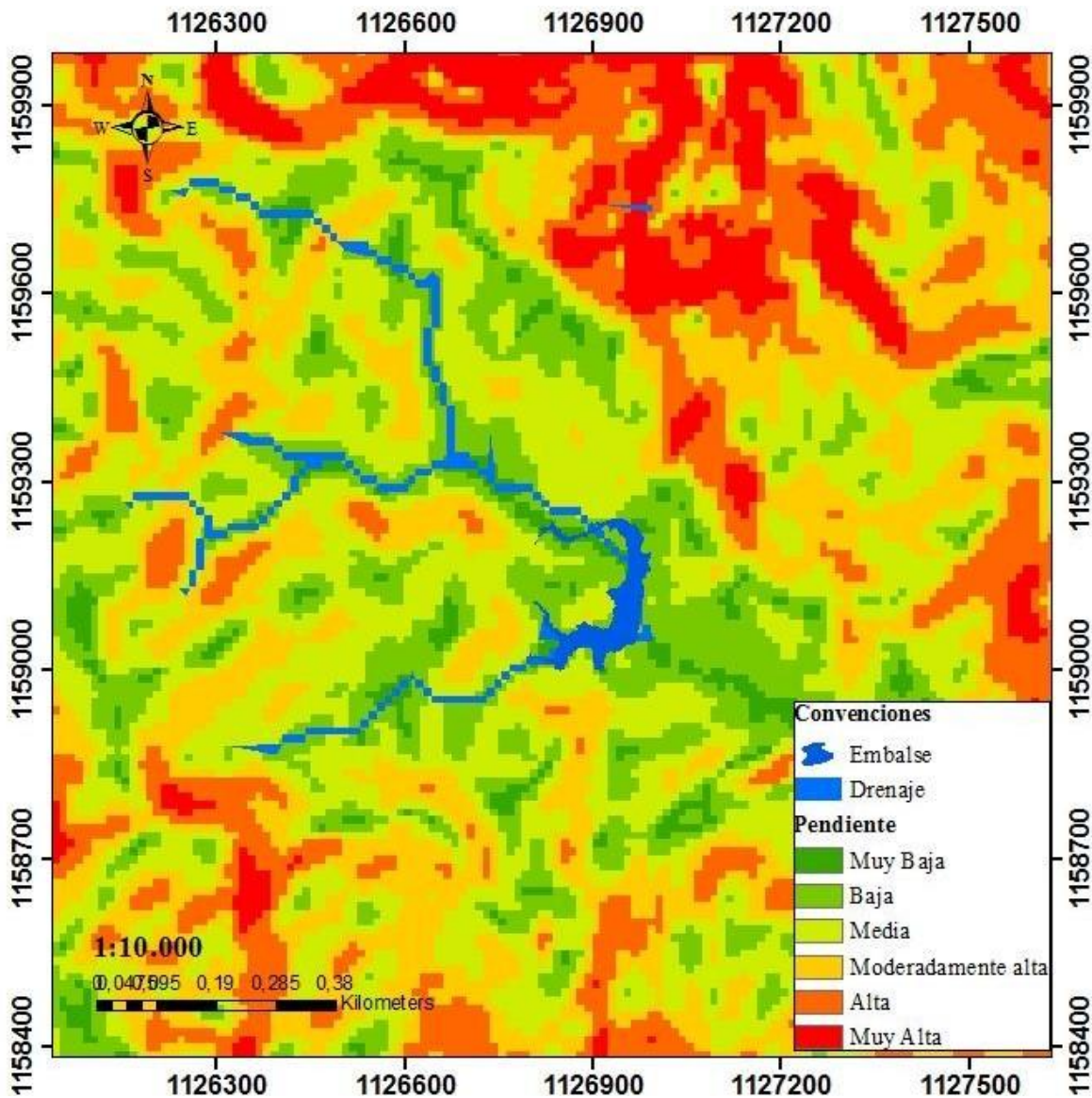


Figura 33 Tipo de Pendiente

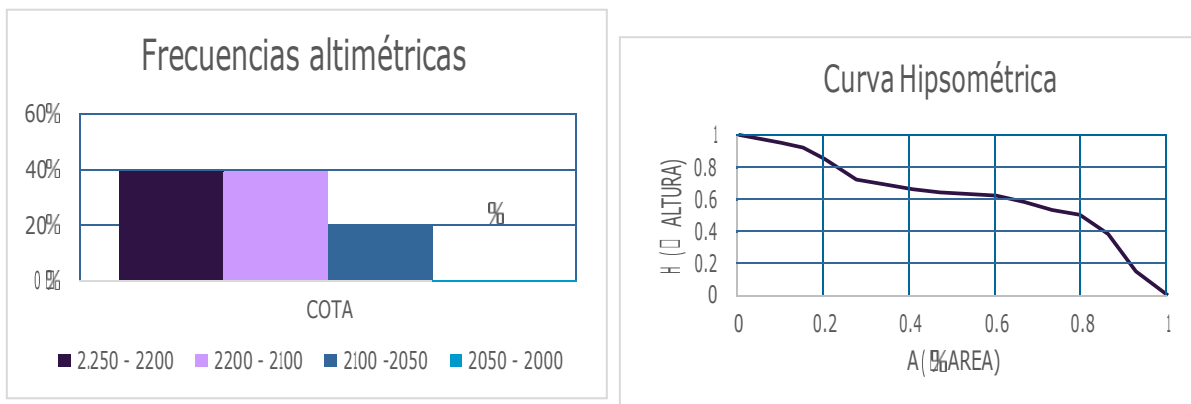
Elaboración Fuente Propia

Para evaluar la forma de la cuenca se recurrió a índices adimensionales como el de Horton que relaciona el área y la longitud de la cuenca. El factor de forma de Horton relaciona el área y la longitud de la cuenca, a medida que el área aumenta, la relación A/L^2 disminuye, lo cual indica una tendencia al alargamiento en cuencas grandes. Para este caso el resultado de

0.45 indica que la cuenca está en un punto intermedio por ende no es alargada pero tampoco es circular a pesar de estar embalsada, según la definición de Horton es una cuenca en forma de cuadrado con salida en un vértice. El índice de gravelius es mayor a 1 y valores más altos indican cuencas más alargadas e hidrogramas más achatados, el resultado en este caso es de 1.18 lo que indica que la forma de la cuenca es en un 18% más alargada hacia un lado tomando una circunferencia como referencia. Otro de los parámetros calculados es la densidad de drenaje que es fundamental porque controla la eficiencia del drenaje y señala el estado erosivo, entre mayor sea este índice, más desarrollada estará la red de drenaje. Para una densidad de drenaje 0.31 es una cuenca resistente a la erosión, con pendientes en escalón y muy permeable refiriéndose al nivel de infiltración y escorrentía, pero su capacidad de drenaje es regular, esto se debe que al tener pendientes moderadas y una alta presencia de vegetación la respuesta de la cuenca ante una precipitación alta va a ser más lenta en lo referente al drenaje.

Otros de los parámetros analizados gráficamente fueron el porcentaje en frecuencia de la altimetría y también la curva hipsométrica (*Figura 34 B*), ambos parámetros fueron evaluados por la importancia de ellos en una zona con topografía montañosa.

La frecuencia altimétrica, simplemente da una base para reconocer cual es la distribución de las cotas, por otro lado la curva hipsométría indica el porcentaje de área de la cuenca que está por encima de una cota determinada (Racca, 2007). A partir de esta curva se evalúa en qué tipo de fase se encuentra la cuenca, como se indicó en el marco teórico en la *Figura5*, este cauce está clasificado entre los jóvenes y maduros, los puntos de inflexión pueden estar relacionados a controles tectónicos o litológicos. Para el cálculo de la curva hipsométrica se utilizó el MDE de ALOS de 12.5 m con el programa ArcGIS.



A. Frecuencias Altimétricas

B. Curva hipsométrica

Figura 34 Graficas de Frecuencia altimétrica vs cota y área.

Para hacer una caracterización de la cuenca no solo por medio del MDE, sino también con la revisión del trabajo de campo, se hizo una identificación de cauces intermitentes, puesto que por la dimensión de la cuenca no están mapeados en las ortofotos o en el modelo digital. En la *Figura 35* se muestra el orden de los cauces encontrados, entre más alto es el orden de la cuenca indica un drenaje más eficiente para el desalojo del agua (Hinds et al., 2013); esto se

corresponde con lo encontrado para la densidad del drenaje, puesto que al poseer una red de drenaje limitada la evacuación en caso de una alta precipitación es muy pobre.

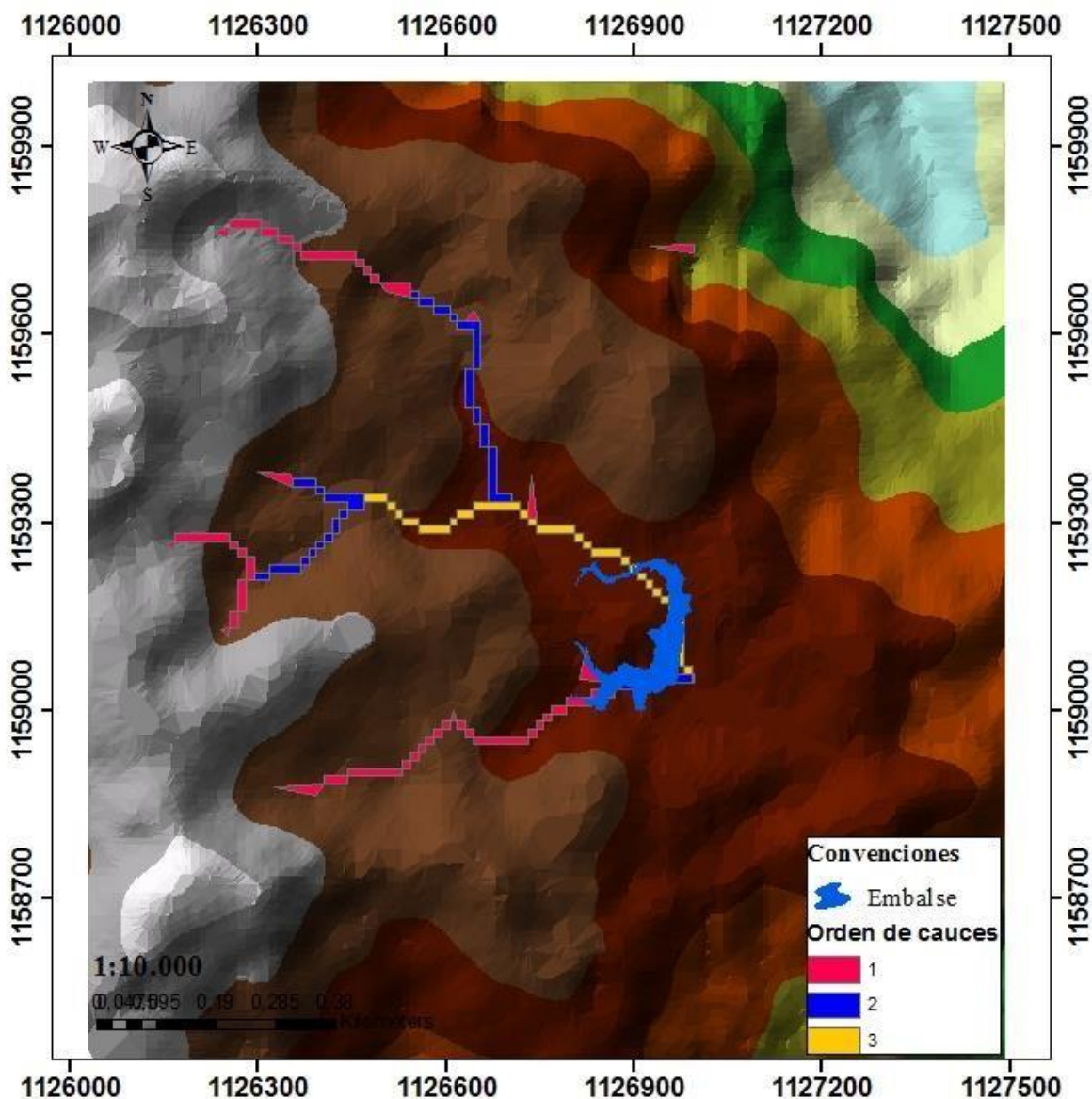


Figura 35 Orden de los cauces

Elaboración Propia. A partir de archivos vector de los Municipios del Suroeste.(CORANTIOQUIA, 2012)

5.4 Suelo

Como se enunció en la metodología, se tomaron alrededor de 30 muestras (Descritas Anexo 4) distintas durante 5 salidas de campo entre 2015-2016 dentro de las cuales se establecieron

10 estaciones que eran propias para tomar muestras frescas de suelo y roca (*Figura 16*), y aptas para identificar la toposecuencia sin alterar el parque natural. Se debe anotar que debido al carácter de Reserva de la zona de estudio, las EPM de Concordia ejercen control de las actividades que allí se realicen y no permiten intervenciones que afecten o modifiquen el lugar. Con el programa ArcGIS se localizaron los puntos escogidos, a continuación se reportan los resultados obtenidos para cada una de las propiedades evaluadas. La evaluación de estas propiedades se hizo con el fin de conocer las características del suelo sobre el embalse y sus afluentes.

5.4.1 Análisis granulométrico

Las muestras fueron recolectadas y analizadas para el periodo del segundo semestre de 2015 hasta primer semestre de 2017, periodo en el que se encontró la sequía extrema de principios de 2016. La distribución espacial del grano se hizo a partir del tamaño medio de grano (D50), a partir de las curvas de distribución granulométrica (*Anexo*), para el grado de selección se tomó el índice de selección basado en los percentiles respaldado en la asimetría de las partículas.

La distribución de las partículas por tamaño de grano muestra que como tamaño predominante el de Arena media y en la zona cercana al embalse predominan estas mismas con algo de intrusión de finos con poca consolidación, Hacia la zona N-W del parque natural se encuentra tamaños gravas asociados a los depósitos coluviales observados en el trabajo de campo. La presencia de arena gruesa es bastante amplia para el percentil 50 y esto es algo que no se esperaba, puesto que algunas muestras fueron poca la presencia general. La poca presencia de limos y arcillas para el percentil 50 corrobora la presencia de estos como bandeamientos intercalados y no como dominadores como se pensó desde el trabajo de campo. La determinación del tamaño de grano medio es la única base para asegurar que tipo de suelo hay presente, simplemente es una muestra del tamaño de grano dominante que es básico para evaluar características de cohesión y empaquetamiento.

Teniendo como índice de clasificación la cantidad entre los percentiles 84% y 16% además de los percentiles 95% y 5% como se puede observar en la *Ecuación 12*. Para el caso de esta investigación el índice de clasificación presenta moderadamente bien clasificado lo que indica grado de homogeneidad es aceptable entre las partículas. Para las zonas cercanas del embalse y de las cuencas por las zonas laterales están moderadamente bien clasificado, lo puede ser asociado a que la gran mayoría de las partículas de esta zona pertenecen al tamaño de grano arena media. Para la parte central del parque natural hasta la zona del embalse haciendo un recorrido oeste - este se puede evidenciar que hay una mala clasificación, lo que es muestra de la heterogeneidad de las muestras recolectadas en la zona con alta presencia de gravas y arenas muy gruesas.

Otra de las variables estadísticas que se tomó en cuenta fue la de la asimetría para ver la variación de los finos y las partículas gruesas. La idea del uso de esta variable es para corroborar o refutar las conclusiones de las variables antes mencionadas, la asimetría en las partículas mide la dispersión de los datos por zonas. Se encuentra que hay asimetría hacia las partículas gruesas, lo que no es otra cosa de una baja presencia de partículas gruesas, pero

las que se encuentran difieren en gran medida de las demás también asimetría hacia las partículas finas hacia la zona más alta de la cuenca lo que es muestra bandeamientos y la intrusión de fino de la que ya se ha hecho mención.

La inclusión de las variables estadísticas tiene como objetivo entender de mejor forma la clasificación (UCSC) escogida para el tipo de suelo, puesto que el análisis granulométrico gráfico no es muy explícito para conocer la distribución de los distintos percentiles, y como es objetivo de esta investigación conocer la estructura del suelo se tomó la determinación de reunir más variables que dieran base para hacer una mejor evaluación de las características del suelo del Parque Natural la Nitrera.

