

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN ECOTENCOLOGÍA**



**TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA**

**“Recarga artificial de acuíferos mediante jardines de lluvia en el Eje Cafetero colombiano”**

**Para obtener el título de Magíster en Ecotecnología**

**ESTUDIANTE: Melisa Andrea Gómez Benítez**

**DIRECTOR: Ing. M.Sc. Ph.D Diego Paredes Cuervo**

**Pereira, Junio de 2015**

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimiento a todas aquellas personas que en el ámbito académico que hicieron posible la realización de este trabajo, en especial al Ingeniero Diego Paredes Cuervo que más que ser un director ha sido un amigo siempre, al grupo de investigación en Agua y Saneamiento GIAS en especial a Julián Lasso que estuvo durante todo el proceso apoyándome en todo de manera incondicional, a Derly Zuleta por sus importantes aportes al trabajo, al vivero Pavas que me abrió las puertas para la realización del trabajo y en general a la comunidad de Cerritos que siempre estuvo dispuesta a colaborar en todo. A la CARDER por su apoyo con recursos y asesoría y por último, el más especial agradecimiento a la Universidad Tecnológica de Pereira que ha sido mi casa siempre.

Agradecimientos especiales a mi familia y amigos por ser parte de este proceso, a mi madre y padre por su apoyo y esfuerzo, a mis hermanos por su paciencia, a mi tía por ser ejemplo y apoyo, a mis abuelas por su sabiduría y amor y a Sebas mi compañero de todo y amigo que siempre cuida de mí.

## DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional y esfuerzo y a Sebas por acompañarme siempre

## RESUMEN

Con el apoyo del Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento GIAS de la facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, se realizó el presente estudio con el fin de evaluar los jardines de lluvia como alternativa a la problemática presentada en el Municipio de Pereira, en el que la zona de expansión occidental coincide con la zona de recarga del acuífero. La investigación tiene como propósito, evaluar en una prueba piloto ubicada en la Zona de Expansión Occidental del municipio de Pereira, corregimiento de Cerritos, el comportamiento de cuatro (4) configuraciones de jardines de lluvia, en cuanto a infiltración y calidad del agua proveniente de la precipitación sobre un área impermeable, como alternativa para la recarga artificial del acuífero. Se partió de la definición de la cantidad de agua disponible en la zona, proveniente del balance hídrico del área donde se obtiene un excedente de lluvia de 197.5mm en el mes más húmedo y de 92.7mm en el mes más seco y en épocas de NIÑO y NIÑA puede variar hasta en 60mm, lo que indica recarga durante todo el año, siendo mayor hacia la zona suroccidental del área de estudio. Analizando el impacto de la urbanización sobre la zona, se tiene un cambio en el CN de 80 a 89. Se instalaron también pluviómetros portables para tener un balance hídrico diario. Finalmente se obtuvo que no existen diferencias entre los jardines de lluvia y que en conjunto son una alternativa viable para mitigar la problemática de la zona, infiltrando importantes cantidades de agua, casi el total de la precipitada, es decir, los jardines infiltran el agua de una zona 25 veces mayor a su tamaño, manteniendo la calidad de la misma en cuanto a nitrógeno y removiendo sólidos suspendidos totales, fósforo, potasio, zinc y DOQ.

## SUMMARY

With the support of the Research Group on Water and Sanitation GIAS faculty of Environmental Sciences at the Technological University of Pereira and the Autonomous Regional Corporation of Risaralda CARDER, the present study was conducted to assess rain gardens as an alternative to the problems presented in the city of Pereira, where the area of western expansion coincides with the recharge zone of the aquifer. The research aims to evaluate in a pilot area located in the municipality of West Expansion Pereira, township of Cerritos, the behavior of four (4) configurations rain gardens, infiltration and in terms of water quality from precipitation on an impervious area, as an alternative for artificial aquifer recharge. It began with the definition of the amount of water available in the area, from the water balance of the area where a surplus of rain in the month of 197.5mm and 92.7mm damper is obtained in the driest month and in times of NIÑO and NIÑA can vary by up to 60mm, indicating charging throughout the year, being higher towards the south-western part of the study area. Analyzing the impact of urbanization on the area has a change in the CN 80 to 89. Portable gauges been also installed to have a daily water balance. Finally it was found that there are no differences between rain gardens, which together are a viable alternative to mitigate the problems of the area, infiltrating significant amounts of water, almost all of the precipitate, ie, gardens infiltrate water an area 25 times its size while maintaining the same quality in terms of nitrogen and removing suspended solids, phosphorus, potassium, zinc and COD.