Como se enuncio en la metodología, con la clasificación UCSC (Tabla 8) se hizo la clasificación del suelo, esta clasificación se hace desde la variable tamaño de grano. Dentro del tamizaje de las muestras se vieron partículas desde tamaño grava hasta finos, y más del 50% fue retenido por el tamiz 200 y se presentó una cantidad de finos menor de 5%, en todas las estaciones y para estaciones como la 9 se retuvo 40 % en tamiz 4 (Tamaño grava). Estas características son fundamentales no solo para entender la distribución del tamaño de partícula sino para poder hacer una mejor interpretación de la clasificación del suelo. Para hacer esta clasificación se calcularon tanto los coeficientes de uniformidad (cu) (Ecuación 14) y coeficiente de curvatura (cc) (Ecuación 13) obteniendo valores menores de 1 para cc y valores de cu mayores a uno para el 80% de las estaciones. Por tanto se encontró tres tipos de grupos de suelo según la clasificación UCSC en mayor proporción Arenas bien graduadas con grava y baja cantidad de finos (SW, Well graded Sand), esto para la zona N-W, para la parte central en medio de las 2 quebradas se tiene un suelo de tipo de arenas mal graduadas con gravas y finos (SP, Poorly graded Sand), y para la parte más cercana al embalse se encuentra en el grupo de Arenas arcillosas, mezcla mal graduada de arenas o arcillas (SM, Silty Sand).

5.4.2 Límites líquido y plástico

La prueba de límites de Atterberg está hecha para suelos arcillosos, la determinación de realizar esta prueba fue por las características que presentaban las muestras de suelo en mano, es de notar que cuando se realizan estas pruebas en suelo arcillo arenosos los límites líquidos no pasan del 20% lo que hace poco útil su resultado, pero para suelos que presenten resultados por encima de esta cifra se puede hacer un análisis. Si se ve en retrospectiva es claro que para la clasificación USCS se tiene que el suelo tiene altas características de arena, sin embargo, se decidió hacer la evaluación por lo encontrado en campo, como más adelante se verá en la Tabla 17 los resultados para el límite líquido no son bajos, hay incluso resultados por encima del 70%, razón por la cual se reportó esta prueba y será tema en la discusión de este trabajo de investigación.

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua. El índice de plasticidad de

un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. A continuación en la *Tabla 17* se presenta el compilado de los 5 rangos de resultados que se presentaron dentro de las muestras analizadas que relacionan los resultados tanto de los límites como los índices de plasticidad y contenido de humedad, los detalles de los cálculos realizados se encuentran en los *Anexo 2*.

Tabla16 Resultados Límites líquido y plástico

Elaboración fuente propia

Rango	Límite Líquido:	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Contenido de Humedad
1	49-51%	45-47%	4-5%	30-35%
2	51-53%	42-43%	9-10%	15-20%
3	53-54%	40-41%	10-11%	25-30%
4	61-63%	45.45%	16-17%	20-25%
5	72-74%	62-65%	8-9%	35-40%

El reporte de estos datos de límites se muestra la disposición de estos valores dentro de la zona de estudio, es importante hacer énfasis que a pesar de resultados anteriores son de suelo arenoso, se encuentra que el menor valor de límite líquido es de 49 %, que si es un valor significativo para el análisis con la clasificación de atterberg (*Figura18*).

El límite plástico que es el contenido de humedad para el cual se cambia del estado plástico al semisólido, la elección de este parámetro se hizo al ver ciertas zonas cercanas al embalase y a las cuenca con grietas en las temporadas se sequía. Se aprecia como el mínimo del límite plástico es del 45% hasta un máximo de 65%. Es importante aclarar que a pesar de que muchos suelos arenosos no poseen límite plástico, en el suelo presente para la zona del parque natural “La Nitrrera” hay límite plástico en todas las muestras evaluadas.

Con los resultados de límites líquido y plástico además del contenido de humedad como lo muestra la *ecuación 15* se obtuvo el grado de consistencia que para todas las muestras evaluadas es superior a 1 y como lo indica la clasificación de la *Tabla 10* es un suelo de consistencia media dura.

A partir de los resultados obtenidos y considerando la *Tabla 9* para el índice de plasticidad, para el límite líquido tener porcentajes por encima del 50 % en todas las zonas indica la presencia de contenido de arcilla entre el grano predominante arena o limo, por otro lado el índice de plasticidad da una pista muy importante para la clasificación del suelo, teniendo todos un IP debajo de 10 nos indica presencia de algunas trazas o poca arcilla, lo que indica una baja plasticidad, mientras que para la zona con índice mayor a 10% presenta una plasticidad media y es el suelo considerado franco arcilloso. Para confirmar estas conclusiones se tiene la *Figura8*, que es la clasificación de materiales por los límites de atterberg que relaciona el límite líquido con el índice de plasticidad. Haciendo el análisis por rangos se tiene que para los rangos 1 y 2 se encuentran dentro de la clasificación de limos

de baja plasticidad (ML) , para los rangos de 3 a 5 son limos con alta plasticidad (MH) .Estos resultados dan una pauta acerca de cómo las arcillas y limos presentes dentro del grano predominante arena son importantes en la respuesta del suelo al comportamiento plástico.

5.4.3 Colorimetría

Por encontrarse una gran cantidad de hojarasca y capa vegetal sobre la zona se decidió aplicar la prueba de colorimetría para tener el parámetro de componentes orgánicos posiblemente perjudiciales que intervendrían en la escorrentía y en la calidad del suelo cercano al embalse. Teniendo en cuenta los resultados presentados en el análisis de los límites de líquido y plástico se decidió aplicar la prueba de colorimetría y evaluar si también se presentaba la correspondencia de las muestras para la colorimetría, pero solo surgieron 4 rangos y al comparar se encuentra que el rangos de muestras denominados 2 y 3, presentan la misma caracterización de color 3. En la Tabla 18 se reportan los datos obtenidos en la prueba, en la metodología se da en detalle el procedimiento de la norma INVIAS 212.

Tabla17 Colorimetría Parque Natural la Nitrera

Elaboración fuente propia

rangos	Color	Descripción
1c	3	Zona con cantidad baja de materia orgánica.
2c	2	Zona con cantidad baja de materia orgánica, muestra clara sobre el cauce de la nitrera.
3c	4	Zona con cantidad alta de materia orgánica.
4c	5	Zona con cantidad alta de materia orgánica suelo contaminado.

Los resultados están dados de una escala de 1-5 en la Tabla de colorimétrica teniendo a 5 como el de mayor contenido orgánico perjudicial, a partir de esto se encontró que dentro del total de las muestras se enmarcaron 5 zonas bien definidas. Para el rango 1c se encontró que el contenido de materia orgánica es estándar (3), lo que quiere decir que la zona no se encuentra alterada y que cumple con el mínimo de condiciones para un suelo sin contenidos perjudiciales. El rango 2c presenta baja cantidad de contenido orgánico lo que indica que las muestras de esta zona están poco alteradas por la capa vegetal que hay sobre esta. Los rangos 3c y 4c contienen un alto contenido de fragmentos orgánicos posiblemente perjudiciales que deben ser evaluados bajo otros parámetros para verificar lo concluido bajo esta prueba.

5.4.4 Compresión inconfiada

La prueba se desarrolló bajo la norma INVIAS 152 (ver Anexo); el objeto de esta norma es indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión

inconfiada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remodeladas, aplicando carga axial.

La muestra fue adquirida sin confinamiento lateral, dados los problemas de estabilidad que tienen las paredes cercanas tanto en cauce de las cuencas como del embalse en las temporadas de sequía. En la *Figura 36* se puede observar tanto la prensa como uno de los núcleos demuestra después del secado.

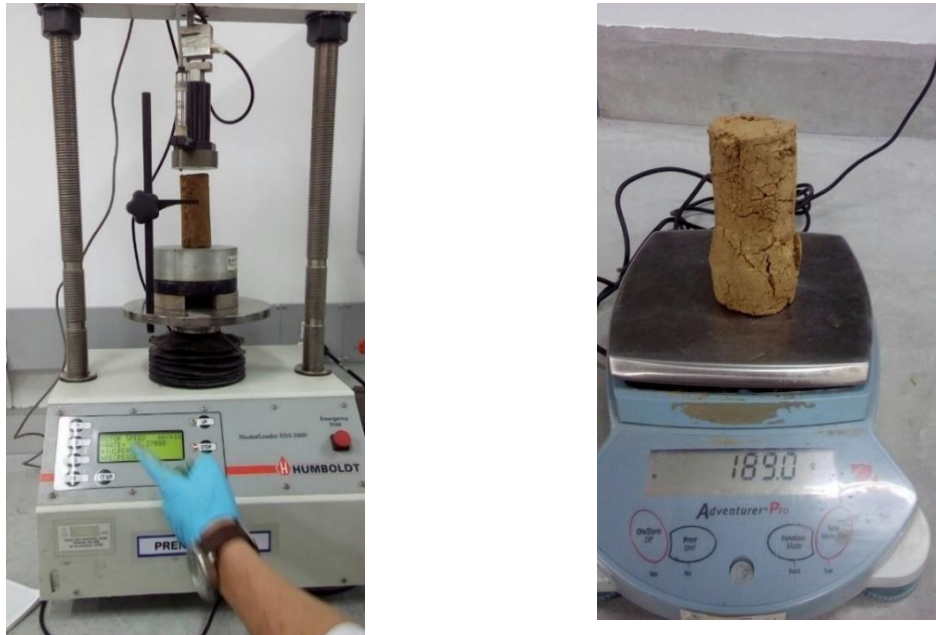


Figura 36 Prueba compresión inconfiada

Fuente propia. Tomada Marzo 2017

Como lo define la norma utilizada los resultados arrojados por la prensa deber ser representados en una gráfica que muestre tanto la deformación como la carga, como hubo un análisis de 5 muestras sobre las 5 estaciones más cercanas al embalse se tomó un promedio para cada una de las 16 lecturas dadas por la prensa y así obtener el resultado *Figura 37*.

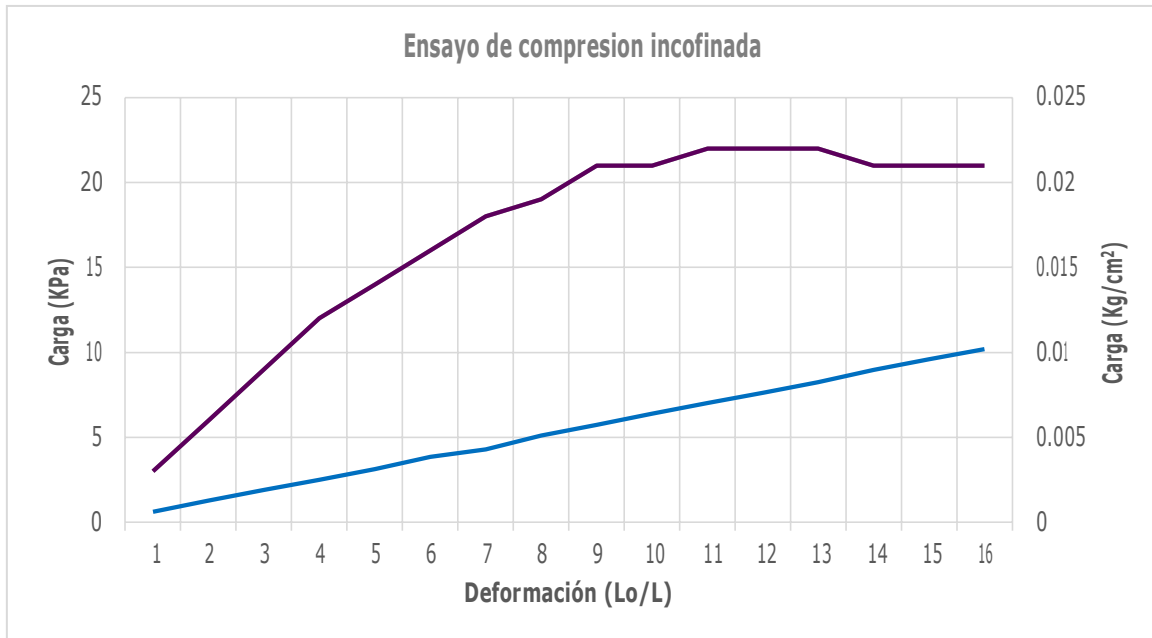


Figura 37 Ensayo compresión incofinada

Fuente elaboración propia

El resultado de la aplicación de la prueba de compresión incofinada (Figura39) muestra que el pico de carga es de 21 KPa y al recurrir a la Tabla11 se ve que este resultado entra dentro del intervalo de consistencia de suelo muy blanda.

Dentro de la evaluación de la norma está el cálculo de la deformación unitaria, que es la razón entre el cambio de longitud sobre la longitud inicial, la sección transversal promedio de la muestra que relaciona el área inicial y la deformación unitaria y el esfuerzo que relación la carga aplicada sobre el área de la sección promedio correspondiente.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = 0.071$$

Ecuación 16 Deformación Unitaria Axial

$$A_p = \frac{A_0}{1 - \epsilon} = 20.29 \text{ cm}^2$$

Ecuación 17 Sección Transversal promedio

$$\sigma_p = \frac{P}{A_p} = 0.010 \text{ Kg/cm}^2$$

Ecuación 18 Esfuerzo de Carga aplicada

Estos parámetros dan una pauta del comportamiento del suelo cuando se ve expuesto a un esfuerzo, teniendo una razón de cambio longitudinal del 7%, para cuando hay un esfuerzo de 0.010 kg /cm².

5.4.5 pH o acidez activa de los suelos

Bajo la norma NTC 5264 se realizó la prueba de pH, a través del pH-metro. El pH es una de las propiedades fisicoquímicas más importante de los suelos; de él depende en gran parte la disponibilidad de nutrientes para las plantas, no solo porque determina su solubilidad sino porque controla el tipo de actividad biológica y, por lo tanto, la mineralización de la materia orgánica. También tiene su efecto sobre la concentración disponible de iones y sustancias tóxicas, la capacidad de intercambio catiónico de suelos, enfermedades de las plantas y otras propiedades importantes (ICONTEC, 2008).

A continuación en la tabla 19 se presentan los valores de pH para cada una de las estaciones escogidas.

Tabla 18 Valores de pH

Fuente: Elaboración Propia

Estación	pH
1	4.95
2	4.98
3	5.00
4	4.85
5	5.50
6	4.90
7	5.70
8	6.15
9	6.10
10	6.18

La variación del pH es de forma creciente de este a oeste teniendo un mínimo de 4.85 para la estación 4 hasta 6.18 para la estación 10. Este resultado asociado a la identificación del suelo da una pista de la calidad del suelo presente en la zona.

5.4.6 Características del Suelo Parque Natural “La Nitrera”.

Como se hizo mención en el capítulo 4 la formación Barroso y el miembro Urrao de la formación Penderisco son las unidades formadoras del suelo que se encuentra en el parque natural La Nitrera; con el uso de bibliografía regional y con trabajo de campo buscando

perfiles se determinó las características del suelo de la zona. La *Figura 38* muestra los 4 perfiles encontrados en la zona que tienen como característica común la matriz de roca fresca o madre altamente fracturada.

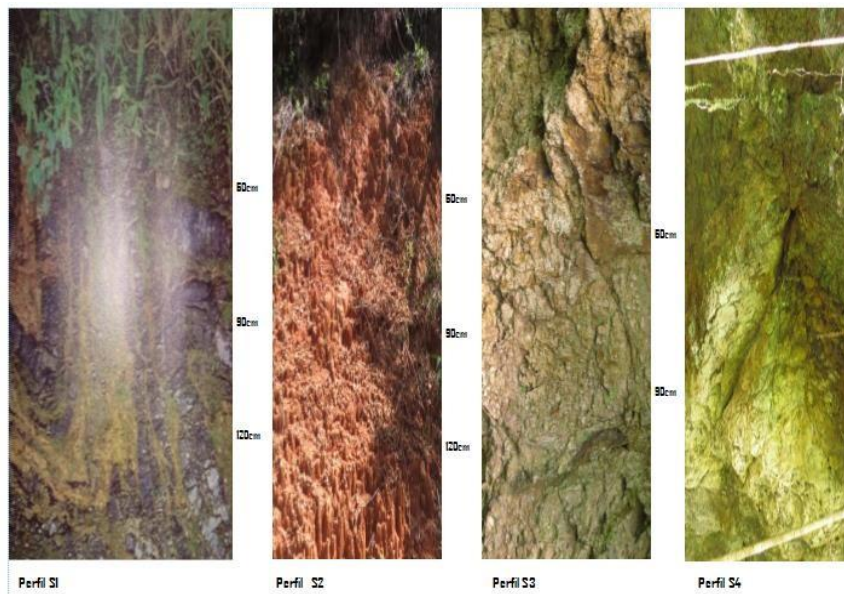


Figura 38 Perfiles Observados

Elaboración Propia. Tomadas noviembre 2016

Para llevar a cabo los perfiles de se utilizó la clasificación de (Deere & Patton, 1971) para regiones tropicales. En la Tabla 19 se hace la descripción por zonas para cada perfil.

Tabla19 Descripción perfiles de toposecuencia

Fuente: Elaboración Propia

Perfil		S1	S2	S3	S4
Zona		De poco espesor debido a las altas pendientes. Café Oscuro	Materia orgánica de poco espesor, café.	Materia orgánica de color negro a pardo oscuro.	Materia orgánica de color negro a pardo oscuro.
I	1 A	De poco espesor debido a las altas pendientes. Café Oscuro	Materia orgánica de poco espesor, café.	Materia orgánica de color negro a pardo oscuro.	Materia orgánica de color negro a pardo oscuro.
	1 B	Presencia de gravauca grisáceas en matriz amarilla – naranja	Residual de color rojo alta presencia de arcillas y poco compactado.	Compuesto por material fino color amarillo pardo.	Material amarillo verdoso, presencia de bandas de arcillas.
	1 C	Material de color amarillo	Material limo arenoso color rojizo-naranja	Saprolito con material limo-	Matriz de color amarillo claro, finogranular.

Perfil	S1	S2	S3	S4
	rojizo, arenolimoso.		arcilloso, color amarillo rojizo	
II:Roca meteorizada	Matriz limo-arenosa color verde –pardo. Fracturada.	Con propiedades a un de la roca madre, material de transición.	Bloques de color gris , matriz arcillo-arenosa .Presencia de bloques a mayor profundidad	Nivel de transición con propiedades de roca madre y en la parte superior de saprolito.
III:Roca Fresca	Bastante fracturadas detriticas finogranulares y químicas en menor proporción	Fracturada en alto grado de color rojizo-amarillento.	Alto grado de fractura miento , con color gris verdoso y textura afanítica	Altamente fracturada, color amarillo verdoso textura afanítica.

La localización geográfica de estos perfiles se muestra en la *Figura 39*, estos perfiles fueron elegidos en zonas que dejaban visible y expuesta al menos 2 de las zonas según la clasificación escogida

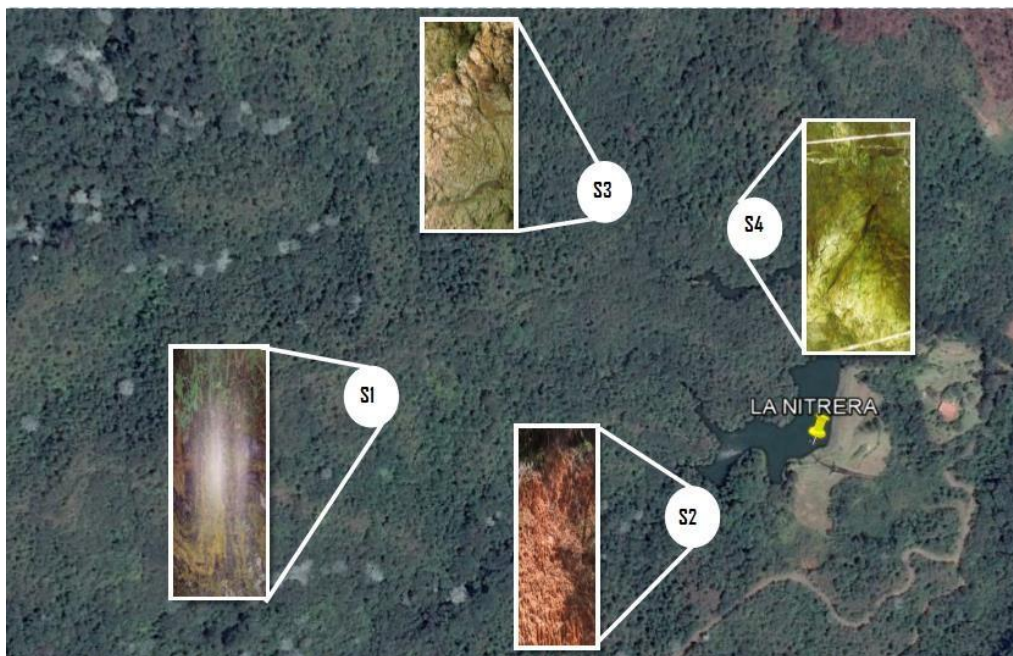


Figura 39 Localización Perfiles

Elaboración Propia. A partir de Google. (s.f.). [Localización la Nitrera]. Recuperado el 3 de Octubre, 2017

Para las zonas IA de todos los perfiles no superan los 30 cm de espesor, en cuanto a los demás horizontes de la zona I se tienen dimensiones que no superan los 50 cm y posteriormente se encuentra la roca madre, que en gran parte del parque Natural es difícil de ver, pero en los sitios identificados se encuentra altamente fracturada. Debido a la cantidad de vegetación y de que muchos de estos perfiles estaban en zonas con baja visibilidad las fotografías no son claras y por tanto basándose en los datos de campo se hace la caracterización. La parte de mayor importancia para este estudio era encontrar el saprolito o suelo residual y así relacionarlo con las magnitudes de erosión mencionadas en el primer capítulo. Relacionar estas variables daría una pauta mayor en lo referente a la gestión del embalse y su problemática de desabastecimiento. Como se ha venido desarrollando a lo largo de este trabajo también se mencionó que entre los índices geomorfológicos el de mayor interés era la pendiente sobre el territorio.

A continuación, en la *figura 43* se presenta un mapa que relaciona suelo residual con pendientes mayores a 25%. La coloración azul muestra las zonas donde las pendientes además de altas son zonas que presentan mayor suelo residual, viendo esta dinámica se podría asociar estas variables a los movimientos en masa que se han presentado y en las zonas más cercanas al cause los problemas por erosión. En este mismo mapa se muestra una localización que muestra la ubicación exacta de este análisis sobre la cuenca. Es de notar que en las zonas más altas del parque se podrían presentar movimientos que obstaculicen la llegada de agua a la zona embalsada.

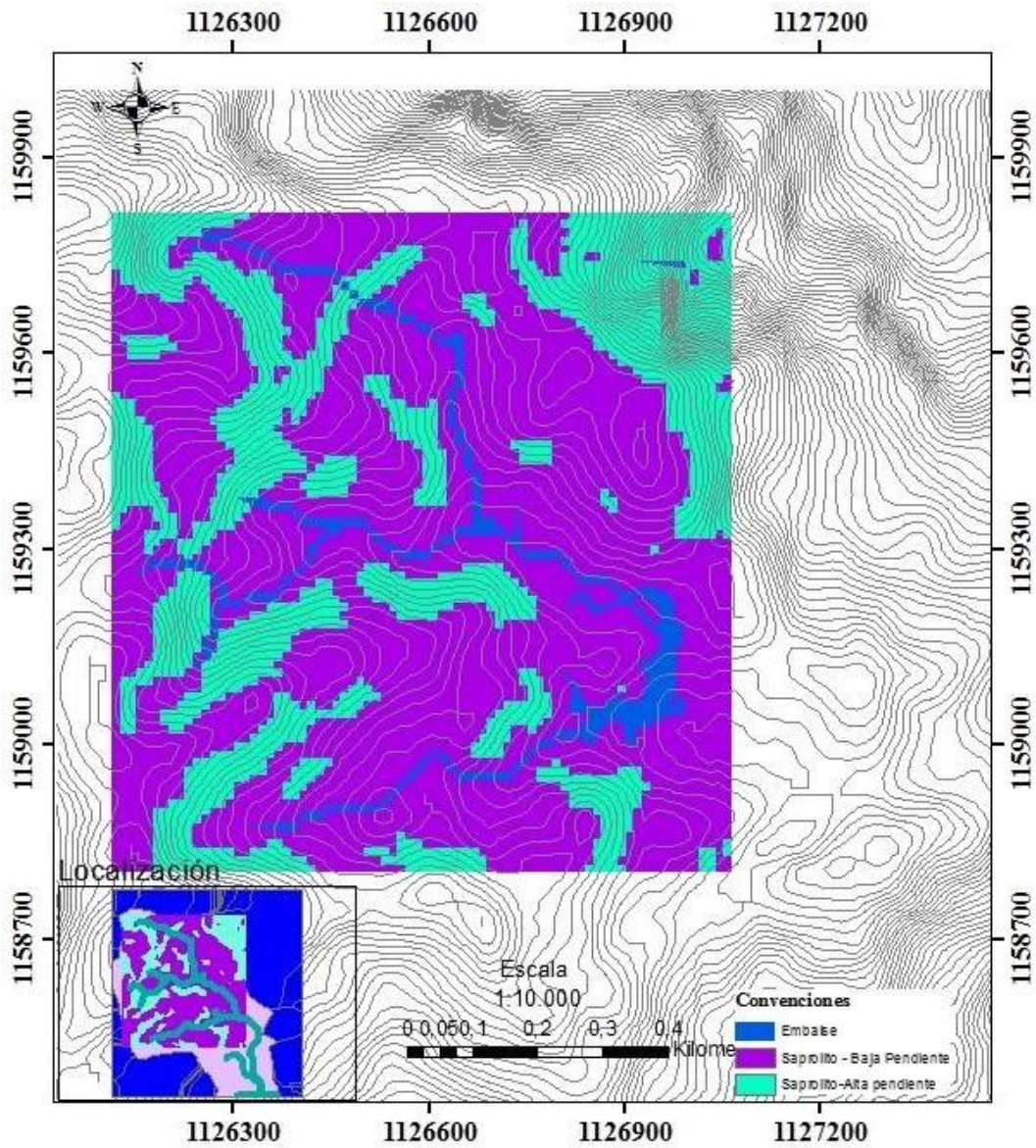


Figura 40 Suelo Residual y tipo de pendiente.

Elaboración Propia

Capítulo VI: Discusión

La determinación del direccionamiento en Los lineamientos del Parque Natural la Nitrera que muestran una fuerte tendencia a la dirección N-W, se ven modificados por estructuras regionales como la falla Mistrato. La consecuencia puntual de los movimientos regionales conlleva a que el cambio de dirección modifique la ubicación de los bloques y la pendiente que en este momento determinan el marco de los cauces que proveen al embalse.

A pesar del cambio en el uso del suelo y la aparente estabilidad de la cuenca, en la estructura interna de esta quedan los rezagos de usos anteriores que pueden inducir procesos erosivos en el relieve actual; en la construcción de obras hidráulicas en especial de captación estática del recurso hídrico, son de especial cuidado los agentes que modificaron el relieve en periodos anteriores y cuya influencia puede perjudicar el funcionamiento de las obras.

Los índices elegidos para determinar la forma de la cuenca son bastante usados pero sus clasificaciones no son exactas por hacer énfasis en la proximidad de las cuencas a la forma de una circunferencia (Hinds et al., 2013), por lo tanto hacer una comparación entre los datos obtenidos contra el trabajo de campo y la visualización en SIG sería la manera más cercana de evaluar la forma de la cuenca y sus afluentes. La elección de los parámetros para evaluar la cuenca (*Tabla 15*) fue determinada desde varios aspectos; como primera medida de la información complementaria que se disponía y segundo, del interés particular por preservar el embalse.

La caracterización de una cuenca en una zona montañosa depende en gran parte de la topografía y la altimetría de la zona, para hacer una evaluación más concisa y clara se recurrió a las gráficas que dan pautas visuales para determinar los puntos de interés. La curva hipsométrica (*Figura30-b*), arrojó resultados que son de bastante interés por los puntos de inflexión tan pronunciados, los cuales son posible muestra de que parámetros como los cambios de pendiente así como la litología de la zona están afectando la relación altura vs. distancia y deberían ser estudiadas de manera más profunda.

El análisis de las propiedades del suelo genera un conocimiento más detallado sobre la zona y sobre su comportamiento futuro; parámetros como la distribución granulométrica son fundamentales, pero a la vez son básicos. Dado esto, el análisis del tamaño de grano (*Figura33*) da las primeras pautas pero no es contundente a la hora de clasificar el suelo de una zona, en este caso se encontró una alta presencia de tamaños arena y arcilla. Dentro del total de las muestras recolectadas siempre se halló presente tamaño medio de arena. Dada esta situación y la falta de claridad sobre la selección, se recurrió a un análisis básico estadístico para conocer el grado de selección y asimetría (*Ilustraciones 34 y 35*). Dentro de estas clasificaciones se encontró una selección de grano moderadamente bien clasificado y puntos asimétricos en contraposición hacia los puntos Norte y Sur del embalse, de partículas fina y gruesa respectivamente.

En el trabajo de campo por medio de una revisión visual se encontró que la depositación de sedimentos en el embalse no se hace de manera homogénea sobre toda la superficie de este.

Los primeros depósitos y más visibles se hacen en la entrada del embalse, esto debido a que se genera un cambio muy brusco en la velocidad del flujo por el cambio de vegetación (FAO, 2007) y ésta ya no es capaz de transportar las partículas más grandes, las cuales caen en la entrada del embalse formando los depósitos retenedores de agua.

La prueba de compresión con un resultado de 21 kPa que da muestra de un suelo muy blando; se llevó a cabo para las zonas cercanas del embalse debido a lo registrado cuando hay desabastecimiento en el embalse, como lo muestra la *figura 41*, en la cual se nota la presencia de cárcavas alrededor del embalse, lo que ha disminuido la capacidad de almacenamiento. Esta prueba se hizo en consideración a esta problemática, pero pruebas como compresión triaxial serían otra opción a considerar.



Figura 41 Embalse en desabastecimiento. Fuente: EE.PP. MM. Del Municipio de Concordia

La definición de rangos para el reporte de resultados como los límites de Atterberg y colorimetría fueron escogidos sin tener una zonificación específica topográfica; se consideró como una forma más concisa y clara de presentar la variación de estas propiedades en el Parque Natural y su influencia sobre el importante embalse.

La carta hidrogeomorfológica es un documento con características particulares que se encuadra perfectamente en el estudio de cuencas hidrográficas, contribuyendo a detectar problemas concretos en las mismas (Marini & Piccolo, 2005). El desarrollo de este documento requiere de información complementaria como el tipo de vegetación y tipo de escorrentía; la carta presentada en este documento es apenas un marco de referencia para estudios posteriores para informar sobre los fenómenos hidrológicos y geomorfológicos que afectan los diversos cursos de agua.

El pH es uno de los principales responsables en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la mayor o menor capacidad de asimilar de los diferentes nutrientes (González & Segat, 2000). Los resultados sobre el este parámetro están dentro del rango de 5-7 que es típico de zonas húmedas. El pH ideal debe estar entre 6- 7 para que exista una absorción adecuada de nutrientes.

La determinación de los cauces intermitentes se hizo por medio de reconocimiento en campo en periodos de lluvia como el 2do semestre de 2016, puesto que en los archivos espaciales disponibles para esta zona, solo están reconocidos los cauces permanentes. El

reconocimiento de estos cauces se hizo para tener una precisión mayor en la descripción de la cuenca.

La consecución de la toposecuencia o catena se convierte en un proceso complejo cuando se encuentra una zona con tanta vegetación, pero a la vez es de suma importancia evaluar cómo se presenta la depositación de los horizontes y en lo posible hacer una cuantificación de sus espesores.

Capítulo VII: Conclusiones

El Parque Natural la Nitrera se encuentra ubicado sobre el Miembro Urrao de la formación Penderisco con depósitos poco consolidados, cuenta con una matriz de roca altamente fracturada sedimentaria con algunos lentes de depósitos marinos como chert. La traza de la falla Mistrató marca la foliación y la dirección de las estructuras de la quebrada La Nitrera; para la quebrada Santa Mónica se encontró como dirección predominante N- W y sobre la parte central del parque natural, por los senderos, se ven unos lineamientos que enmarcan las foliaciones con dirección W-E (*figura 31*).

Las unidades geomorfológicas que se identifican son de 3 tipos de filos, de topes planos, cortos y de fuerte inclinación, que son los encargados de definir el desarrollo del valle del drenaje. Las fuertes pendientes del cauce (>25%), que son las generadoras de los filos de fuerte inclinación que se presentan en un porcentaje aproximado del 20% en la cuenca La Nitrera, no indican que esta zona esté sometida a amenazas de origen natural, solo aumentan la susceptibilidad de determinados materiales a generar procesos erosivos y de remoción en masa.

En la evaluación de las condiciones hidrogeológicas del parque natural se encontró que la cobertura sedimentaria asociada al miembro Urrao de las zonas de los cauces de La Nitrera y Santa Mónica, muestra una mayor capacidad de infiltración puesto que dichos cauces son permanentes, mientras que aquellas ubicadas en la parte intermedia del embalse y algunas bifurcaciones sobre la quebrada La nitrera solo se ven en el periodo de lluvia fuerte que va desde el mes de Mayo – Agosto.