## TABLA DE CONTENIDO

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓN .....   | 7  |
| 2.     | JUSTIFICACIÓN .....  | 7  |
| 3.     | OBJETIVOS .....  | 8  |
| 3.1.   | Objetivo General .....   | 8  |
| 3.2.   | Objetivos Específicos .....  | 8  |
| 4.     | REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....   | 9  |
| 4.1.   | Balance Hídrico .....  | 9  |
| 4.2.   | Agua subterránea y formación de acuíferos .....  | 12 |
| 4.3.   | Recarga de Acuíferos .....   | 13 |
| 4.4.   | Problemáticas relacionadas con los acuíferos y la recarga de aguas subterráneas .....              | 15 |
| 4.4.1. | Crecimiento poblacional .....  | 15 |
| 4.4.2. | Impactos de la pavimentación en la recarga de agua .....   | 17 |
| 4.5.   | Alternativas de solución .....   | 18 |
| 4.5.1. | Recarga de acuíferos con aguas tratadas .....  | 19 |
| 4.5.2. | Recarga de acuíferos con aguas pluviales .....   | 20 |
| 5.     | METODOLOGÍA .....  | 26 |
| 5.1.   | Objetivo 1: Caracterización hidrológica de la zona de expansión occidental (ZEOX) .....            | 26 |
| 5.1.1. | Delimitación y análisis de problemáticas en la ZEOX .....  | 26 |
| 5.1.2. | Balance Hídrico .....  | 26 |
| 5.2.   | Objetivo 2: Determinación eficiencia de jardines de lluvia en términos de cantidad y calidad ..... | 30 |
| 5.2.1. | Relación precipitación, infiltración y recarga .....   | 30 |
| 5.2.2. | Descripción implementación jardines de lluvia .....  | 35 |
| 5.2.3. | Hipótesis .....  | 40 |
| 6.     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 41 |
| 6.1.   | Objetivo 1. Caracterización ZEOX .....   | 41 |
| 6.1.1. | Generalidades .....  | 41 |
| 6.1.2. | Formaciones geológicas superficiales .....   | 43 |
| 6.1.3. | Componente hídrico .....   | 45 |
| 6.1.4. | Componente biótico .....   | 48 |
| 6.1.5. | Proyectos de urbanización en la ZEOX .....   | 50 |
| 6.1.6. | Balance hídrico ZEOX .....   | 54 |
| 6.2.   | Objetivo 2. Evaluación eficiencia de Jardines de Lluvia en cantidad y calidad .....                | 72 |
| 6.2.1. | Relación Precipitación – Recarga .....   | 72 |
| 6.2.2. | Infiltración en la ZEOX .....  | 73 |
| 6.2.3. | Impacto en la recarga del acuífero en la zona de estudio por efectos de la urbanización ...        | 78 |
| 6.2.4. | Cantidad de agua infiltrada .....  | 81 |
| 6.2.5. | Calidad del agua infiltrada .....  | 83 |
| 7.     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....   | 85 |
| 8.     | BIBLIOGRAFÍA .....   | 87 |
| 9.     | ANEXOS .....   | 94 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Modelo conceptual de recarga de acuíferos.....                                       | 14 |
| Figura 2. Pozo de inyección para recarga de acuíferos.....                                     | 20 |
| Figura 3. Trinchera de infiltración para recarga de acuíferos .....                            | 21 |
| Figura 4. Lagunas de infiltración para recarga de acuíferos .....                              | 22 |
| Figura 5. Asfalto permeable para recarga de acuíferos.....                                     | 22 |
| Figura 6. Estructura de un Jardín de Lluvia .....  | 23 |
| Figura 7. Configuración Jardín 1.....  | 36 |
| Figura 8. Configuración Jardín 2.....  | 36 |
| Figura 9. Configuración Jardín 3.....  | 36 |
| Figura 10. Configuración Jardín 4.....   | 36 |
| Figura 11. Jardines de Lluvia.....   | 37 |
| Figura 12. Canal recolector de agua del techo .....  | 38 |
| Figura 13. Tubo para toma de muestra de calidad .....  | 38 |
| Figura 14. Pluviómetro instalado zona de estudio .....   | 39 |
| Figura 15. Mapa de ubicación ZEOX.....   | 42 |
| Figura 16. Mapa de ubicación de la ZEOX en Pereira.....  | 42 |
| Figura 17. Estimación del consumo actual de pozos por sectores económicos .....                | 46 |
| Figura 18. Mapa hidrogeológico sistema de acuíferos de Pereira y Dosquebradas.....             | 47 |
| Figura 19. Usos del suelo 2011, ZEOX .....   | 48 |
| Figura 20. Mapa de usos del suelo de la ZEOX .....   | 49 |
| Figura 21. Mapa de conflictos de uso del suelo ZEOX.....                                       | 50 |
| Figura 22. Modelo de densidad media.....   | 52 |
| Figura 23. Modelo de densidad alta.....  | 52 |
| Figura 24. Modelo de densidad baja.....  | 52 |
| Figura 25. Mapa de densidades poblacionales ZEOX.....  | 53 |
| Figura 26. Comportamiento medio mensual general y no modal por estación .....                  | 55 |
| Figura 27. Comportamiento precipitación media mensual multianual general ZEOX.....             | 56 |
| Figura 28. Precipitación media de la ZEOX por cada mes del año.....                            | 60 |
| Figura 29. Precipitación media mensual Vs. Precipitación media mensual NIÑO.....               | 61 |
| Figura 30. Precipitación media mensual Vs. Precipitación media mensual NIÑA.....               | 62 |
| Figura 31. Precipitación media mensual.....  | 63 |
| Figura 32. Precipitación media mensual periodo NIÑA.....                                       | 63 |
| Figura 33. Precipitación media mensual periodo NIÑO.....                                       | 64 |
| Figura 34. Comportamiento de la evapotranspiración media ZEOX.....                             | 65 |
| Figura 35. Comportamiento de la escorrentía media mensual ZEOX.....                            | 67 |
| Figura 36. Comportamiento del Balance hídrico promedio general ZEOX.....                       | 68 |
| Figura 37. Recarga media general para la ZEOX.....   | 68 |
| Figura 38. Comportamiento del Balance hídrico promedio ZEOX en periodos NIÑO.....              | 69 |
| Figura 39. Recarga media ZEOX en periodo NIÑO.....   | 70 |
| Figura 40. Comportamiento del Balance hídrico en la ZEOX contemplando periodos NIÑA.....       | 71 |
| Figura 41. Recarga media ZEOX en periodo NIÑA.....   | 71 |
| Figura 42. Comparación del comportamiento entre precipitación media y recarga en la ZEOX.....  | 73 |
| Figura 43. Técnica de infiltrómetros dobles .....  | 73 |
| Figura 44. Prueba de infiltración en campo .....   | 73 |
| Figura 45. Excavación suelo ZEOX.....  | 74 |
| Figura 46. Características del suelo ZEOX.....   | 74 |
| Figura 47. Mapa de Infiltración sobre polígonos de proyección de población .....               | 77 |
| Figura 48. Comportamiento de la recarga mensual con y sin urbanización.....                    | 81 |
| Figura 49. Precipitación pluviómetro instalado en la ZEOX vs fechas de descarga de datos ..... | 81 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 50. Escorrentía del jardín de lluvia vs la infiltración ..... | 82 |
| Figura 51. Precipitación vs recarga en los jardines de lluvia .....  | 83 |
| Figura 52. Resultados calidad fósforo total y zinc.....              | 84 |
| Figura 53. Resultados calidad DQO, sólidos, nitrógeno .....          | 84 |
| Figura 54. Resultados calidad potasio .....                          | 84 |

### LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Comparación de propiedades del suelo según su textura .....                                 | 11 |
| Tabla 2. Métodos para determinar recarga de acuíferos. ....  | 14 |
| Tabla 3. Períodos de ocurrencia de fenómenos de NIÑO y NIÑA .....                                    | 17 |
| Tabla 4. Escenarios de respuesta hídrica.....  | 27 |
| Tabla 5. Periodos de ocurrencia de fenómenos de NIÑO y NIÑA .....                                    | 27 |
| Tabla 6. Humedad volumétrica de acuerdo a tipo de suelo .....  | 34 |
| Tabla 7. Humedad suelo inicial y Final mensual para la zona de expansión occidental de Pereira ..... | 34 |
| Tabla 8. Esquema de propuesta de experimento .....   | 35 |
| Tabla 9. Parámetros a evaluar y métodos de medición .....  | 40 |
| Tabla 10. Factores, niveles y tratamientos del diseño experimental .....                             | 40 |
| Tabla 11. Descripción de los tratamientos .....  | 40 |
| Tabla 12. Variables del diseño experimental .....  | 40 |
| Tabla 13. Hipótesis .....  | 40 |
| Tabla 14. Estaciones meteorológicas para el cálculo de la precipitación media mensual.....           | 54 |
| Tabla 15. Precipitación media mensual multianual general para la zona de expansión occidental.....   | 56 |
| Tabla 16. Leyenda precipitación .....  | 57 |
| Tabla 17. Evapotranspiración media mensual general en la zona de expansión occidental. ....          | 64 |
| Tabla 18. Cálculo de Kc para la zona de expansión occidental de Pereira. ....                        | 65 |
| Tabla 20. Parámetros para determinar retención método balance hídrico de suelos.....                 | 66 |
| Tabla 21. Escorrentía mensual general, Periodos NIÑO y NIÑA ZEOX.....                                | 66 |
| Tabla 22. Balance hídrico para la zona de expansión occidental (mm).....                             | 67 |
| Tabla 23. Balance Hídrico zona de expansión occidental contemplando periodos NIÑO (mm). ....         | 69 |
| Tabla 24. Balance Hídrico para la zona de expansión occidental contemplando periodos NIÑA.....       | 70 |
| Tabla 25. Textura de suelo por cobertura.....  | 75 |
| Tabla 26. % de humedad por cobertura de suelo.....   | 75 |
| Tabla 27. Densidad aparente por cobertura de suelo.....  | 75 |
| Tabla 28. Valores bases para determinar rangos de infiltración.....                                  | 76 |
| Tabla 29. Cálculo del Número de Curva (CN) de acuerdo con usos del suelo año 2011.....               | 78 |
| Tabla 30. Estimación del número de curva CN.....   | 79 |
| Tabla 31. Valores de CN recalculados de acuerdo con el modelo de ocupación de territorio .....       | 80 |
| Tabla 32. Lámina de recarga en la zona de expansión occidental sin y con urbanización.....           | 80 |

### LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1. Tablas precipitación media general, medias para período NIÑO y NIÑA por estaciones..... | 94  |
| Anexo 2. Curvas de infiltración para cada uso del suelo .....                                    | 97  |
| Anexo 3. Propiedades físicas de los suelos .....   | 110 |
| Anexo 4. Resultados pruebas de calidad Jardines de Lluvia.....                                   | 116 |

## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional es un suceso inherente al desarrollo de las ciudades. El aumento implica la expansión de servicios de toda índole, entre ellas, la vivienda y la construcción de nuevas zonas de desarrollo industrial. La urbanización implica la impermeabilización de suelos (Perry y Nawaz, 2008), y la alteración de diferentes ciclos naturales (Schueler, 1994), entre ellos el hidrológico, que inicia con la precipitación para su posterior escurrimiento e infiltración a través del suelo permeable para recargar aguas subterráneas.