Dentro de las características morfométricas se tiene una cuenca con un área de apenas 1158305 m² lo que indica que está clasificada como una cuenca muy pequeña, con una red de drenaje muy corta, con una forma de tipo elipsoide endorreico. La longitud máxima del cauce es de 1618 m y tiene como pendiente media del cauce el 20%; esto la clasifica como de pendiente moderada. La relación de longitudes de 1.21 muestra la cercanía en longitud de todos los cauces asociados. Estas características son una forma de describir la condición actual de la zona.

El suelo de la zona presenta una variación interesante en cuanto a las propiedades medidas, en cuanto a la clasificación por tamaño de grano; según la USCS existen 3 tipos de suelo

arenas graduadas, arenas mal graduadas y arenas arcillosas que varían de la parte más lejana hacia el embalse respectivamente. Por otro lado la evaluación para la parte cohesiva de las muestras con los límites de Atterberg muestra que hay presencia de limos de baja y alta plasticidad. Otras de las propiedades del suelo muestran que es de composición blanda para las zonas cercanas al embalse, que su pH está dentro de lo que se considera óptimo en un rango entre 4-7. En cuanto a la materia orgánica como se puede ver en la *Figura 37*, para la zona cercana a la Quebrada Santa Mónica, presenta una valoración muy alta que indica que hay presencia de elementos perjudiciales para el suelo de la zona.

Las características que se presentan en los perfiles de suelo encontrados son similares para los distintos horizontes. La capa de materia orgánica es en promedio de 30 cm, que en los horizontes de la zona I son saprolitos de coloración roja-amarillenta; además la zona 2 en 3 de los 4 perfiles tiene características de la roca madre y presenta matriz arenosa con agregados arcillosos o limosos. La característica que si es común para todos los perfiles está en la roca madre altamente fracturada.

A partir de esta investigación se puede concluir que las condiciones geomorfológicas del Parque natural La Nitrera ponen en peligro la permanencia y la vida útil del embalse a futuro, deben ser evaluadas constantemente en especial las estructuras afectadas por la traza de falla Mistrató, que ha sido causa del cambio de direccionamiento. Por otro lado, la evaluación de la morfometría evidencia que la cuenca y el embalse que son los encargados de proveer el recurso hídrico al municipio, son de dimensiones muy pequeñas y que es de suma importancia evaluar los cauces intermitentes y gestionar la posibilidad de volverlos permanentes. En la caracterización del suelo si se evidencian problemas que a corto plazo podrían generar más dificultades de abastecimiento que las que ya se presentan en los periodos de sequía, no solo por efectos de déficit en el recurso sino por la características que se evidenciaron: un suelo muy blando cuando es expuesto a la carga, la variabilidad entre plasticidad y la regular clasificación del tamaño de grano, todas ellas van a generar movimientos en las paredes del embalse y la acumulación de estos cambian la velocidad del cauce, generando problemas de acumulación de depósitos y disminuyendo la capacidad de almacenamiento.

De conformidad a la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de investigación y a lo concluido previamente, se puede afirmar que la hipótesis es aceptada. A futuro los direccionamientos de las trazas de fallas regionales sumados a las pendientes moderadamente altas encontradas y la cantidad de saprolito en gran parte de la cuenca repercutirán en la estabilidad de las paredes del cauce en especial para la quebrada la Nitrera , además las condiciones de capacidad de carga de las zonas cercanas al embalse demuestran la presencia de un suelo muy blando sumado a esto la presencia de bandeamientos de arcillas , limos y una capa orgánica considerable que desembocaran en coladas de barro y procesos de reptación, este último es extremadamente ralentizado pero por efectos estructurales del sustrato y en periodos de alta precipitación puede verse favorecido. Es de notar que las condiciones a las que está expuesto tanto el embalse como la cuenca repercutirán en la capacidad del embalse y por ende a la población del municipio de Concordia en el suministro de agua.

La falta de información cartográfica para poblaciones rurales a una escala menor a 1:10,000 dificulta el trabajo para evaluar de manera más detallada un espacio tan importante como el Parque Natural La Nitrera, tan importante para la población de Concordia, Antioquia.

Capítulo VIII: Recomendaciones

Debido a los procesos superficiales que se evidenciaron en el trabajo de campo y a las pruebas básicas que se realizaron para conocer la dureza y estabilidad del suelo, se considera adecuado un análisis más a fondo de estos parámetros con la intención de proteger el embalse y los senderos del Parque.

Se debe analizar si es necesario propiciar de forma controlada la caída de bloques o de estructuras en las zonas de mayor pendiente, que a futuro puedan generar amenaza alta para los visitantes del Parque Natural la Nitrera o que perjudiquen los cauces que proveen el embalse.

En las zonas que presentan cicatrices de antiguos deslizamientos es necesario identificar un protocolo que sin alterar el principio fundamental del parque como reserva ecológica, sea protegido para evitar nuevos deslizamientos que ya se han vivenciado en la zona.

Para el tratamiento de los procesos gravitacionales y de masas, que no requieren soluciones costosas se puede considerar el uso de plantas tipo arbusto que no generen mucho sobrepeso sobre los muros, pero que sus raíces sean lo suficientemente largas para amarrar el terreno.

Se deben hacer análisis a mayor profundidad del suelo que rodea el cauce Santa Mónica que presenta una alta presencia de materia orgánica posiblemente perjudicial, ya que por efectos de escorrentía estos resultados podrían resultar alarmantes para el suministro de agua a la población del municipio.

Para promover una gestión más detallada de un recurso vital para la población de Concordia, Antioquia, se podrían hacer campañas de lecturas de infiltración para tener en mayor detalle que zonas de flujo intermitente que podrían ser gestionadas, para no sufrir problemáticas tan severas como las de desabastecimiento que actualmente se presentan en la temporada Diciembre – Marzo.

Bibliografía

- Alcaldía de Concordia. (2015). Esquema de Ordenamiento Territorial, 1, 1–77. Retrieved from http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/C/concordia_-_antioquia_-_eot_-_2001/concordia_-_antioquia_-_eot_-_2001.asp
- Alvarez, V. M. (2006). Determinación del tiempo de concentración con sistemas de información geográfica. Ingeniería del Agua.
- ANH. (2010). Cuenca Cauca-Patía, 2. Retrieved from [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones-y-Poster-Tecnicos/Cauca Patía \(pdf\)-Ronda Colombia 2010.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones-y-Poster-Tecnicos/Cauca-Patia-(pdf)-Ronda-Colombia-2010.pdf)
- ANH-Universidad EAFIT. (2007). Evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica de la cuenca Atrato y cuenca San Juan, 143. Retrieved from http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/bibliotecaTesisDeGrado/PETROGRAFIA_Y_DIAGENESIS_GUACANEME.pdf
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2003). Morphometry. *Human Brain Function*, 1–21. <https://doi.org/10.1016/B978-012264841-0>
- Astm, & International, A. (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM Standard Guide, D5521-5*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D2487-11>.
- Badía, D., Martí, C., Aznar, J. M., & León, J. (2013). Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments. *Geoderma*, 193–194, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.020>
- Banco Mundial. (2012). Gestión del riesgo de desastres en Colombia. Retrieved from <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>
- Binjolkar, P., & Keshari, A. K. (2012). Estimating geomorphological parameters using GIS for tilaiya reservoir catchment. *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division*, 88(AUG.), 21–26. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-41849125643&partnerID=tZOTx3y1>
- Birkeland, P. W. (2005). *Soils and geomorphology*. Oxford: Oxford University Press.
- Braja M, D. (2010). *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA* (4ta ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 28–61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Camara de Comercio de Medellín para Antioquia. (2015). Perfil Socioeconómico de la Subregión de Occidente. *Estudios Económicos*, 38. Retrieved from http://www.camaramedellin.com.co/site/Portals/0/Documentos/2017/Publicaciones-regionales/15-3Perfil Occidente_Oct14.pdf
- Cárdenas, J., & Restrepo, C. (2010). Patrimonio Geológico Y Patrimonio Minero De La Cuenca del Suroeste Antioqueño. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 91–102.
- Cardona, B. L. (2014). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Universidad*

de San Carlos de Guatemala, 8. Retrieved from [http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos b%C3%A1sicos de Morfometr%C3%ADa de Cuencas Hidrogr%C3%A1ficas.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos_b%C3%A1sicos_de_Morfometr%C3%ADa_de_Cuencas_Hidrogr%C3%A1ficas.pdf)

Carvajal, J. H. (2011). Propuesta de estandarizaci3n de la cartograf%C3%ADa geomorfol3gica en Colombia.

Casali, N. (2013). Geomorfolog%C3%ADa aplicada, 1–17. Retrieved from <http://www0.unsl.edu.ar/~geo/materias/geomorfologia/teorias/20xx/TG1screen.pdf>

CEPAL. (2013). Recursos naturales: situaci3n y tendencias para una agenda de desarrollo regional en Am3rica Latina y el Caribe. Contribuci3n de la Comisi3n Econ3mica para Am3rica Latina y el Caribe a la Comunidad de Estados Latinoamericanos y Caribe%C3%B1os. *United Nations , CEPAL, I*.

Chavan, S. R., & Srinivas, V. V. (2015). Effect of DEM source on equivalent Horton-Strahler ratio based GIUH for catchments in two Indian river basins. *Journal of Hydrology*, 528, 463–489. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.049>

CORANTIOQUIA. (2012). Administraci3n Integral del Patrimonio Ambiental. *Actua, Plan de Acci3n 2012-2015*, 89. Retrieved from http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/SiteAssets/Lists/AdministrarContenidos/AllItems/PLAN_DE_ACCION_CORANTIOQUIA_2012-2015.pdf

Deere, D., & Patton, F. (1971). Slope stability in residual soils. Retrieved from [http://washington.edu/harney/1971 Deere Patton.pdf](http://washington.edu/harney/1971%20Deere%20Patton.pdf)

Empresas p3blicas de Concordia. (2000). *Evaluaci3n de la capacidad actual del embalse la Nitrrera*. Universidad Nacional de Colombia.

Esmed, D., & Ismad, Z. (2006). Quantifying the rainfall-water level fluctuation process in a geologically complex Lake catchment., 491–506.

Fallis, A. . (2013). Geomorphic Setting, Aquatic Habitat, and Water-Quality Conditions of the Molalla River, Oregon. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 7–10. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

FAO. (2007). Conservaci3n de los recursos naturales para una Agricultura sostenible, 34. Retrieved from http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/cp/introduction.pdf

FAO. (2017). Portal de Suelos de la FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

Fern%C3%A1ndez-Salas, L. M., Lobo, F. J., Sanz, J. L., D%C3%ADaz-del-R%C3%ADo, V., Garc%C3%ADa, M. C., & Moreno, I. (2007). Morphometric analysis and genetic implications of pro-deltaic sea-floor undulations in the northern Alboran Sea margin, western Mediterranean Basin. *Marine Geology*, 243(1–4), 31–56. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.04.013>

Fern%C3%A1ndez, T., Irigaray, C., El Hamdouni, R., & Chac3n, J. (2008). Correlation between natural slope angle and rock mass strength rating in the Betic Cordillera, Granada, Spain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0118-x>

Florez, D. (2015). ESTUDIO DE LA VEGETACI3N NATIVA: SIERRA CHICA DE, 41(2), 427–444. <https://doi.org/10.18172/cig.2710>

Forneron, C. F., Piccolo, M. C., & Carbone, M. E. (2010). An%C3%A1lisis morfom3trico de la laguna

- Sauce Grande (Argentina). *Huellas* N^o, 14(2010), 11–30.
- Gobernacion de Antioquia. (2016). Regiones de Antioquia. Retrieved from <http://antioquia.gov.co/index.php/suroeste>
- Gobernación de Antioquia. (2015). Anuario Estadístico de Antioquia 2014, 1–7. Retrieved from http://antioquia.gov.co/planeacion/ANUARIO_2014/anuario-estadistico-de-antioquia-2014.html
- Gonzalez, F., & Soto, V. (2010). Estudio áreas de riesgo geomorfológico de la zona urbana y de expansión de la comuna de san antonio, v región. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100669>
- González, M., & Segat, a. (2000). Reacción del suelo. *Principios de Edafología*, Retrieved from <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BIBUNFA.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=018862>
- Hashimoto, A., Oguchi, T., Hayakawa, Y., Lin, Z., Saito, K., & Wasklewicz, T. A. (2008). GIS analysis of depositional slope change at alluvial-fan toes in Japan and the American Southwest. *Geomorphology*, 100(1–2), 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.027>
- Hernani T., Al., & Ramírez, J. J. (2012). Aspectos Morfométricos y Teóricos de un Embalse Tropical de Alta Montaña Represa La Fe, El Retiro, Colombia. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*. Retrieved from http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_26/101/511-518.pdf
- Herrera, J., & Toro, M. I. (2000). *Lineamientos de la dimension fisica para el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Concordia, Antioquia* (1era ed.). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Hinds, A., Legler, B., Cravens, G., Cunningham, B., Distefano, R., Draper, T., ... Rimer, R. (2013). WATERSHED INVENTORY AND ASSESSMENT.
- Hombres, L., Boelens, R., & Maat, H. (2016). Contested hydrosocial territories and disputed water governance: Struggles and competing claims over the Ilisu Dam development in southeastern Turkey. *Geoforum*, 71(March 2007), 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2016.02.015>
- Huggett, R. J. (2007). *FUNDAMENTALS OF GEOMORPHOLOGY* (Secind Edi). Retrieved from http://www.cec.uchile.cl/~fegallar/Fundamentals_of_Geomorphology.pdf
- I.N.V.E. (2008). COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS I.N.V. E – 152 – 07 1., 1–11.
- I.N.V.E–123. (2013). Análisis granulométrico de suelos por tamizado. I.N.V. E - 123 - 13, (200), 2–7. Retrieved from http://www.invias.gov.co/index.php/hechos-de-transparencia/informacion-financiera-y-contable/cat_view/11-documentos-tecnicos/68-especificaciones-generales-de-construccion-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras
- I.N.V.E–125. (2013). Determinación del límite líquido de los suelos, 13. Retrieved from ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma INV E-125-07.pdf
- I.N.V.E–126. (2007). Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V.E -126-07). *Especificaciones Técnicas*, 7. Retrieved from

ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma INV E-126-07.pdf

- Ibáñez, J. J. (2006). Toposecuencias: Estructura Edafogeomorfológica de las Laderas.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad Politécnica de Valencia*, 12. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfología de una cuenca.pdf>
- Ibáñez, Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Métodos para la determinación del tiempo de concentración (t_c) de una cuenca hidrográfica, 9. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo de concentraci?n.pdf>
- Ibisate González de Matauco, A. (2004). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA Y DE LA RED DE DRENAJE DEL RÍO ZADORRA Y SUS AFLUENTES APLICADO A LA PELIGROSIDAD DE CRECIDAS. *Boletín de La A.G.E.*, 311–329.
- ICONTEC. (2006). CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA DE CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS) E:
- ICONTEC. (2008). CALIDAD DE SUELO. DETERMINACIÓN DEL PH, (571).
- IDEAM. (2011). PROMEDIO VARIACION CLIMATOLOGICA EN MUNICIPIOS COLOMBIANOS. Bogotá, Colombia: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.
- IDEAM. (2013). Boletín climatológico mensual 2013.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*.
- IDEAM. (2016). Catálogo de estaciones Hidrometeorológicas. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/geoportal>
- IDEAM. (2012). Boletín climatológico 2012, (Gráfico 13).
- IDEAM. (2015). Boletín Climatológico Mensual 2014, (1), 1–7.
- IDEAM. (2016). Boletín Climatológico Mensual 2015. Retrieved from http://www.estadistica.jcyl.es/web/jcyl/Estadistica/es/Plantilla100/1284526391854/_/_/_
- IDEAM. (2017a). Boletín Climatológico Mensual 2016.
- IDEAM. (2017b). Boletín Climatológico Mensual Agosto 2017. Retrieved from <https://www.acicam.org/innovacion-para-tus-pies/iflseici-julio-de-2015>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). MEJORA DE LOS SISTEMAS DE CARTOGRAFÍA DEL TERRITORIO COLOMBIANO. Retrieved from ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/SIG/SIG_Modulo.pdf
- Integral S.A. (1986). *Acueducto de Concordia. Informe final de diseño, ACUANTIOQUIA (acueductos y alcantarillados de Antioquia), Concordia, Antioquia*.
- INVE 122-07 (NTC 1495). (2007). Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo - agregado, 8.
- Invias. (2007). Determinación Del Contenido Orgánico En Suelos Mediante Pérdida Por Ignición I.N.V. E – 121 – 07, 4–6.
- Irisarri, J. A. (2014). LOS FACTORES FORMADORES DE SUELO CLIMA Y BIOTA. LA

PEDOGÉNESIS DE LOS ARIDISOLES, MOLISOLES Y ANDISOLES, SPODOSOLES Y LOS INTERGRADOS EN LA PATAGONIA ARGENTINA, 2014.

- Jardi, M. (1985). Analisis de las variables morfométricas que nos la definen, *XIX*, 41–68.
- Jongerden, J. (2012). Dams and politics in Turkey: utilizing water, developing conflict. *JOURNAL ESSAY*. Retrieved from <http://mepc.org/journal/middle-east-policy-archives/dams-and-politics-turkey-utilizing-water-developing-conflict>
- Korres, W., & Scheider, K. (2017). GIS for Hydrology. In *Comprehensive Geographic Information Systems*, 51–80. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09635-4>.
- Lamelas, M. T., Hoppe, A., de la Riva, J., & Marinoni, O. (2009). Modelling environmental variables for geohazards and georesources assessment to support sustainable land-use decisions in Zaragoza (Spain). *Geomorphology*, *111*(1–2), 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.10.021>
- Lejon, A. G. C., Renöfält, B. M., & Nilsson, C. (2009). Conflicts associated with dam removal in Sweden. *Ecology and Society*, *14*(2). Retrieved from <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art4/>
- Liu, J., & Shi, Z. wu. (2017). Quantifying land-use change impacts on the dynamic evolution of flood vulnerability. *Land Use Policy*, *65*(October 2016), 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.012>
- Lykoudi, E., & Angelaki, M. (2014). Contribution of the morphometric parameters of an hydrographic network to the investigation of the neotectonic activity: An application to the upper Acheloos. *Bulletin of the Geological Society of Greece (Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki)*, *XXXVI*(April), 1084–1092.
- Marini, M. F., & Piccolo, M. C. (2005). Hidrogeomorfología de la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, (37), 59–71. <https://doi.org/10.14198/INGEO2005.37.04>
- Martel, A. B. (2013). ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA. Retrieved from <http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>
- Másmela Díaz, P. (2015). EL PAISAJE COMO ELEMENTO DE LA ORDENACIÓN TERRITORIAL. UN ANÁLISIS DE PAISAJE DESDE SU ENFOQUE VISUAL EN EL BORDE CENTRO ORIENTAL DE MEDELLÍN, COLOMBIA, 30–34. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mata, F. J. S., & González, D. M. S. (2011). Estudio hidrogeomorfológico y análisis sedimentológico de la sección alta de la cuenca del río aranjuez hydrogeomorphological study and sedimentological analysis in the upper section of the aranjuez river basin. *Revista Geográfica de América Central*, 1–43. Retrieved from www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/download/3675/3530
- McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2005). Basic Soil Properties. *Soil and Water*, 1–12. Retrieved from http://landresources.montana.edu/SWM/PDF/Final_proof_SW1.pdf
- MINAMBIENTE. (2017). Huella Hídrica. Retrieved from <http://www.aclimatecolombia.org/huella-hidrica/>
- Ministerio de ambiente y desarrollo Sostenible. (2014). Guía técnica para la formulación de planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas POMCAS. Anexo A: Diagnóstico. *Guía*

Técnica Para La Formulación de Planes de Ordenación Y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS, 112. Retrieved from <https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/cuencas-hidrograficas/Guia-Tecnica-para-la-formulacion-de-planos-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas-hidrograficas-POMCAS.pdf>

- Mora, C. G. (2011). Petrografía y diagénesis a partir de núcleos de perforación de las rocas sedimentarias de la cuenca san juan, chocó.
- Muleta, M. K., & Nicklow, J. W. (2010). Decision Support for Watershed Management Using Evolutionary Algorithms. *Water Resources*, 131(1), 35–44. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131)
- Napieralski, J., Harbor, J., & Li, Y. (2007). Glacial geomorphology and geographic information systems. *Earth-Science Reviews*, 85(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.06.003>
- NATO. (2016). Distribution water. Retrieved from <http://www.nato.int/cps/en/natohq/index.htm>
- Negasa, T., Ketema, H., Legesse, A., Sisay, M., & Temesgen, H. (2017). Variation in soil properties under different land use types managed by smallholder farmers along the toposequence in southern Ethiopia. *Geoderma*, 290, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.021>
- Niño, O. (2015). IDENTIFICACIÓN DE CORRELACIONES ENTRE LA CARGA DE LAVADO Y ALGUNOS PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS Y DE USO DE SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CAUCA. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/51531/>
- Núñez, L., Triana, J. V., Verdugo, N., German, S., & Martínez, O. (2014). Informe batimetría lago de tota. *IDEAM*, 39.
- Okewale, I. A., & Coop, M. R. (2017). A study of the effects of weathering on soils derived from decomposed volcanic rocks. *Engineering Geology*, 222, 53–71. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.014>
- Ortega, J. (2002). *Evaluación de la capacidad actual del embalse la nitrera en el municipio de Concordia. Universidad Nacional de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Patiño, G., Alejandro, J., Rivillas, A., & Gallego, J. J. (2011). ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO EN EL ORIENTE CERCANO A MEDELLÍN , COMO APOYO A LA BÚSQUEDA DE ACTIVIDAD TECTÓNICA RECIENTE. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 39–54. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/29249/39423>
- Petar Dokmanovic, I. J. (2013). Hydrogeological risk factors of dam and reservoir construction - a case example “ Bogovina ”. *RMZ-Materials and Geoenvironment*, 50(1), 105–108. Retrieved from http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz50/rmz50_0105-0108.pdf
- Petts, G. E., & Gurnell, A. M. (2010). Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Geomorphology*, 71(1–2), 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.02.015>
- Phillips, J. D. (2015). The robustness of chronosequences. *Ecological Modelling*, 298, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.018>
- Phillips, J. D. (2016). Landforms as extended composite phenotypes, 26(July 2015), 16–26. <https://doi.org/10.1002/esp.3764>

- Piñeiro Toro, D. A. (2015). PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ: ANÁLISIS DE LAS RELACIONES SEDIMENTOLÓGICAS CON EL ABANICO ALUVIAL. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137682/Procesos-hidrogeologicos-en-la-cuenca-de-la-Quebrada-de-Tarapaca.pdf?sequence=1>
- Pirris, D. E. L. R. Í. O., & Rica, C. (2011). FACTORES FORMADORES Y DISTRIBUCIÓN DE SUELOS DE LA SUBCUENCA, 35(1), 33–57.
- Poggio, L., & Gimona, A. (2017). 3D mapping of soil texture in Scotland. *Geoderma Regional*, 9, 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.11.003>
- Racca, J. M. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de Modelos Digitales del Terreno. *Boletín Del Instituto de Fisiografía Y Geología*, 77, 31–38.
- Remondo, J., & Oguchi, T. (2009). GIS and SDA applications in geomorphology. *Geomorphology*, 111(1–2), 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.04.015>
- Restrepo, J. D. (2015). Causa Naturales y Humanas de la erosion en la cuenca del rio Magdalena, 1–24. Retrieved from <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/kolumbien/11633.pdf>
- Rincon, P. (2010). Aplicación de índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente en el antepaís Bético. *Geogaceta*, 139–142. Retrieved from <http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo27/Art35.pdf>
- Rojó, J. (2014). Estudio Topohidráulico e Hidrológico sobre el Río Altar, 1–15. Retrieved from <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8417/Capitulo3.pdf>
- Sala, M. (2010). Geomorfología actual: guía conceptual , tematica y bibliografica. *Revista Geografía*, 6, 218–220. Retrieved from <http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45984/56810>
- Sanchez San Roman, J. (2015). Medir Areas y longitudes. *Departamento de Geología*, 1–4. Retrieved from http://hidrologia.usal.es/Complementos/Medir_Areas.pdf
- Schaetzl, R. J. (1991). A lithosequence of soils in extremely gravelly, dolomitic parent materials, bois blanc island, lake huron. *Geoderma*. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90050-4)
- Schaetzl, R. J., & Anderson, S. (2011). *Soils Genesis and Geomorphology*. (Cambridge University Press, Ed.). New York. Retrieved from <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-schaetzlsoils2005.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2016). Hidrogeología, 2–6. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157801/Hidrogeologia.pdf>
- Slaymaker, O. (1980). *Geomorphic field experiments. Inventory and prospect* (35th ed.). Geomorphic , suppl.
- Sociedad Geológica de España. (2010). Aplicación de índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente en el antepaís Bético. *Geogaceta*, 27. Retrieved from <http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo27/Art35.pdf>
- Souza, Z. M. De, Siqueira, D. S., & Pereira, T. (2012). Discrimination of geomorphic surfaces with multivariate analysis of Análise multivariada de atributos do solo na discriminação de

superficies, 429–438.

- Spalletti, L. A. (2001). Evolución de las cuencas sedimentarias. *En El Sistema Triásico En La Argentina, cap. 5*(February), 81–101. Retrieved from e:/LUCAS FIORELLI/BDD/..pdf
- Stewart raf, D. I. (2014). Water Conflict in Central Asia – Is There Potential for the Desiccation of the Aral Sea or Competition for the Waters of Kazakhstan’s Cross-Border Ili and Irtysh Rivers to Bring about Conflict; and Should the UK be Concerned? *Defence Studies, 14*(1), 76–109. <https://doi.org/10.1080/14702436.2014.890336>
- Sunkar, M., & Tonbul, S. (2011). Hydrographic analysis of Iluh River (Batman) in relation to flood and torrent events. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 19*, 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.167>
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., & Cuevas, C. R. (2015). The hydrodynamic modelling for the water management of el Guájaro Reservoir, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería, 162*–173. Retrieved from https://www.scipedia.com/public/Torres-Bejarano_et_al._2015a
- Torres Buesaquillo, J., & Téllez Páez, C. R. (2016). CÁLCULO DEL CAUDAL MÁXIMO DE CRECIENTE EN LA QUEBRADA NEGRA HASTA LA DESEMBOCADURA EN LA QUEBRADA BURIBURI MUNICIPIO DE OTANCHE DEPARTAMENTO DE BOYACÁ CON ANÁLISIS DE GEOLOGÍA REGIONAL. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4127/1/TorresBuesaquilloJessica2016.pdf>
- Tucker, G. E., Andrea, F., & LBras, R. R. (2010). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *ELSEVIER*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00056-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00056-8)
- Unidad Nacional para la gestion del Riesgo. (2013). *Para la Gestión del Riesgo de Desastres*. Retrieved from <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>
- Universidad de los Andes Venezuela. (2013). Capítulo 4 GEOMORFOLOGIA DE CUENCAS. Retrieved from <http://ula.ve/ingenieria/oguerre/Geomorfologia.pdf>
- Uribe, R. (1996). *Parque Ecológico la Nitrera*. Concordia.
- Varela, R. (2014). Manual de geología. *Centro de Investigaciones Geológicas, 21*, 109–120. Retrieved from http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_21/primeras_paginas.htm
- Verdú, J. (2003). Análisis y modelización de la respuesta hidrológica y fluvial de una extensa cuenca de montaña mediterránea (río Isábena, Pre-Pirineo). *Departament de Medi Ambient I Ciències Del Sòl Anàlisis, 298*. Retrieved from <https://repositori.udl.cat/handle/10803/8233>
- Villarroel, M. (2013). Determinación de parámetros y características hidrogeomorfológicas de una cuenca. *Centro de Levantamientos Aeroespaciales Y Aplicaciones SIG Para El Desarrollo Sostenible de Los Recursos Naturales (CLAS), 8*. Retrieved from https://www.itc.nl/ilwis/documentation/_pdf/hidromorfologia_sp.pdf
- Villón, M. (2014). *HIDROLOGÍA*. (E. Villón, Ed.) (2nd ed.). Lima, Perú.
- Weil, R., & Brady, N. (2016). *The Nature and properties of soils*. (PEARSON, Ed.) (15th ed., Vol. 15). Retrieved from <http://lccn.loc.gov/2016008568>
- Werner, J. (1996). *Introducción a la hidrogeología*. (Universidad Autónoma de Nuevo León, Ed.) (1st ed.). Linares Nuevo Mexico.

Wilkins, D. E., & Ford, R. L. (2007). Nearest neighbor methods applied to dune field organization: The Coral Pink Sand Dunes, Kane County, Utah, USA. *Geomorphology*, 83(1–2), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.009>

Wilson, S. G., Lambert, J. J., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. A. (2017). Soil genesis and mineralogy across a volcanic lithosequence. *Geoderma*, 285, 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.013>

ANEXOS

Anexo1: Granulometría

La prueba de granulometría se realizó bajo la norma INVIAS 123 en las tablas a continuación se reportan los datos obtenidos en laboratorio solo para 5 estaciones que representan todas las clases de muestras recolectadas, además del análisis estadístico para cada una de ellas así como una representación gráfica del análisis granulométrico de la densidad de partículas presentes.

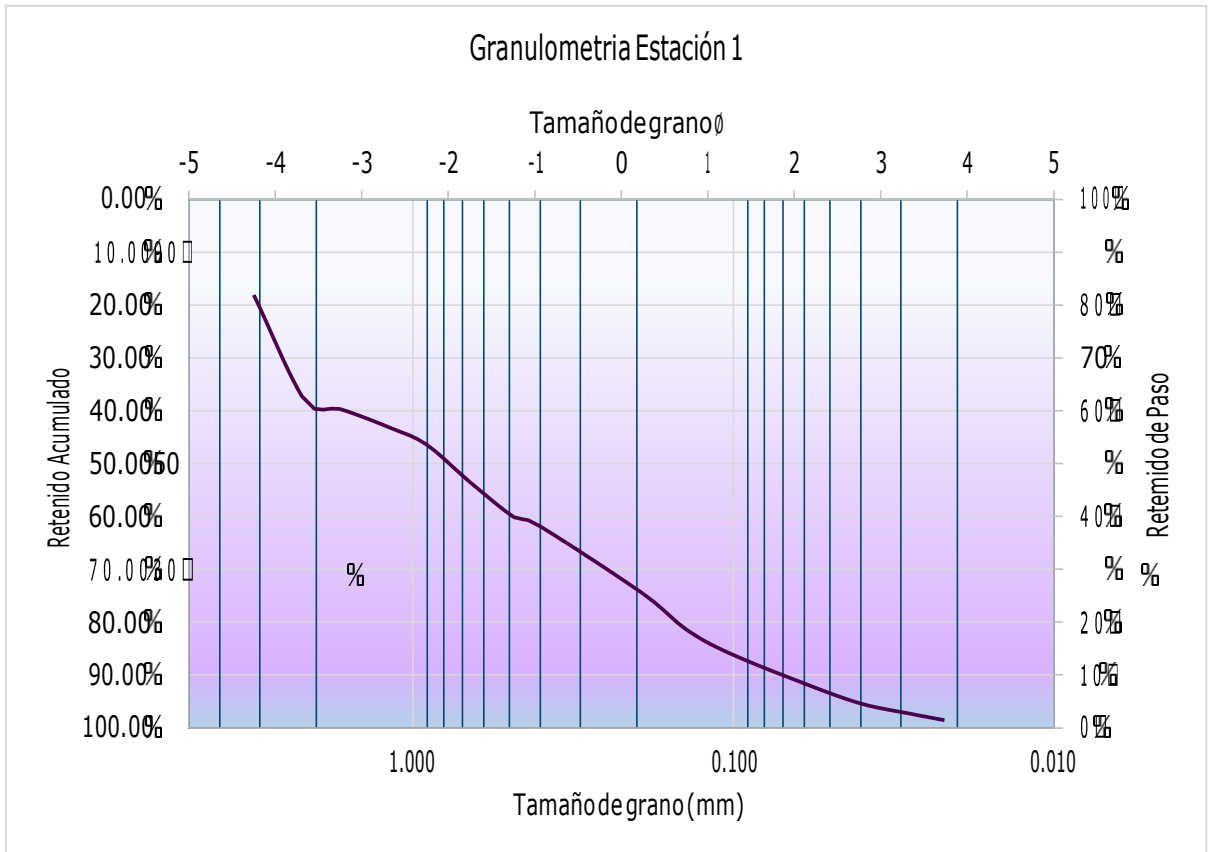
Tabla A.11. Reporte de datos Granulometría Estación 1

N° Tamiz	Diametro (mm)	Phi (-Log2)	Masa de suelo retenido (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido ac	Porcentaje paso acumulado
3/4	19.000	-4.24792751	9.9	18.10%	18.10%	82%
1/2	12.500	-3.64385619	11.1	20.29%	38.39%	62%
3/8	9.525	-3.25171909	0.7	1.28%	39.67%	60%
1/4	6.300	-2.65535183	2	3.66%	43.33%	57%
4	4.750	-2.24792751	1.7	3.11%	46.44%	54%
6	3.350	-1.74416111	3.9	7.13%	53.56%	46%
8	2.360	-1.23878686	3.6	6.58%	60.15%	40%
10	2.000	-1	0.6	1.10%	61.24%	39%
20	0.850	0.23446525	7.2	13.16%	74.41%	26%
30	0.595	0.74903843	3.8	6.95%	81.35%	19%