Las problemáticas, se han derivado en inhibición de la recarga de acuíferos, inundaciones en zonas urbanas porque existe mayor volumen de escorrentía, la contaminación de fuentes superficiales por arrastre de sedimentos entre otros (USEPA, 2002; Kazemi, 2010). También se presentan alteraciones en la temperatura del agua y problemas a nivel social por el acceso al recurso (Taniguchi et al., 2002).

Actualmente, la necesidad de darle un nuevo manejo a las aguas pluviales, ha conllevado a la introducción de controles locales como atenuación del flujo y tratamientos biológicos naturales o construidos como lagunas, humedales, jardines de lluvia o cuencas de biorretención, asfalto permeable como alternativas de mitigación de la impermeabilización del suelo.

Los jardines de lluvia, han demostrado ser una alternativa cuya tendencia se encuentra en aumento debido a su flexibilidad para la implementación, valor estético, pues son de tamaños considerables y modernizan las estructuras urbanas actuales y futuras. Su aporte a la gestión integral de recursos hídricos radica en el manejo de las aguas pluviales, las cuales no tienen reconocimiento en el país, infiltrando y recargando aguas subterráneas, en una zona donde la escasez no se da por cantidad sino por calidad del recurso, y por la impermeabilización de los suelos, sufrida por el aumento de la población y la necesidad de urbanizar nuevas áreas.

La investigación fue realizada en el Vivero Pavas ubicado en la zona de estudio, por la facilidad para la implementación de los jardines y los equipos de medición y por presentar la mayoría de los usos del suelo que hay en toda la zona

Se espera responder: *¿Son los jardines de lluvia una alternativa de mitigación de los impactos de la urbanización sobre los acuíferos de la Zona de Expansión Occidental?*

## 2. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda por suelo urbanizable en el municipio de Pereira en el sector occidental, ha generado una presión urbanística sobre un área históricamente caracterizada por la existencia de acuíferos. Dadas las características de la zona de expansión occidental, determinada dentro del plan de Ordenamiento Municipal, se convierte en un espacio con la urgente necesidad de acciones que minimicen los impactos reales y potenciales sobre el recurso hídrico subterráneo.

En recientes estudios (CARDER 2007), se han determinado zonas de recarga de aguas subterráneas para el municipio de Pereira, principalmente ubicadas en el sector cerritos, esta zona de recarga se considera un acuífero de baja productividad con una capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/segxm cuyo principal factor de recarga es la precipitación directa sobre el suelo. Este acuífero

está representado por la Formación Pereira, unidad que se constituye en la de mayor interés hidrogeológico, por tener una gran expresión areal y espesores superiores a 300 m.

El Acuerdo municipal No. 23 de julio 28 de 2006 en su artículo 25, establece las áreas de expansión para el municipio de Pereira, dentro de las cuales se encuentra la Zona de Expansión Occidental con una extensión total de 920,94 Ha, zona que coincide con la zona de recarga del acuífero del sector cerritos. Dadas las simulaciones realizadas por Planeación Municipal, se espera que esta zona aloje aproximadamente 100 mil habitantes en cerca de 30.000 viviendas, nuevos usuarios con exigencias en servicios de acueducto, alcantarillado y aseo e infraestructura (vías, redes, transporte, áreas públicas, etc.), requerimientos que imponen retos en el manejo de las aguas subterráneas, para obtener la menor afectación del recurso hídrico.

Gobel et al (2004) afirman que en las zonas urbanas, el sellado del suelo conduce a un cambio en los factores individuales del balance hídrico en comparación con las condiciones naturales; cuando el suelo es sellado por los procesos de urbanización, la evaporación y la recarga de agua son reducidas, situación que pone en riesgo la permanencia de los procesos propios de un acuífero.

En Colombia, las aguas subterráneas han sido poco estudiadas, por lo que no se ha planificado en torno a evitar conflictos e impactos negativos. Identificar una alternativa de solución, implica el estudio de las condiciones actuales de recarga del acuífero, para continuar de manera sustentable con el desarrollo de la ciudad y sus procesos urbanísticos y el mantenimiento de los recursos que son a su vez la fuente de abastecimiento.

La Ecotecnología, permite la evaluación de alternativas naturales como son los jardines de lluvia, pues su base en el diseño de ecosistemas simulando condiciones naturales, brinda las herramientas necesarias para iniciar procesos de implementación, operación, mantenimiento y análisis de dichas alternativas, que permitan la mitigación del impacto negativo de la urbanización en Pereira.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Evaluar jardines de lluvia para la recarga de acuíferos, como alternativa de mitigación a los impactos de la expansión urbana occidental del Municipio de Pereira.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar la zona de Expansión Occidental de Pereira (ZEOX) en términos hidrológicos.
- Determinar la eficiencia de los jardines de lluvia en términos de cantidad y cumplimiento de parámetros de calidad del agua infiltrada.

## 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Balance Hídrico

El agua en el planeta, presenta un movimiento y una circulación natural entre la tierra y la atmósfera. Diferentes procesos afectan el llamado ciclo hidrológico, así para establecer un balance hídrico, es necesario tener en cuenta todos los factores tanto superficiales como hidrogeológicos.

El agua proveniente de la precipitación y que cae sobre la superficie terrestre, específicamente sobre una cuenca hidrográfica realiza varios procesos. Dependiendo del flujo del agua, esta puede escurrir o infiltrarse y percolar en el suelo. En el primer caso, el agua sigue las líneas de máximo gradiente de energía y en el caso de la infiltración el agua fluye a través de los espacios vacíos del suelo y subsuelo de acuerdo con el gradiente piezométrico y con la permeabilidad del medio (Muños, 1998).

Mientras que las formaciones geológicas realizan un papel determinante en la capacidad de almacenamiento del agua y la facilidad de su extracción, varios factores relacionados con la superficie intervienen en los procesos de infiltración (Sánchez, 2008).

El proceso de escorrentía, se da cuando el agua que cae, fluye a través de la superficie del suelo, para ser depositada más adelante en una fuente superficial. En otras ocasiones, el agua que se infiltra y que no puede ser retenida por la humedad del suelo superando la capacidad de campo, y se mueve hacia las corrientes subsuperficiales o se infiltra hacia el manto freático, este proceso es denominado recarga de agua del acuífero (Bardales, ND).

Mediante el balance hídrico de agua subterránea, es posible determinar la disponibilidad del agua a un período o escala de tiempo determinado, tomando como base el ciclo hidrológico subterráneo y las fases que interactúan en éste (precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía) como componentes de entrada, de salida y/o los cambios en el almacenamiento de agua a nivel atmosférico, superficial o subterráneo (Jiménez, 1992; MAVDT, 2004).