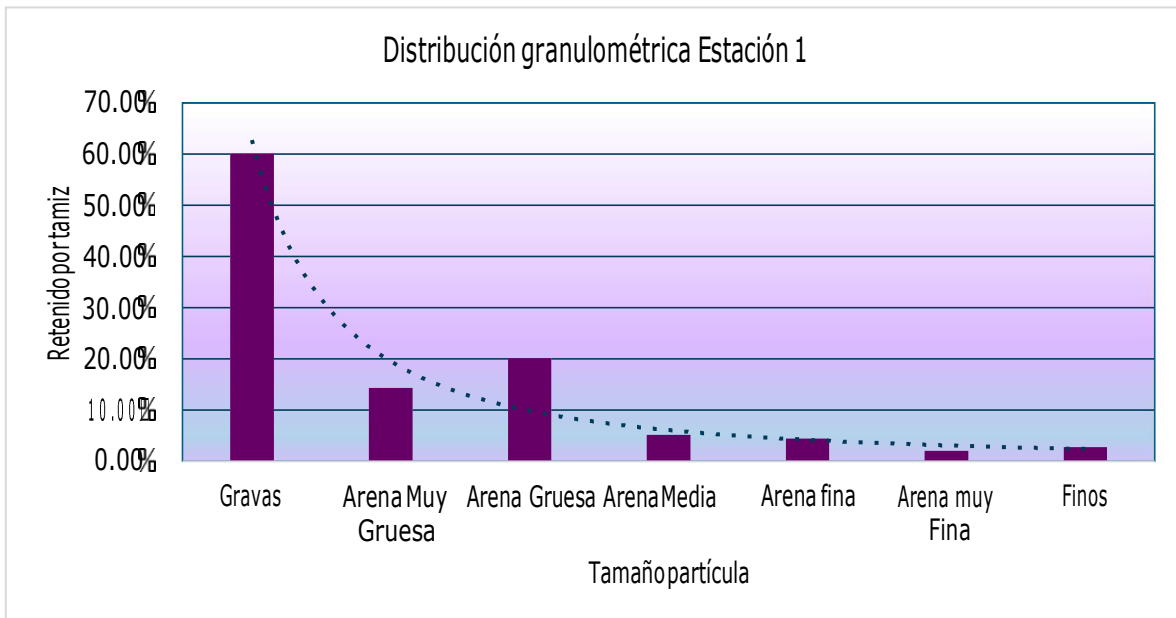
40	0.425	1.23446525	2.4	4.39%	85.74%	14%
60	0.250	2	2.8	5.12%	90.86%	9%
100	0.150	2.73696559	2.4	4.39%	95.25%	5%
140	0.100	3.32192809	1.1	2.01%	97.26%	3%
200	0.075	3.73696559	0.7	1.28%	98.54%	1%
Fondo			0.8	1.46%	100.00%	0%
						100%
	Peso Total		54.7			

Criterios Estadísticos

Percentiles				Análisis	
	D(mm)	D (Phi)		Promedio	1.309
5.0%	0.035	3.80		Coficiente de Variación	1.036
10.0%	0.800	1.80		Mínimo	0.02500
16.0%	0.150	1.00		Máximo	3.50000
30.0%	0.180	0.40		Rango	3.47500
50.0%	0.800	-2.10		Asimetría	0.91815
60.0%	1.500	-3.00		Curtosis	-0.8809
84.0%	3.000	-4.50		Índice de clasificación	1.2375
90.0%	3.100	-4.60		Media	1.3166
95.0%	3.500	-4.70	C.Curvatura	0.027	
			C.Uniformidad	1.875	



Grafica A.1.1 Granulometría Estación 1



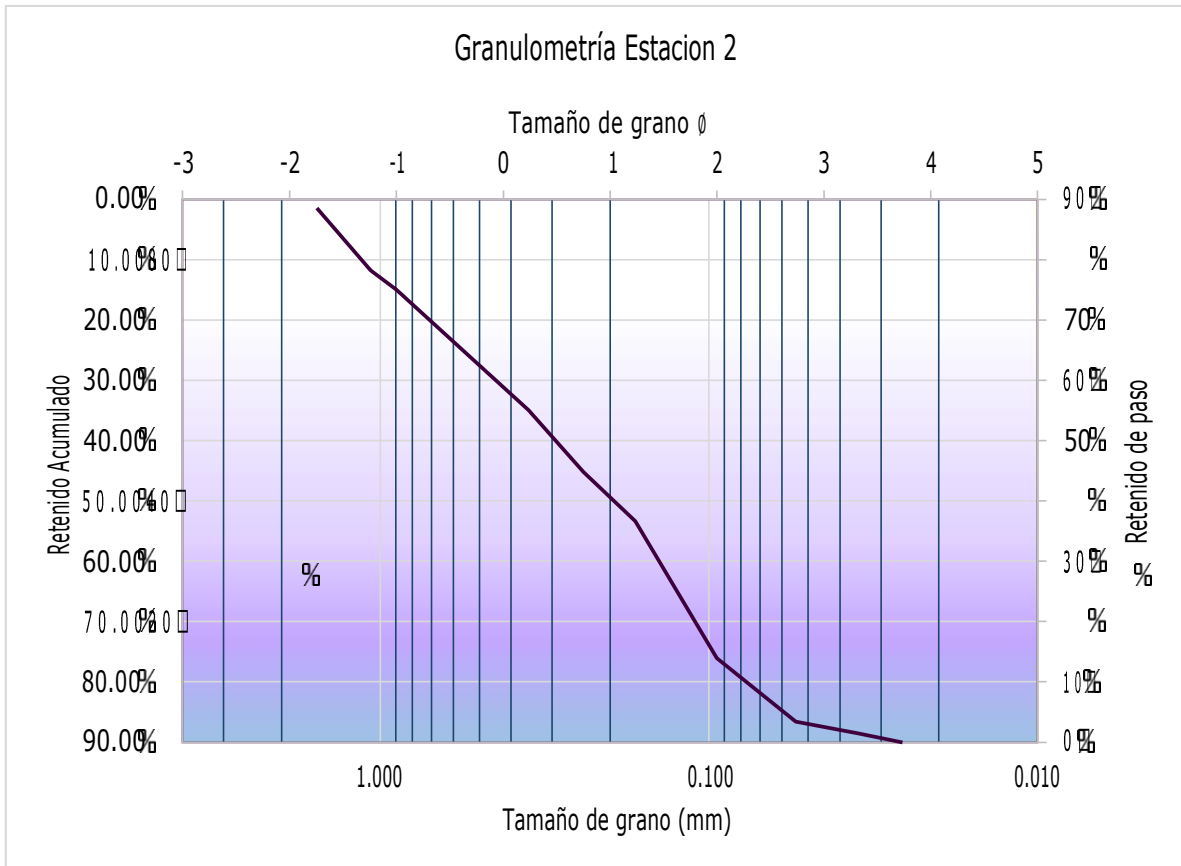
Grafica A.1.2. Distribución Granulométrica

ESTACIÓN 2

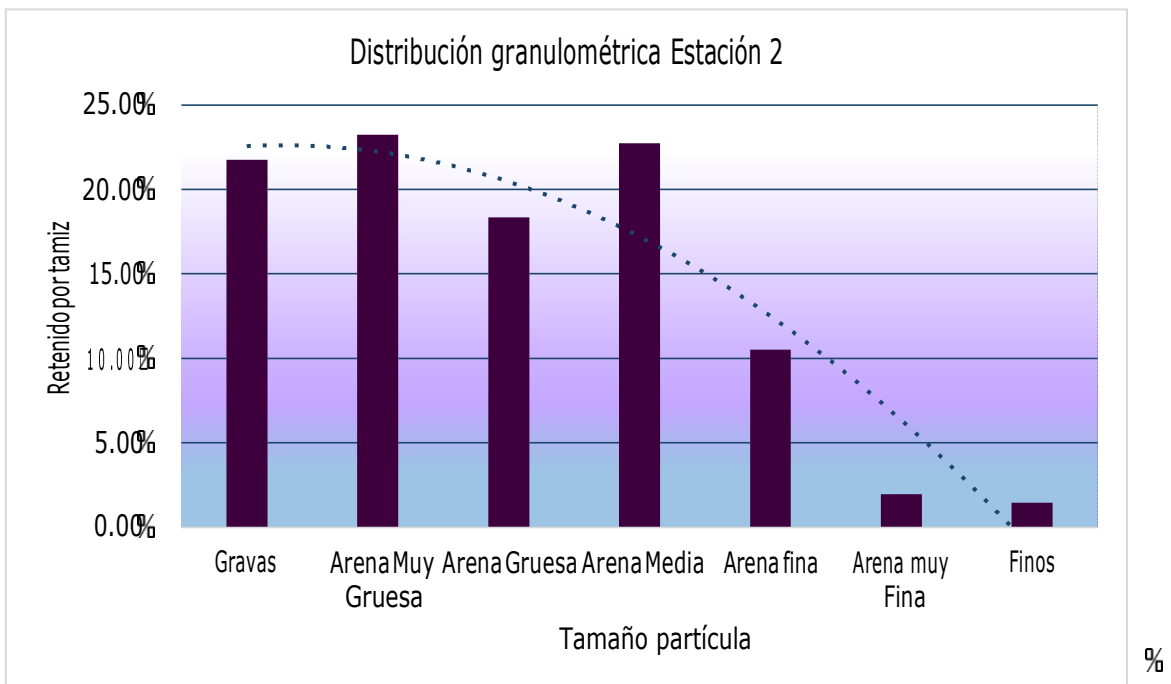
Tabla A.1.2. Reporte de datos Granulometría Estación 2

N° Tamiz	Diametro (mm)	Phi (-Log2)	Masa de suelo retenido (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido ac	Porcentaje paso acumulado
6	3.350	-1.74416	4.7	11.49%	11.49%	89%
8	2.360	-1.23879	4.2	10.27%	21.76%	78%
10	2.000	-1.00000	1.3	3.18%	24.94%	75%
20	0.850	0.23447	8.2	20.05%	44.99%	55%
30	0.595	0.74904	4.2	10.27%	55.26%	45%
40	0.425	1.23447	3.3	8.07%	63.32%	37%
60	0.250	2.00000	9.3	22.74%	86.06%	14%
100	0.150	2.73697	4.3	10.51%	96.57%	3%
140	0.100	3.32193	0.8	1.96%	98.53%	1%
200	0.075	3.73697	0.6	1.47%	100.00%	0%
Fondo			0.001	0.00%	100.00%	0%
						100%
	Peso Total		40.901			

Criterios Estadísticos						
Percentiles				Análisis		
	D(mm)	D (Phi)				
1.0%	0.027	3.50		Promedio	0.74882	
5.0%	0.070	2.60		Desviación Estándar	0.77190	
10.0%	0.090	2.20		Coficiente de Variación	1.03082	
16.0%	0.100	1.90		Mínimo	0.02700	
30.0%	0.150	1.50		Máximo	1.90000	
50.0%	0.300	0.60		Rango	1.87300	
60.0%	0.400	-0.10		Asimetría	0.75200	
84.0%	1.200	-1.40		Curtosis	-1.12298	
90.0%	1.700	-1.70		Índice de clasificación	0.53712	
95.0%	1.800	-1.80		Media	0.53333	
99.0%	1.900	-1.90		C.Curvatura	0.625	
				C.Uniformidad	4.44	



Grafica A.1.3. Granulometría Estación 2

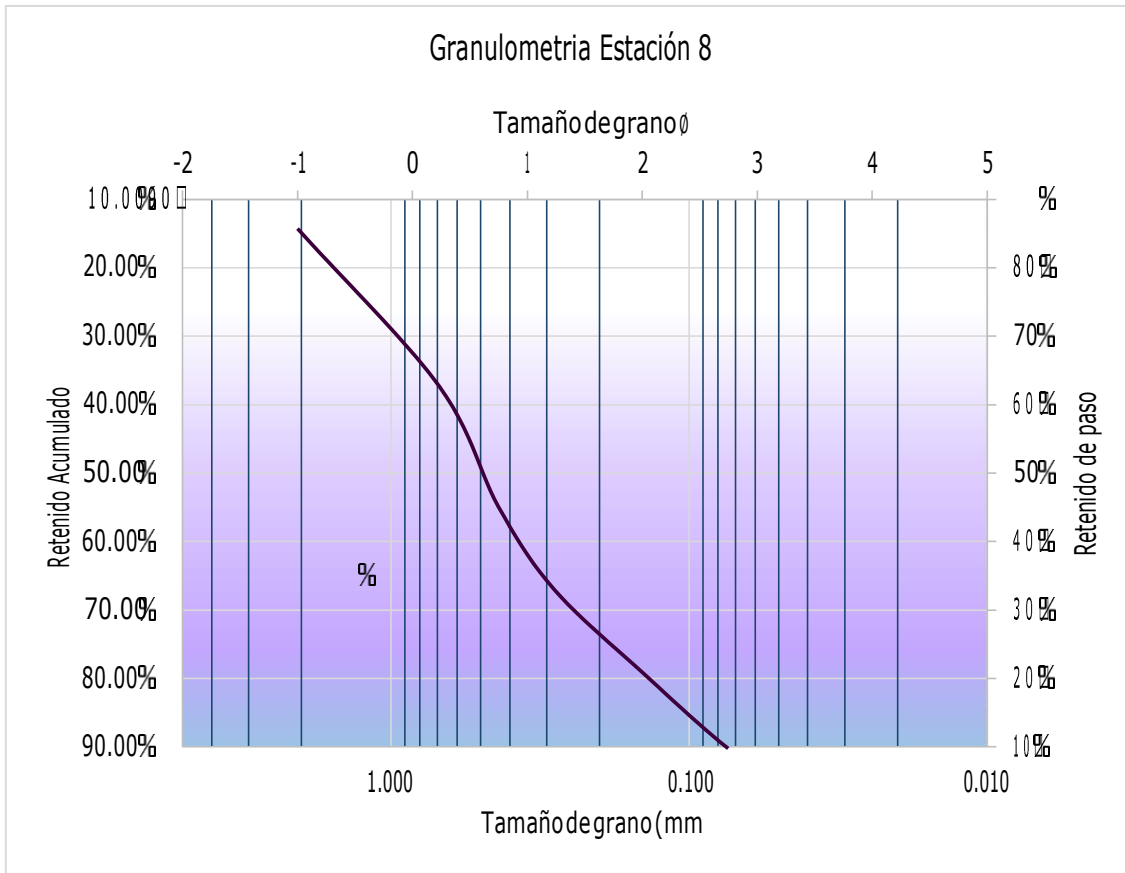


Grafica A.1.4. Distribución Granulométrica

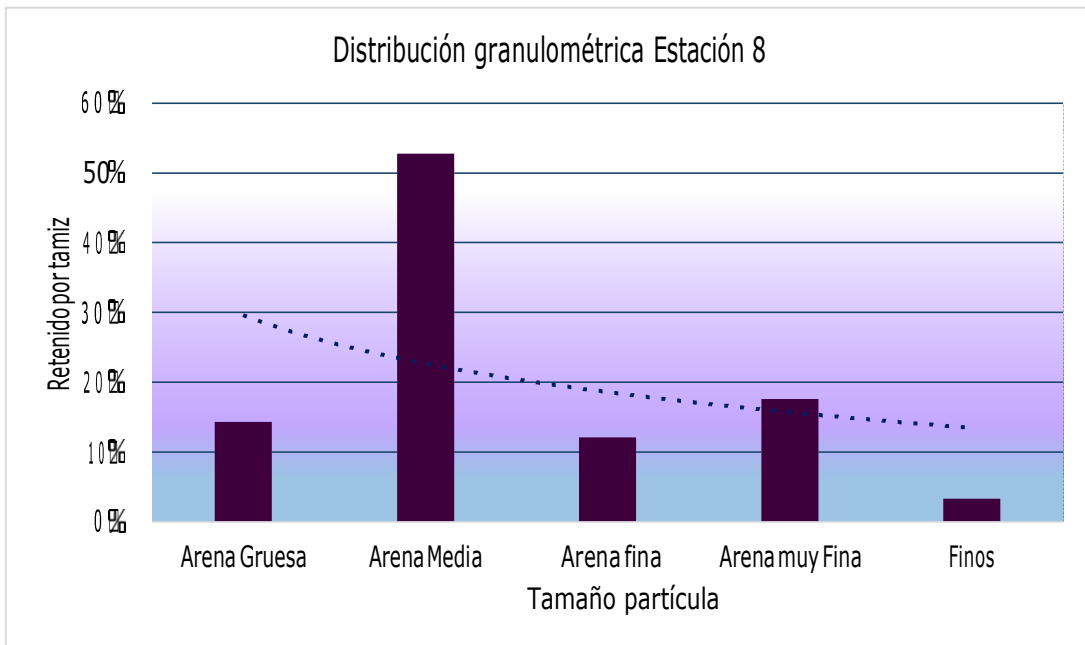
ESTACIÓN 8

Tabla A.1.3. Reporte de datos Granulometría Estación 8

Nº Tamiz	Diámetro (mm)	Phi (-Log2)	Masa de suelo retenido (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido ac	Porcentaje paso acumulado
10	2.000	-1.00000	1.3	14.29%	14.29%	86%
20	0.850	0.23447	2.1	23.08%	37.36%	63%
30	0.595	0.74904	1.6	17.58%	54.95%	45%
40	0.425	1.23447	1.1	12.09%	67.03%	33%
60	0.250	2.00000	1.1	12.09%	79.12%	21%
100	0.150	2.73697	1	10.99%	90.11%	10%
140	0.100	3.32193	0.6	6.59%	96.70%	3%
200	0.075	3.73697	0.3	3.30%	100.00%	0%
Fondo			0	0.00%	100.00%	0%
						100%
Peso Total			9.1			
Criterios Estadísticos						
Percentiles				Análisis		
	D(mm)	D (Phi)		Promedio	0.93636	
1.0%	0.060	2.95		Desviación Estándar	0.89748	
5.0%	0.070	2.80		Coefficiente de Variación	0.95847	
10.0%	0.080	2.70		Mínimo	0.06000	
16.0%	0.130	2.20		Máximo	1.97000	
30.0%	0.180	1.80		Rango	1.91000	
50.0%	0.500	0.60		Asimetría	0.29780	
60.0%	0.740	0.40		Curtosis	-1.53224	
84.0%	1.900	-0.80		Índice de clasificación	0.72886	
90.0%	1.950	-0.90		Media	0.84333	
95.0%	1.960	-0.95		C.Curvatura	0.5472	
99.0%	1.970	-1.00		C.Uniformidad	9.25	



Grafica A.1.5 Granulometría Estación 8



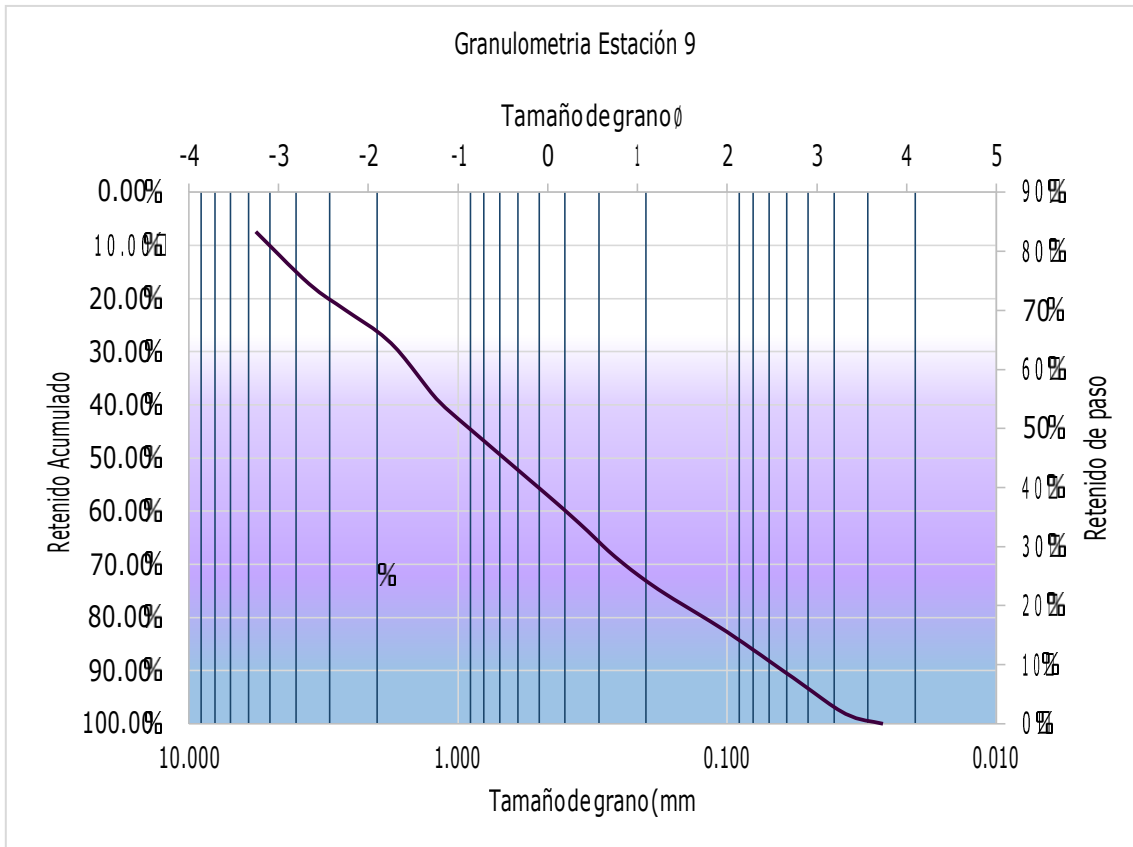
Grafica A.1.6 .Distribución Granulométrica

ESTACIÓN 9

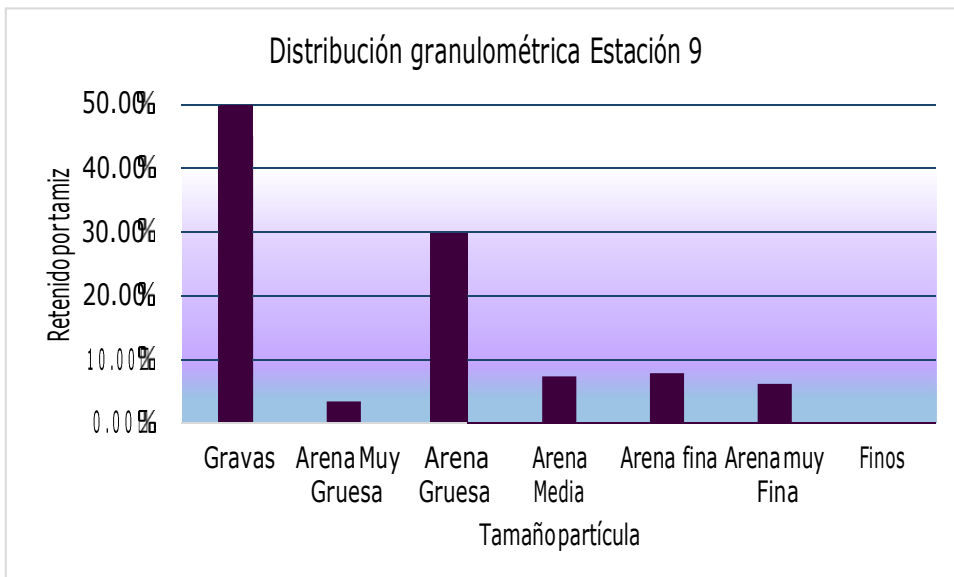
Tabla A.14. Reporte de datos Granulometría Estación 9

N° Tamiz	Diametro (mm)	Phi (-Log2)	Masa de suelo retenido (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido ac	Porcentaje paso acumulado
3/8	9.525	-3.25171909	3.000	16.66%	16.66%	83%
1/4	6.300	-2.65535183	1.600	8.88%	25.54%	74%
4	4.750	-2.24792751	0.800	4.44%	29.98%	70%
6	3.350	-1.7441611	1.000	5.55%	35.53%	64%
8	2.360	-1.23878686	1.700	9.44%	44.97%	55%
10	2.000	-1	0.600	3.33%	48.30%	52%
20	0.850	0.23446525	2.900	16.10%	64.41%	36%
30	0.595	0.74903843	1.310	7.27%	71.68%	28%
40	0.425	1.23446525	1.000	5.55%	77.23%	23%
60	0.250	2	1.300	7.22%	84.45%	16%
100	0.150	2.73696559	1.400	7.77%	92.22%	8%
140	0.100	3.32192809	1.100	6.11%	98.33%	2%
200	0.075	3.73696559	0.300	1.67%	99.99%	0%
Fondo			0.001	0.01%	100.00%	0%
						100%
Peso Total			18.011			

Criterios Estadísticos				
Percentiles		D (Phi)	Analisis	
	D(mm)			
1.0%	0.025	3.90	Promedio	1.92318
5.0%	0.030	3.10	Desviación Estándar	2.01620
10.0%	0.060	2.70	Coefficiente de Variación	1.04837
16.0%	0.090	2.10	Mínimo	0.02500
25.0%	0.150	1.50	Máximo	4.40000
50.0%	0.900	-1.00	Rango	4.37500
60.0%	1.500	-1.34	Asimetría	0.35802
84.0%	4.000	-3.10	Curtosis	-1.49499
90.0%	4.200	-3.11	Índice de clasificación	1.62447
95.0%	4.300	-3.12	Media	1.66333
99.0%	4.400	-3.13	C.Curvatura	0.25
			C.Uniformidad	25



Grafica A.1. 7. Granulometría Estación 9



Grafica A.1.8 . Distribución Granulométrica

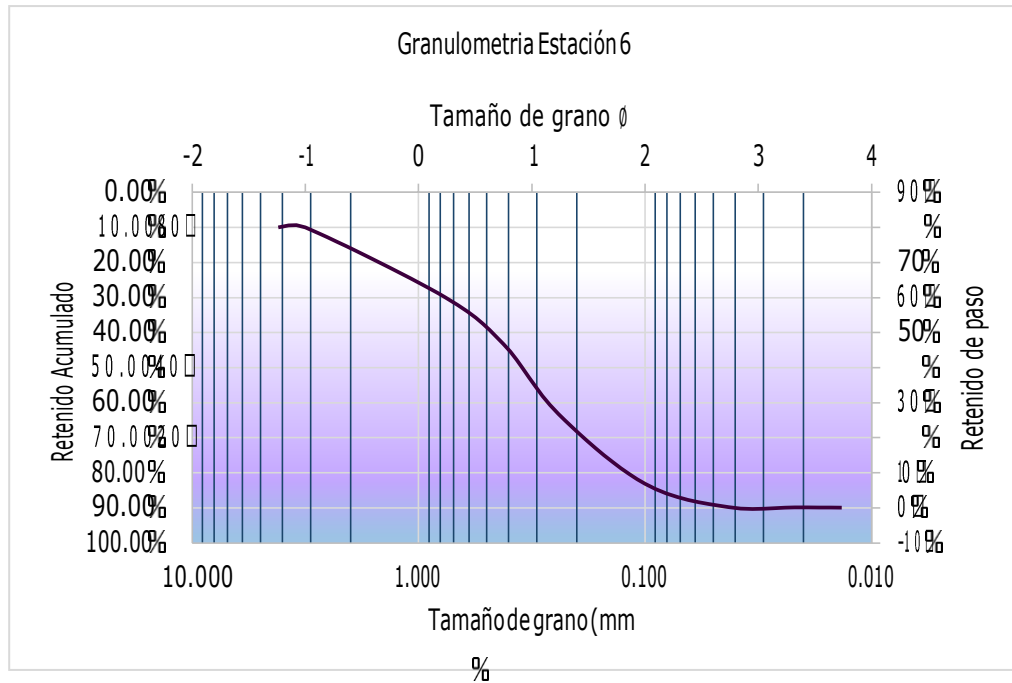
ESTACION 6

Tabla A.1.5. Reporte de datos Granulometría Estación 6

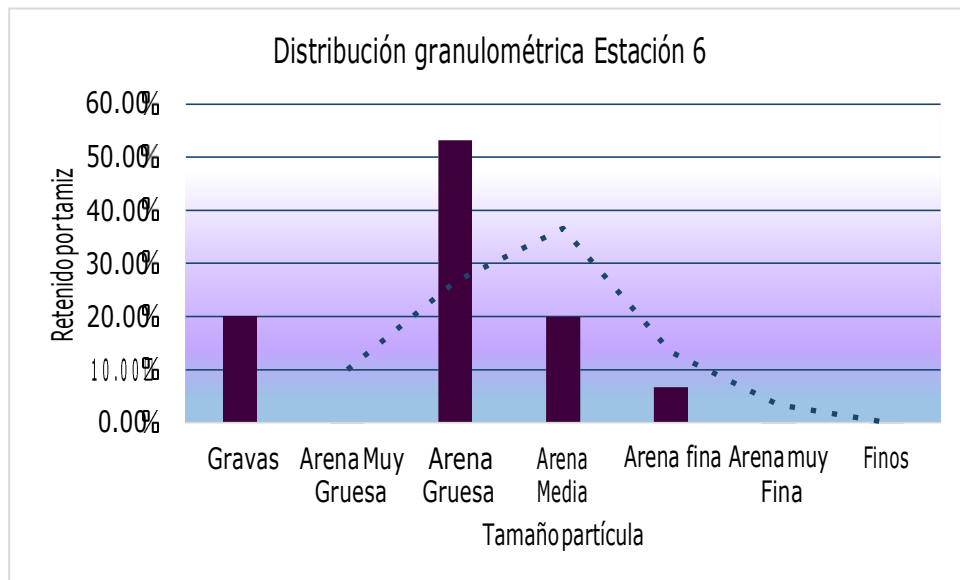
N° Tamiz	Diametro (mm)	Phi (-Log2)	Masa de suelo retenido (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido ac	Porcentaje paso acumulado
8	2.360	-1.23878686	0.3000	19.96%	19.96%	80%
10	2.000	-1	0.0001	0.01%	19.97%	80%
20	0.850	0.23446525	0.3000	19.96%	39.92%	60%
30	0.595	0.74903843	0.2000	13.31%	53.23%	47%
40	0.425	1.23446525	0.3000	19.96%	73.19%	27%
60	0.250	2	0.3000	19.96%	93.15%	7%
100	0.150	2.73696559	0.1000	6.65%	99.80%	0%
140	0.100	3.32192809	0.0010	0.07%	99.87%	0%
200	0.075	3.73696559	0.0010	0.07%	99.93%	0%
Fondo			0.0010	0.07%	100.00%	0%
						100%
Peso Total			1.5031			

Criterios Estadísticos

Percentiles				Análisis	
	D(mm)	D (Phi)			
1.0%	0.025	3.90		Promedio	1.44227
5.0%	0.060	2.70		Desviación Estándar	1.46082
10.0%	0.150	1.90		Coefficiente de Variación	1.01286
16.0%	0.180	1.50		Mínimo	0.02500
25.0%	0.250	1.10		Máximo	3.30000
50.0%	0.600	0.60		Rango	3.27500
60.0%	0.900	0.20		Asimetría	0.44599
84.0%	3.000	-1.41		Curtosis	-1.44367
90.0%	3.100	-1.42		Índice de clasificación	1.18826
95.0%	3.200	-1.43		Media	1.25000
99.0%	3.300	-1.44		C.Curvatura	0.600
				C.Uniformidad	6



Grafica A.1.9 Granulometría Estación 6



Grafica A.1.10 . Distribución Granulométrica

Tabla A.1.6. Carta de Clasificación tamaño de grano.
Tomada de (Wenworth,1922)

Grain Diameter			Wentworth Size Class	
millimeters	microns	phi		
— 256		-8.0		Boulder
— 64		-6.0		Cobble
— 4.0	4000	-2.0		Pebble
— 2.0	2000	-1.0		Granule
— 1.41	1410	-0.5	vcU	Very coarse sand
— 1.0	1000	0.0	vcL	
— .71	710	0.5	cU	Coarse sand
— 0.5	500	1.0	cL	
— 0.35	350	1.5	mU	Medium sand
— 0.25	250	2.0	mL	
— 0.177	177	2.5	fU	Fine sand
— 0.125	125	3.0	fL	
— 0.088	88	3.5	vfU	Very fine sand
— 0.0625	62.5	4.0	vfL	
— 0.002	2.0	9.0		Silt
				Clay

Tabla A.1.7 Clasificación UCSC .
Tomada y Modificada (ASTM, 2006)