El balance hídrico se puede establecer mediante la Ecuación 1, la cual consiste en una expresión general basada en el principio de conservación de masas (Chow, 1991).

**Ecuación 1.** Balance hídrico en función del principio de conservación de masas

$$BH = I(t) - O(t) +/- \Delta HS$$

Donde;

BH = Balance Hídrico.

I(t) = Entradas.

O(t) = Salidas.

$\Delta HS$  = Cambio de Almacenamiento.

Las entradas hacen referencia a las diferentes fuentes de ingreso del agua a la cuenca. La precipitación y la infiltración directa sobre la zona y las provenientes de otras cuencas, que ayuden a aumentar el volumen de agua en la misma.

Las salidas, representan las cantidades de agua que por evapotranspiración y escurrimiento o infiltración, salen hacia otras cuencas. Y los cambios de almacenamiento, corresponden a la

variación en el contenido de humedad del suelo durante el tiempo de estudio, el cual puede ser positivo o negativo. En caso de ser positivo indica que el contenido de humedad del suelo aumenta, porque las entradas son mayores a las salidas de agua. Por el contrario, si el cambio de almacenamiento es negativo, significa que las entradas de agua son menores a las salidas de agua (Jiménez, 1992).

La precipitación es la caída de agua dulce que contempla la lluvia, la nieve y el granizo, es la principal fuente de humedad del suelo y el principal componente de entrada en el balance hídrico. El análisis espacial de la precipitación en una zona de estudio se obtiene a partir de la precipitación media, ya que ésta varía espacialmente a lo largo de un área determinada (Jiménez, 1992), dependiendo si proceden de un frente cálido, donde son más homogéneas o de un frente tormentoso las cuales al ser más heterogéneas, dependen para su distribución, de la topografía (Ávila, 2012).

La evapotranspiración hace referencia al retorno del agua a la atmósfera por medio de dos procesos que se presencian de manera simultánea (la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación establecida en la zona de estudio) y se asume como un componente de salida dentro del balance hídrico superficial. Los factores que afectan o inciden en su comportamiento en una zona de estudio, son el tipo de cultivo, el desarrollo del follaje, el estado y manejo de la vegetación. De igual manera, también tiene incidencia la temperatura, la altitud, el contenido de humedad del suelo y la habilidad de éste para que el agua circule a la zona radicular efectiva de las plantas (Jiménez, 1992; Ávila, 2012).

La evapotranspiración respecto al uso del suelo se asimila a la evapotranspiración real o del cultivo (Aparicio, 1982; Jiménez, 1992; Schosinsky, 2007). Ésta puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo o ambientales (FAO, 2006) a partir del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ).

La escorrentía se refiere a la cantidad de agua que resulta del proceso de la precipitación que no es evaporada ni es retenida por la vegetación, la cual llega al suelo y por efecto de la fuerza gravitacional se desplaza por diferentes caminos en movimientos intrincados e irregulares hasta las aguas subterráneas y que finalmente es la que alimenta los acuíferos. Por lo tanto, el potencial de escorrentía dependerá del potencial de saturación del suelo en sus primeros estratos, que puede suceder: cuando la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo, o cuando ocurre una precipitación sobre un suelo que se encuentra saturado (Schosinsky, 2007).

De acuerdo con el recorrido del agua luego de la precipitación en una zona de estudio, así será el comportamiento teórico del escurrimiento de acuerdo con éste, pudiendo ser un escurrimiento de tipo superficial, subsuperficial o subterráneo.

El escurrimiento superficial, es la respuesta hidrológica más evidente y rápida ante un evento de precipitación, la cual escurre de manera libre dependiendo de la superficie del suelo y la combinación de las características de la lluvia y/o el potencial de saturación del suelo en sus primeros estratos o del comportamiento de la infiltración. El escurrimiento subsuperficial, es aquel formado por el desplazamiento del agua a través de las primeras capas del suelo dependiendo del contenido de humedad y las características edafológicas, geológicas y/o litológicas. En cuanto a la velocidad del agua, éste es más lento que el superficial, pero a su vez es más rápido que el

subterráneo. Finalmente, el escurrimiento subterráneo es el producido luego de la infiltración alcanzando el nivel freático y es el que produce la recarga en los acuíferos (Jiménez, 1992; Ávila, 2012).

La infiltración es el proceso a través del cual el agua atraviesa las capas superficiales del suelo, ya sea que el terreno reciba una precipitación, un riego o sea inundado. El agua que se filtra ocupa los espacios intersticiales del suelo, la cual penetra a través de las diferentes capas por efecto de la fuerza gravitacional y por fuerzas de succión y/o capilares (Jiménez, 1992).

Conocer las características de la infiltración, es de gran importancia técnica para el manejo de los recursos suelo y agua, porque permite diferenciar y estimar la cantidad de precipitación que va a escurrir superficialmente alimentando las corrientes de los drenes naturales y la fracción de agua que va a recargar los acuíferos, según la capacidad de infiltración (Guevara, 1994; Jiménez, 1992; Aparicio, 1982).

El proceso de infiltración está sometido a dos restricciones: primero, que no puede exceder la intensidad de la precipitación que llega a la superficie del suelo y segundo, está limitado por la tasa a la cual el agua puede penetrar y moverse a través del perfil litológico, llamada velocidad de infiltración. Tres (3) procesos independientes determinan la infiltración: El paso del agua de la superficie al interior del suelo, el movimiento a través del perfil y el consumo de la humedad contenida en los poros del suelo (Guevara, 1994).

De acuerdo con Aparicio (1982), los factores que se destacan en el proceso de infiltración son:

**Textura del suelo:** Las diferentes características del suelo, especialmente las físicas como la estructura, textura y porosidad, influyen en las fuerzas de capilaridad y de absorción, de donde salen las fuerzas de succión que influyen parcialmente en la infiltración.

Los suelos arcillosos son más porosos y además ofrecen mayor resistencia al movimiento de agua a través del suelo por tener poros de tamaños reducidos, por otro lado, la aireación es pobre, en cuanto la adhesividad, en suelos arcillosos es alta, al igual que la retención de humedad. La Tabla 1, hace referencia al comportamiento del suelo con la infiltración, adhesividad, retención de humedad y aireación a partir del conocimiento de la textura del suelo.

**Tabla 1.** Comparación de propiedades del suelo según su textura

| Textura                | Símbolo | Adhesividad | Infiltración | Retención De Humedad | Aireación |
|------------------------|---------|-------------|--------------|----------------------|-----------|
| Arenoso                | A       | No hay      | Excelente    | Muy baja             | Excelente |
| Arenoso-franca         | AF      | Muy poca    | Buena        | Baja                 | Buena     |
| Franco-arenoso         | FA      | Media       | Buena        | Regular              | Buena     |
| Franca                 | F       | Ligera      | Buena        | Regular              | Buena     |
| Franca-limosa          | FL      | Media       | Buena        | Buena                | Buena     |
| Limosa                 | L       | Poca        | Buena        | Buena                | Buena     |
| Franco-arcillo-arenosa | FArA    | Alta        | Regular      | Regular              | Regular   |
| Franco-arcillosa       | FAr     | Alta        | Regular      | Regular              | Regular   |
| Franco-arcillo-limosa  | FArL    | Alta        | Pobre        | Regular              | Regular   |
| Arcillo-arenosa        | ArA     | Media       | Pobre        | Media                | Pobre     |
| Arcillo-limosa         | ArL     | Alta        | Pobre        | Alta                 | Muy pobre |
| arcillosa              | AR      | Muy alta    | Pobre        | Muy alta             | Muy pobre |

Fuente: Reyes, 2009.

**Contenido de humedad inicial:** El contenido de humedad del suelo, con respecto al momento de la lluvia o de la aplicación de un riego, también se conoce como la condición antecedente del suelo, la cual afecta el grado de infiltración dado que las fuerzas de succión están relacionadas con el contenido de humedad. Por lo tanto un suelo seco tiene una relativa alta velocidad de infiltración, en tanto que el mismo suelo con un alto contenido de humedad tendrá para esta condición una menor velocidad de infiltración.

**Cobertura vegetal y uso suelo:** Las características de la vegetación influyen en la infiltración, al oponerse al libre desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo. Por otra parte el sistema de raíces al establecer una red de pequeñas tuberías en el suelo, una vez cumplen su ciclo, se secan y descomponen, permitiendo que el agua pueda penetrar más rápido y fácilmente a mayores profundidades del suelo; la cobertura vegetal protege al suelo del golpe de lluvia, que puede ocasionar compactación y erosión del mismo.

**Pendiente del terreno:** Si el terreno es muy pendiente, el agua escurre rápidamente y no hay infiltración o ésta es muy reducida, al contrario de lo que sucede en terrenos con pendientes suaves, donde los valores de infiltración son mucho mayores. Por esta razón los mapas de pendientes se pueden utilizar como un indicativo de las tasas de recarga, cuando se está estudiando el potencial de las capas acuíferas (Vélez y Vélez, 2002).

**Compactación:** Se presenta compactación del suelo por factores como el impacto de las gotas de lluvia, (Gurovich, 1985; Jiménez, 1992). Otros factores que influyen en la compactación son el empleo de maquinaria agrícola, la ganadería, la circulación permanente de personas y vehículos sobre el terreno, entre otros. La compactación disminuye la porosidad total y por ende la infiltración.

Para medir la velocidad de infiltración del agua en el suelo, se han desarrollado diferentes técnicas que permiten estimar la cantidad de agua que se infiltra sobre una superficie cuando se aplica un volumen de agua conocido y se mide el descenso de ésta durante un tiempo determinado. Dentro de las técnicas más conocidas se encuentran los anillos simples, los infiltrómetros, o anillos dobles, los simuladores de lluvia y el cilindro de porchet. Su aplicabilidad se determina con base en las características del terreno, la necesidad de precisión en los datos para los estudios de investigación, la facilidad de acceso a los sitios y los recursos disponibles para la compra e implementación de la técnica entre otras.

#### 4.2. Agua subterránea y formación de acuíferos

El agua subterránea o subsuperficial, está definida como aquella parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno (Vélez, 1999), o dentro de los poros, fracturas de las rocas (Duque-Escobar, 2013), fisuras, intersticios entre los granos y diaclasas, y se encuentran a presiones mayores que la atmosférica. El transporte, a través del subsuelo hace que el agua sature el medio y sea almacenada en él. Es así como su movimiento, almacenamiento y acceso, están controlados por la litología, espesores y estructura de los materiales que forman el terreno que la contiene. Se puede definir, entonces, un acuífero como una unidad litológica que contiene agua en cantidades apreciables y que además la deja circular (Vélez, 1999).

De acuerdo con la porosidad y la permeabilidad, las diferentes formaciones acuíferas, algunas tienen altas capacidades de almacenar agua pero con difícil transmisión o con capacidad de almacenar y buen movimiento del agua. De lo anterior es necesario aclarar varios conceptos:

**Acuíferos:** son formaciones geológicas que almacenan el agua y que a su vez permiten el movimiento de la misma, bajo la acción de las fuerzas de la gravedad, de tal forma que puede ser explotada en cantidades relativamente apreciables.

**Acuicludeos:** son formaciones que almacenan agua en proporciones importantes, pero que no se transmite en las mismas cantidades.

**Acuitardos:** estos almacenan el agua pero el flujo de agua es lento. Sin embargo, cuando se encuentran en grandes áreas, a pesar de su baja velocidad pueden almacenar grandes cantidades de agua. Así, pueden permitir el paso de agua de un acuífero a otro cuando éstos se encuentran separados por un acuitardo. Este fenómeno reviste particular importancia cuando se estudian casos de contaminación de las aguas subterráneas (Vélez, 1999).

**Acuífugos:** estas son formaciones prácticamente impermeables que ni almacenan ni transmiten el agua.

Los acuíferos pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada por ellos, condiciones que varían según la posición estratigráfica de la formación. De esta manera, puede hablarse de los siguientes tipos:

- Acuíferos libres o no confinados: son aquellos que presentan una superficie libre de agua que está en contacto directo con la atmósfera, sometida por consiguiente a la presión atmosférica. Dicha superficie se denomina superficie freática o tabla de agua.
- Acuíferos cautivos, confinados o artesianos: en estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica y son formaciones permeables que son limitadas por capas impermeables. En este caso la formación se encuentra completamente saturada. Aquí no existe una superficie libre del agua, pero sí puede hablarse de una superficie piezométrica la cual es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua en el acuífero.
- Acuífero semiconfinados: son acuíferos que se encuentran completamente saturados de agua y están limitados ya sea por su base o por el techo, o por ambos, por una capa o formación semipermeable (acuitardo). Esta situación permite que haya un flujo entre acuíferos que se encuentren separados por el acuitardo, flujo que puede efectuarse en dirección de la diferencia de niveles piezométricos existente entre los mismos.

#### 4.3. Recarga de Acuíferos

La recarga de un acuífero es el proceso por el que se incorpora agua procedente del exterior, ya sea por un proceso natural, donde la precipitación cae directamente sobre el suelo y la infiltración supera la evapotranspiración, y el agua percola desde la zona radicular hasta la capa freática. O por un proceso de recarga superficial de aguas tratadas o de precipitación, destinadas a ser infiltradas a través de alguna tecnología, por fugas de sistemas de abastecimiento, irrigación de cultivos entre

otros. Es por esto que la recarga puede ser natural o artificial (ver figura 1) (Lerner, 1990; Chow, 1991; Guevara 1994; Custodio, 1997; Samper, 1997).

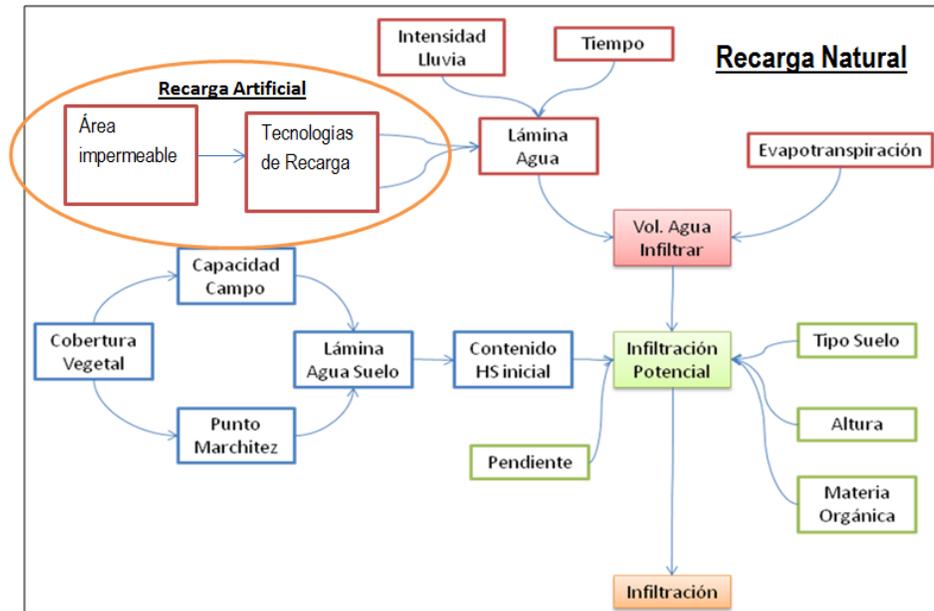


Figura 1. Modelo conceptual de recarga de acuíferos  
Fuente: Elaboración propia

Diversos autores han establecido metodologías para estimar la recarga de acuíferos precedentes de la relación lluvia – escorrentía y/o de la variación del balance hídrico. En la Tabla 2 se relacionan algunos de los métodos de mayor aplicabilidad para la determinación de la recarga.