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests ^A				Soil Classification	
				Group Symbol	Group Name ^B
COARSE-GRAINED SOILS	Gravels (More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	Clean Gravels (Less than 5 % fines ^C)	$Cu \geq 4$ and $1 \leq Cc \leq 3^D$	GW	Well-graded gravel ^E
			$Cu < 4$ and/or $[Cc < 1$ or $Cc > 3]^D$	GP	Poorly graded gravel ^E
	More than 50 % retained on No. 200 sieve	Gravels with Fines (More than 12 % fines ^C)	Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel ^{E,F,G}
			Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel ^{E,F,G}
FINE-GRAINED SOILS	Sands (50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	Clean Sands (Less than 5 % fines ^H)	$Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^D$	SW	Well-graded sand ^I
			$Cu < 6$ and/or $[Cc < 1$ or $Cc > 3]^D$	SP	Poorly graded sand ^I
	50 % or more passes the No. 200 sieve	Sands with Fines (More than 12 % fines ^H)	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand ^{F,G,I}
			Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand ^{F,G,I}
HIGHLY ORGANIC SOILS	Silt and Clays	inorganic	PI > 7 and plots on or above "A" line ^J	CL	Lean clay ^{K,L,M}
			PI < 4 or plots below "A" line ^J	ML	Silt ^{K,L,M}
	Liquid limit less than 50	organic	$\frac{\text{Liquid limit} - \text{oven dried}}{\text{Liquid limit} - \text{not dried}} < 0.75$	OL	Organic clay ^{K,L,M,N} Organic silt ^{K,L,M,O}
		Silt and Clays	inorganic	PI plots on or above "A" line	CH
Liquid limit 50 or more			PI plots below "A" line	MH	Elastic silt ^{K,L,M}
	organic	$\frac{\text{Liquid limit} - \text{oven dried}}{\text{Liquid limit} - \text{not dried}} < 0.75$	OH	Organic clay ^{K,L,M,P} Organic silt ^{K,L,M,O}	
Primarily organic matter, dark in color, and organic odor				PT	Peat

Anexo 2: Límites líquido y plástico %

Tabla A.2.1. Reporte de datos Límites de Atterberg Estación 1

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Nitrera E1								
		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO			Límites de Consistencia		
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3			
Peso Tara + Muestra Húmeda	gr	28.00	29.30	27.50	32.10	32.10	32.10	Límite Líquido: LL =	73.60%	
Peso Tara + Muestra Seca	gr	26.00	26.90	25.80	30.30	30.30	30.30	Límite Plástico: LP =	64.29%	
Peso de la Tara	gr	23.30	23.60	23.50	27.50	27.50	27.50	Índice de Plasticidad : IP =	9.31%	
Peso de la Muestra Seca	gr	2.70	3.30	2.30	2.80	2.80	2.80	Contenido de Humedad : Wn =	37.61%	
Peso del Agua	gr	2.00	2.40	1.70	1.80	1.80	1.80	Grado de Consistencia : Kw =	3.86	
Contenido de Humedad	%	74.07	72.73	73.91	64.29	64.29	64.29	Grado de Consistencia : Media Dura ,		
Número de Golpes		28	21	15	Promedio :		64.29			

Nitrera :	
E1	
Nitrera 1	
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
28	74.07
21	72.73
15	73.91
25	73.600

LÍMITE LIQUIDO

Contenido de Humedad (%)

Número de Golpes

Tabla A.2.2. Reporte de datos Límites de Atterberg Estación 2

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : NitreraE2			E2			Límites de Consistencia		
Tara Número	Unidades	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO					
		1	2	3	1	2	3			
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	34.50	37.60	34.10	27.80	27.80	27.80	Límite Líquido: LL =	51.37%	
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	31.30	33.80	31.60	25.80	25.80	25.80	Límite Plástico: LP =	46.51%	
Peso de la Tara	Gr	24.80	26.90	26.40	21.50	21.50	21.50	Índice de Plasticidad : IP =	4.85%	
Peso de la Muestra Seca	Gr	6.50	6.90	5.20	4.30	4.30	4.30	Contenido de Humedad : Wn =	30.32%	
Peso del Agua	Gr	3.20	3.80	2.50	2.00	2.00	2.00	Grado de Consistencia : Kw =	4.34	
Contenido de Humedad	%	49.23	55.07	48.08	46.51	46.51	46.51	Grado de Consistencia :	Media Dura	
Número de Golpes		29	24	15	Promedio :		46.51			

Estrato : E2	
Nitrera E2	
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
29	49.23
24	55.07
15	48.08
25	51.366

LÍMITE LIQUIDO

Contenido de Humedad (%)

Número de Golpes

Tabla A.2.3. Reporte de datos Límites de Atterberg Estación 8

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Sendero						Límites de Consistencia	
		E8							
Tara Número	Unidades	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO				
		1	2	3	1	2	3		
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	27.90	30.00	26.30	28.50	28.50	28.50	Límite Líquido: LL =	62.13%
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	25.60	28.70	25.00	27.00	27.00	27.00	Límite Plástico: LP =	45.45%
Peso de la Tara	Gr	21.80	26.50	23.20	23.70	23.70	23.70	Índice de Plasticidad : IP =	16.68%
Peso de la Muestra Seca	Gr	3.80	2.20	1.80	3.30	3.30	3.30	Contenido de Humedad : W _n =	20.21%
Peso del Agua	Gr	2.30	1.30	1.30	1.50	1.50	1.50	Grado de Consistencia : Kw =	2.51
Contenido de Humedad	%	60.53	59.09	72.22	45.45	45.45	45.45	Grado de Consistencia : Media Dura , Sólida	
Número de Golpes		30	25	16	Promedio :		45.45		

Estrato : E8	
Sendero	
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
30	60.53
25	59.09
16	72.22
25	62.131

LÍMITE LIQUIDO

Contenido de Humedad (%)

Número de Golpes

Tabla A.2.4. Reporte de datos Límites de Atterberg Estación 9
%

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : Punto Medio								
		Estación E9								
		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO			Límites de Consistencia		
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2	3			
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	34.40	33.20	39.50	27.10	27.10	27.10	Límite Líquido: LL =	52.04%	
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	32.40	30.10	35.50	26.20	25.20	25.20	Límite Plástico: LP =	42.86%	
Peso de la Tara	Gr	27.00	25.00	27.30	21.70	21.70	21.70	Índice de Plasticidad : IP =	9.18%	
Peso de la Muestra Seca	Gr	5.40	5.10	8.20	4.50	3.50	3.50	Contenido de Humedad : Wn =	19.87%	
Peso del Agua	Gr	2.00	3.10	4.00	0.90	1.90	1.90	Grado de Consistencia : Kw =	3.50	
Contenido de Humedad	%	37.04	60.78	48.78	20.00	54.29	54.29	Grado de Consistencia : Media Dura , Sólida		
Número de Golpes		29	25	24	Promedio :		42.86			

Estrato : E9	
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
29	37.04
25	60.78
24	48.78
25	52.036

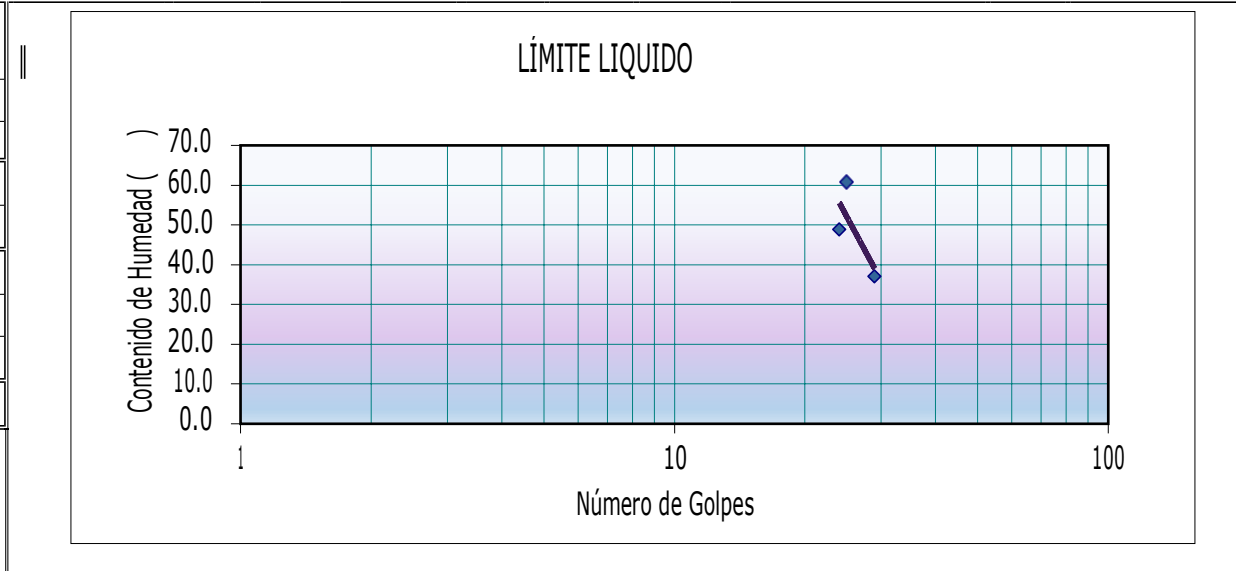
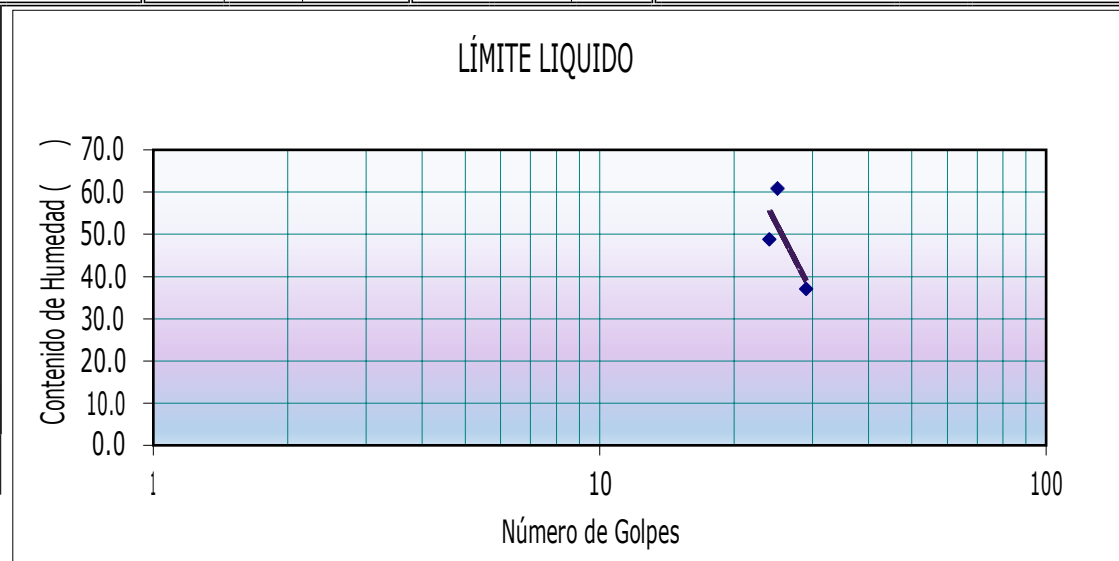


Tabla A.2.5. Reporte de ^{DA}datos Límites de Atterberg Estación 6

LÍMITES DE CONSISTENCIA		Ubicación : E2						
		Estrato : E2						
Tara Número	Unidades	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO			Límites de Consistencia
		1	2	3	1	2	3	
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	32.10	25.50	31.80	29.70	29.70	34.10	Límite Líquido: LL = 52.93%
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	30.40	24.00	29.90	27.50	27.50	32.40	Límite Plástico: LP = 42.12%
Peso de la Tara	Gr	27.00	21.20	26.30	22.70	22.70	27.50	Índice de Plasticidad : IP = 10.81%
Peso de la Muestra Seca	Gr	3.40	2.80	3.60	4.80	4.80	4.90	Contenido de Humedad : Wn = 26.97%
Peso del Agua	Gr	1.70	1.50	1.90	2.20	2.20	1.70	Grado de Consistencia : Kw = 2.40
Contenido de Humedad	%	50.00	53.57	52.78	45.83	45.83	34.69	Grado de Consistencia : Media Dura , Sólida
Número de Golpes		16	22	28	Promedio : 42.12			

Estrato : E2	
Potencia : e2	
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
16	50.00
22	53.57
28	52.78
25	52.929



Anexo 3: Compresión inconfiada

Tabla A.3.1 Medidas promedio de los cilindros de muestra

Medidas core			
h1(cm)	12.04	h _{prom}	11.96
h2(cm)	11.88		
d1(cm)	4.85	d _{prom}	4.9
d2(cm)	4.76		
d3(cm)	5.10		
peso (gr)	320.4		

Tabla A.3.2. Reporte de datos promedio de Compresión Inconfiada

Carga (Kg/cm ²)	Deformación (Lo/L)	carga Kpa	Pico de Carga (KN)	0.022
0.003	0.627	3	Pico de deformación (KN)	8.416
0.006	1.284	6		
0.009	1.903	9		
0.012	2.507	12		
0.014	3.126	14		
0.016	3.845	16		
0.018	4.279	18		
0.019	5.106	19		
0.021	5.748	21		
0.021	6.405	21		
0.022	7.017	22		
0.022	7.621	22		
0.022	8.24	22		
0.021	8.958	21		
0.021	9.593	21		
0.021	10.204	21		

Tabla20 Resultados de Carga axial

Anexo 4: Descripción de muestras.

Tabla A.4.1 Descripción de muestras

Descripción Rocas						
N Muestra	Clase	Minerales	Color	Consolidación	Estructuras	Selección
1	Sedimentaria	Qz, micas	Amarillo Oscuro	Suelto	Ninguna	Bien Seleccionado
2	Sedimentaria	Qz, fd, micas	naranja claro	Suelto	Ninguna	Bien Seleccionado
3	Sedimentaria	Fd	Café- Amarillo	Desagregado	Masiva	Moderadamente
4	Sedimentaria	Fd	Café-Amarillo	Desagregado	Masiva	Moderadamente
5	Sedimentaria	Qz, fd, micas	Gris	Desagregado	Masiva	Moderadamente
6	Sedimentaria	Qz	Gris	Consolidado	Estratificación cruzada	Bien Seleccionado
7	Sedimentaria	Si, Qz	Gris- café- amarillo	Muy consolidado	Ninguna	Pobrementemente
8	Sedimentaria	Si, Qz	Gris- café- amarillo	Muy consolidado	Masiva	moderadamente
9	Sedimentaria	Si, Qz	Gris- café- amarillo	Muy consolidado	Masiva	moderadamente
10	Sedimentaria	Ox	Rojizo	Consolidado	Estratificación cruzada	Moderadamente
11	Sedimentaria	Qz, micas, Ox	Rojizo	Desagregado	Ninguna	Bien Seleccionado
12	Sedimentaria	Qz, micas	Rojizo	Desagregado	Ninguna	Bien Seleccionado
13	Sedimentaria	Qz, fd, micas	Gris	Consolidado	Estratificación plana	Moderadamente
14	Sedimentaria	Qz, fd, micas	Gris	Consolidado	Estratificación plana	Moderadamente
15	Sedimentaria	Qz, micas	Gris	Consolidado	Estratificación plana	Moderadamente
16	Sedimentaria	Qz, micas	Rojizo	Suelto	Ninguna	Bien Seleccionado
17	Sedimentaria	Qz, micas	Rojizo	Desagregado	Ninguna	Bien Seleccionado
18	Sedimentaria	Qz, micas	Rojizo	Suelto	Ninguna	Bien Seleccionado
19	Sedimentaria	Si, Qz	Gris- café- amarillo	Muy consolidado	Masiva	moderadamente
20	Ígnea volcánica	Imperceptibles	Gris - Negro	Muy consolidado	Ninguna	Bien Seleccionado
21	Ígnea volcánica	Imperceptibles	Gris - Negro	Muy consolidado	Ninguna	Bien Seleccionado
22	Sedimentaria	Si, Qz	Gris- café- amarillo	Muy consolidado	Masiva	moderadamente
23	Ignea volcanica	Imperseptibles	Gris - Negro	Muy consolidado	Ninguna	Bien Seleccionado
24	Sedimentaria	Qz, Fd	Amarillo	Consolidado	No estratificada	Pobrementemente

25	Sedimentaria	Qz, Fd	Amarillo	Consolidado	No estratificada	Pobremente
26	Sedimentaria	Qz, Fd	Amarillo quemado	Consolidado	No estratificada	Pobremente
27	Sedimentaria	Qz, Fd	Amarillo quemado	Muy consolidado	Estratificación plana	Moderadamente
28	Sedimentaria	Qz, Fd	Amarillo quemado	Muy consolidado	Estratificación plana	Moderadamente
29	Sedimentaria	Qz, Fd	Amarillo Claro	Muy consolidado	Estratificación plana	Moderadamente
30	Sedimentaria	Qz, Fd	Naranja	Consolidado	Estratificación cruzada	Bien Seleccionada