Tabla 2. Métodos para determinar recarga de acuíferos.

| Método                      | Ventajas  | Desventajas  |
|-----------------------------|---|--|
| Balance hídrico superficial | Fácil aplicabilidad.  | No considera el comportamiento de la infiltración.   |
|                             | Considera diversos registros climatológicos (Precipitación, Temperatura, evaporación)<br>Permite considerar la humedad de almacenamiento en el suelo de manera teórica.   | No permite estimar de manera global la lámina, volumen o caudal en flujo continuo que puede ser potencialmente recarga del acuífero.   |
| Balance hídrico de suelos   | Dada su aplicabilidad, puede ajustarse mejor al contexto que se está manejando.<br>Permite alta flexibilidad en la aplicación de las metodologías usadas.   |  |
|                             | Contempla la infiltración como parte de la expresión, logrando una mayor aproximación.<br><br>Considera la capacidad máxima de infiltración del suelo, al igual que varias de sus características (cobertura vegetal, uso del suelo, pendiente del terreno).<br><br>Permite trabajar a escala mensual y diaria. | Asume demasiados valores teóricos, por lo cual requiere de trabajo in situ para la validación de dichos valores.<br><br>Sólo permite la aplicación de un número determinado de métodos para estimar variables tales como evapotranspiración. |

| Método                            | Ventajas  | Desventajas  |
|-----------------------------------|---|--|
| Balance<br>hídrico<br>subterráneo | Considera variables hidráulicas que están o van en función del comportamiento del acuífero en estudio.                      | Se requiere de información previa levantada in situ.   |
|                                   | Estima del comportamiento de la recarga a través del componente de porosidad eficaz obteniendo una estimación más ajustada. | Tiene un enfoque más desde la disponibilidad hídrica neta del acuífero, para lo cual requiere de registros históricos amplios para mantener. |

Fuente: Elaboración GIAS

Existen diferentes tipos de recarga. Según Vélez (ND) citando a Lerner (1990), divide las recargas en las siguientes categorías:

1. Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua lluvia
2. Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros
3. Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos
4. Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución
5. Recarga Urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado

#### 4.4. Problemáticas relacionadas con los acuíferos y la recarga de aguas subterráneas

##### 4.4.1. Crecimiento poblacional

El agua subterránea, se ha convertido en un tema de vital importancia en los últimos años, por tratarse de una reserva de agua dulce con las características de calidad apropiadas para ser fuente de abastecimiento humano (Jaramillo y Aristizabal, 2006).

El crecimiento poblacional es la principal causa de la urbanización y pavimentación del suelo, que en los últimos años ha provocado la limitación y/o inhibición en la recarga de las aguas subterráneas, afectando de igual forma la calidad de la misma (USEPA, 1983; Bannerman et al., 1993). Igualmente, el aumento de la población impacta las aguas subterráneas pues son estas una fuente alternativa de abastecimiento, lo que generaría un impacto adicional al aumentar la presión en cuanto a demanda y disminuir la entrada de agua.

De los 14 mil millones de kilómetros cúbicos de agua que tiene el planeta, aproximadamente el 3% es agua dulce; de este porcentaje el agua subterránea representa el 97%, lo que deja para el agua superficial embalsable tan solo el 0,015%; el resto del agua, se encuentra en la humedad del suelo y en los microorganismos (Monsalve, 1999; Graf, N.D.). Esta situación es crítica, debido a que por su fácil acceso, los ríos, que representan una cifra tan baja de agua (0,015%), abastecen el 67% de la población mundial, es decir, 4.539'407.946 personas<sup>1</sup>, teniendo en cuenta que cada veinte años, se duplica la demanda de agua.

Con el aumento de la población mundial, las cifras sobre disponibilidad de agua para abastecimiento y las fuentes de donde proviene la misma, se estima que para el año 2025 más de 3 mil millones de personas, podría vivir en países que sufren estrés de agua y 14 países pasarán, de padecer estrés a sufrir falta del recurso (Graf, N.D.).

<sup>1</sup> Basado en cálculos de las cifras de población del Banco Mundial. Indicadores de Desarrollo Mundial. 2009

El crecimiento poblacional afecta de manera directa la demanda de agua, pues se requieren nuevas zonas de cultivo, generación de combustibles, centros recreativos, entre otros. Según Hoff (2009), la producción de cultivos de secano y de regadío en conjunto, asciende a una demanda de agua de unos 7.000 km<sup>3</sup>/año, además cuando se introducen pastizales, la evapotranspiración total de la producción de alimentos alcanza de 15.000 a 20.000 km<sup>3</sup>/año, lo que equivale a casi la mitad de la escorrentía total de todos los ríos del mundo. Además, se extraen cerca de 8.300 km<sup>3</sup> de agua para abastecimiento humano (Chao et al., 2008) y el total de las extracciones de agua pueden llegar a 4.000 km<sup>3</sup>/año.

Por otro lado, debido al rápido desarrollo urbano ocurrido en la última mitad del siglo ha cambiado el porcentaje de personas que ahora viven en las ciudades (pasó del 29% en 1950 a 49% en 2007 y se espera 60% para 2030, -PRB, 2007-). Por otra parte la tasa de crecimiento de la población urbana en las diferentes partes del mundo varía ampliamente. En África y Asia la población se ha duplicado, mientras que, en el mismo período de tiempo Norteamérica ha crecido 23% y Europa 41%. La discrepancia en la tasa de crecimiento provoca diferentes impactos sobre las aguas subterráneas, por lo que se necesitan estudios locales (Kazemi, 2010).

El crecimiento poblacional, presenta impactos en la recarga de acuíferos debido a la concentración de la población en pequeñas áreas, esto sumado a los problemas con el manejo de las lluvias urbanas. Es así como por cuestiones de vivienda y transporte se impermeabilizan grandes áreas. Esto resulta en un cambio en el ciclo hidrológico. La infiltración y la recarga de acuíferos disminuye, cambian los patrones de escorrentía superficial hacia los ríos, hay mayor volumen de escorrentía lo que acelera el transporte de contaminantes y sedimentos de las áreas urbanas (Davis, 2005). La influencia de los patrones de escorrentía y el estado de los sistemas ecológicos que tiene la ciudad, no sólo impacta las áreas urbanas sino también los alrededores y aguas abajo de los ríos, además de reducir la recarga de los acuíferos que son fuente de abastecimiento (Simmons y Reynolds, 1982).

Colombia, a diferencia de otros países del mundo que tienen problemas en cuanto a oferta hídrica, ocupa uno de los primeros lugares en el mundo, en cuanto a cantidad del recurso. Presenta una precipitación anual que bordea los 3 mil milímetros en el área continental. Esta cantidad de agua es suficiente para generar una considerable escorrentía que nutre ríos, quebradas y diferentes tipos de almacenamientos. La oferta hídrica generada en términos de rendimiento es de 58L/s/km<sup>2</sup>; al comparar esta cifra en el plano mundial, vemos que sextuplica la cantidad de agua promedio y triplica la cantidad de agua en Latinoamérica (IDEAM, 2011).

La problemática en el país, se presenta es en términos de disponibilidad, que involucra conceptos muy interrelacionados como cantidad y calidad del recurso. La cantidad de agua, se ve limitada, como se mencionó anteriormente, por factores como la concentración de la población, es decir, altas densidades poblacionales (eje cafetero), ciudades superpobladas (Bogotá, Medellín, Cali, entre otras) y por sequías y fenómenos climáticos (regiones costeras). En términos de calidad, la falta de adecuados sistemas de tratamiento de aguas residuales ha provocado la contaminación del 50% de los recursos hídricos del país (IDEAM, 2011).

Si bien la situación nacional no es muy crítica, la ausencia de estudios detallados y completos sobre los acuíferos del país, refleja vacíos en la planificación de las ciudades y en la gestión del recurso

hídrico. Los vacíos son notables, en ciudades como Pereira, en la que por acuerdo municipal (No. 23. Artículo 25), se estableció como una de las áreas de expansión urbana una zona que coincide con la zona de recarga del acuífero del sector Cerritos y conociéndose de antemano, que la principal fuente de recarga es la precipitación directa sobre el suelo.

Como alternativa de abastecimiento y en contraposición al fuerte aumento de la demanda de agua, el recurso hídrico subterráneo se ha convertido en una fuente directa de abastecimiento, principalmente en zonas donde la población se encuentra dispersa. Sin embargo, al no existir una adecuada planificación del agua, los acuíferos están sufriendo varias problemáticas, por un lado están siendo sobreexplotados y llevados al límite de su capacidad; en general, se utilizan 25 veces más rápido de lo que tardan en recuperarse lo que causa problemas de intrusión salina y contaminación (Muthanna et al., 2007).

El cambio climático, es un factor que altera directamente la disponibilidad de agua subterránea, debido a que con la alteración del clima, se alteran los factores de entrada de agua al sistema de acuíferos como es la precipitación. En la Tabla 3 se relacionan los períodos en los que han ocurrido fenómenos no modales para ser tenidos en cuenta en la alteración de la recarga con cada uno de los fenómenos.

**Tabla 3.** Períodos de ocurrencia de fenómenos de NIÑO y NIÑA

| EL NIÑO (SEQUÍA) |           |           | LA NIÑA (LLUVIA) |           |           |
|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
| Débil            | Moderado  | Fuerte    | Débil            | Moderado  | Fuerte    |
| 1963-1964        | 1951-1952 | 1965-1966 | 1954-1955        | 1950-1951 | 1955-1956 |
| 1968-1969        | 1957-1958 | 1972-1973 | 1956-1957        | 1970-1971 | 1973-1974 |
| 1969-1970        | 1977-1978 | 1982-1983 | 1962-1963        | 1998-1999 | 1975-1976 |
| 1976-1977        | 1987-1988 | 1991-1992 | 1964-1965        | 2000-2001 | 1988-1989 |
| 1986-1987        | 1994-1995 | 1997-1998 | 1967-1968        | 2007-2008 |           |
| 1992-1993        | 2002-2003 |           | 1971-1972        |           |           |
| 2004-2005        | 2009-2010 |           | 1974-1975        |           |           |
| 2006-2007        |           |           | 1984-1985        |           |           |
|                  |           |           | 1995-1996        |           |           |
|                  |           |           | 1999-2000        |           |           |
|                  |           |           | 2008-2009        |           |           |

Fuente: NOAA, 2012

#### 4.4.2. Impactos de la pavimentación en la recarga de agua

Debido al crecimiento, las zonas de recarga de los acuíferos están siendo destinadas para la construcción, lo que provoca sellamiento e impermeabilización del suelo (Perry y Nawaz, 2008), además se ha comprobado en varios estudios que la urbanización con frecuencia resulta en un deterioro de la calidad de las aguas subterráneas, conduciendo a provocar elevados niveles de nitratos, boro, cloruro, sulfato, pesticidas, metales pesados y patógenos, además de otros aditivos específicos del sitio (USEPA, 2002; Kazemi, 2010).

En lo documentado por Schueler (1994) se informó de la disminución notable en la salud de los ecosistemas cuando se impermeabiliza más del 20% del suelo de la cuenca hidrográfica.

En los impactos sobre el cambio en la temperatura del agua, se tienen discrepancias según los sitios de estudio, por ejemplo, Taniguchi et al. (2002), mostraron que la pavimentación provoca el aumento en la temperatura de las aguas lo que produce cambios en la química y dinámica del flujo de las aguas. Mientras que Kazemi (2010), mostró que la urbanización reduce la temperatura del agua, altera los flujos del sistema e incrementa la acidez. Lo que es claro, es que se alteran los flujos de agua del sistema por cambios de temperatura.

Otra problemática asociada al crecimiento poblacional y a la pavimentación e impermeabilización del suelo, está relacionada con aspectos de escorrentía urbana y contaminación de fuentes superficiales. Aspectos cualitativos de la escorrentía de zonas urbanas y sus impactos sobre las aguas receptoras está tomando cada vez más atención, pues la composición de dichas aguas es muy diferente a la de las zonas rurales más estudiadas.

El sellamiento del suelo, generalmente inhibe o retarda la infiltración del agua proveniente de la precipitación y/o escorrentía (Endreny y Collins, 2009) por lo que se altera el ciclo hidrológico del sitio, pues la infiltración es el principal proceso de recarga de los acuíferos y lo que mantiene una buena calidad de las aguas subterráneas; al filtrarse el agua a través del suelo, los contaminantes que puede arrastrar el agua, son retenidos en los poros del mismo (Trowsdale y Simcock, 2011).

#### **4.5. Alternativas de solución**

Si bien el tema de las aguas subterráneas ha sido muy estudiado en zonas áridas o semiáridas donde los valores de evapotranspiración superan la precipitación, en países como Colombia aunque la precipitación es alta, la mala planificación de las cuencas por ende de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, provoca impactos que no son notorios en el presente pero que afectarán el futuro de las poblaciones y ecosistemas.

El agua lluvia, no se consideraba un recurso aprovechable para las actividades humanas, por lo anterior, los sistemas de alcantarillado eran mixtos (y siguen siendo así en muchos países entre ellos Colombia) y combinaban en un mismo sistema tanto las aguas pluviales como las residuales. La forma tradicional de tratar dichas aguas, fue cambiando en la medida en que se incrementaban las problemáticas por escasez de agua o en que se mejoraban los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Domínguez y Uribe, 2005).

Los enfoques tradicionales en la gestión del recurso hídrico, han centrado sus estudios e implementado tecnologías principalmente para reducir inundaciones más no en el tema de recarga (House et al., 1993; Petterson, 1998; Winer, 2000; Marlin et al., 2002). Sin embargo, dada la importancia de los acuíferos y sus ventajas en un planeta que a futuro sufrirá escasez de agua, en las últimas décadas se ha tratado el tema de la recarga artificial de acuíferos por medio de diferentes técnicas (Asano y Cotruvo, 2004).

Así, la recarga de acuíferos y a su vez la protección de fuentes superficiales se han convertido en temas adicionales a la gestión integral del recurso hídrico (Muthanna et al., 2006; DiBlasi et al.,

2009), ahora se tienen en cuenta factores de detención, retención y recarga. A partir de ello, se ha dado la introducción de controles locales, atenuación del flujo y tratamientos biológicos naturales o construidos como lagunas, humedales, jardines de lluvia, asfalto permeable, entre otros.

En Estados Unidos, el control de las aguas lluvias se ha introducido como un tema en la gestión del agua en muchos estados, entre ellos están Wisconsin, Nebraska, Minnesota, entre otros (Rain Garden Network, 2005). En Wisconsin se establecieron normas de funcionamiento y restricción para las aguas pluviales, en los que si las zonas de urbanización coinciden con áreas de recarga, se debe garantizar el 60% del volumen de infiltración original sin pavimentación, para un año promedio de lluvia (Selbig, 2010).

El condado de Prince George's Maryland, integró la Ley de agua limpia con el fin de regular el vertimiento pluvial como una fuente puntual. En dicha Ley se incluyen prácticas de limpieza de las calles, implementación de techos verdes, asfalto permeable y jardines de lluvia, que le han otorgado también un alto valor estético a la zona (Aslesun et al., 2009).

De las diferentes soluciones que existen para recargar acuíferos, en un trabajo anterior realizado por el grupo de Investigación en Agua y Saneamiento GIAS de la Universidad Tecnológica de Pereira, se seleccionaron tres alternativas, que según las características de la zona de estudio, podían dar respuesta a la problemática presentada. Se tuvieron en cuenta características climáticas, de terreno, económicas e institucionales. Las tres alternativas tenidas en cuenta fueron, los jardines de agua lluvia, el asfalto permeable con infiltración de agua lluvia; y los pozos de inyección, asociados a aguas tratadas. Estas tres alternativas fueron priorizadas debido a un factor principal asumido, el cual fue el área. Lo anterior, debido a que la zona de expansión Occidental de Pereira es un área pequeña comparada con el crecimiento de la ciudad, además de ser terrenos de costos elevados. Es así como las zanjas de infiltración y las lagunas de infiltración no fueron incluidas en la priorización, por ser dos tecnologías que requieren grandes extensiones de terreno.

Como resultado de dicha priorización, se obtuvo que los jardines de lluvia, son la alternativa más acorde a las necesidades de acuerdo al clima, el bajo costo de implementación y mantenimiento y a las necesidades de la autoridad ambiental y la alcaldía municipal, que incluyen no sólo la calidad del agua, sino también el valor estético de la zona.

A continuación se realizará una descripción rápida de las alternativas existentes y se hará especial énfasis en los jardines de lluvia, alternativa evaluada en este estudio.

#### **4.5.1. Recarga de acuíferos con aguas tratadas**

Las aguas tratadas representan una fuente importante de recursos para el manejo y recarga de las aguas subterráneas. El éxito de esta técnica, depende de que la calidad de agua cumpla los requisitos de calidad para infiltración de aguas, además de una aceptación y acompañamiento social.

En casos donde las zonas de recarga de acuíferos están sufriendo procesos de urbanización, es posible asociar zonas de recarga, a unidades habitacionales, uniendo los sistemas de tratamiento de

las aguas residuales domésticas a otro sistema de infiltración definido. Con dichas aguas existen las siguientes técnicas:

#### a. Pozos de inyección de aguas tratadas para recarga de acuíferos

Consiste en la penetración de un tubo hacia el acuífero que se desee recargar para transportar las aguas, previamente tratadas hasta el mismo. Según Monroy (2008), los pozos de inyección deben ubicarse a una distancia de al menos 600 metros de los pozos de extracción, el agua inyectada debe permanecer como mínimo un año en el acuífero antes de su extracción, además son necesarios pozos de monitoreo y revisiones sistemáticas que aseguren la eficacia del tratamiento.

Este tipo de estrategia es sumamente costosa, tanto por las inversiones iniciales requeridas, como por los gastos de operación, e implica mayor grado de riesgo de contaminación del acuífero. Sin embargo, representa una alternativa para ayudar a frenar la crisis de los acuíferos.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales para inyección deben incluir múltiples barreras independientes para detener microorganismos y contaminantes químicos; continuo monitoreo tóxico y epidemiológico, así como evaluaciones de confiabilidad y riesgo, en la figura 2 se presenta el esquema funcional de un pozo de inyección para recarga de acuíferos con aguas tratadas.

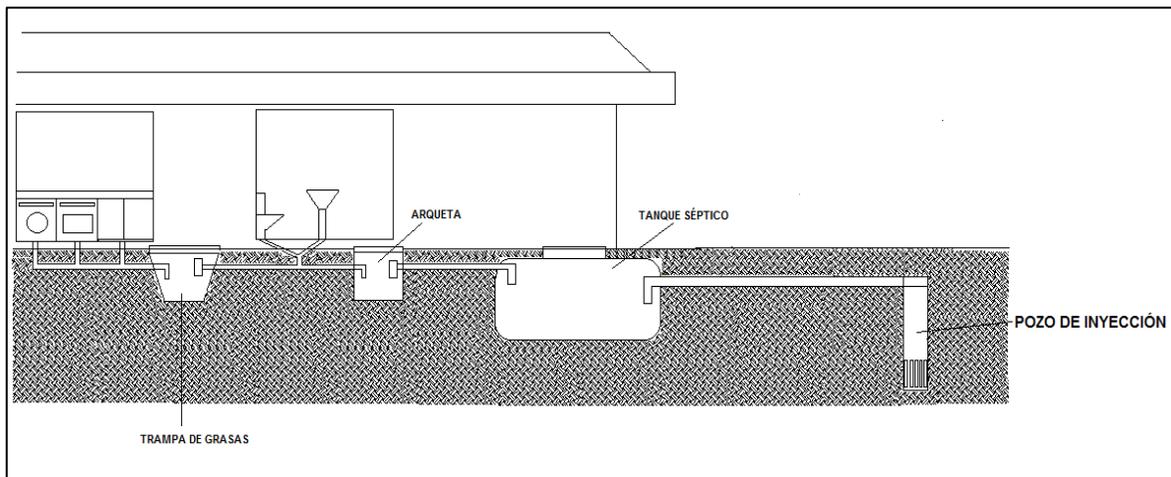


Figura 2. Pozo de inyección para recarga de acuíferos

#### 4.5.2. Recarga de acuíferos con aguas pluviales

A mediados del siglo pasado, cuando se inició la etapa actual de acelerada urbanización, hubo varios intentos, muchos exitosos, de infiltrar agua pluvial en zonas de recarga en el área urbana, como medida para prevenir inundaciones y recuperar los niveles de agua en los pozos (DiBlasi et al., 2009). El reto para la gestión de la recarga con agua pluvial es el manejo de los volúmenes repentinos, los cuales requieren ser almacenados temporalmente, dado que los procesos de infiltración son más lentos.

### a. *Trincheras de infiltración*

Según Fernández (2005) donde existan suelos con una alta permeabilidad, es posible, por medio de franjas de infiltración, realizar el riego para los cultivos y asimismo recargar acuíferos. Son canales de sección rectangular o trapezoidal, generalmente asimétricos, con pendiente horizontal, ubicados a intervalos regulares y construidos transversalmente a la máxima pendiente del terreno (Ver figura 3).

Una de sus funciones es acortar la longitud de la pendiente, disminuyendo los riesgos de la escorrentía. La otra es interceptar la escorrentía procedente de las franjas de terreno situadas entre las zanjas, favoreciendo su infiltración.

El tabique es construido cada nueve (9) metros con la finalidad de distribuir mejor el agua.

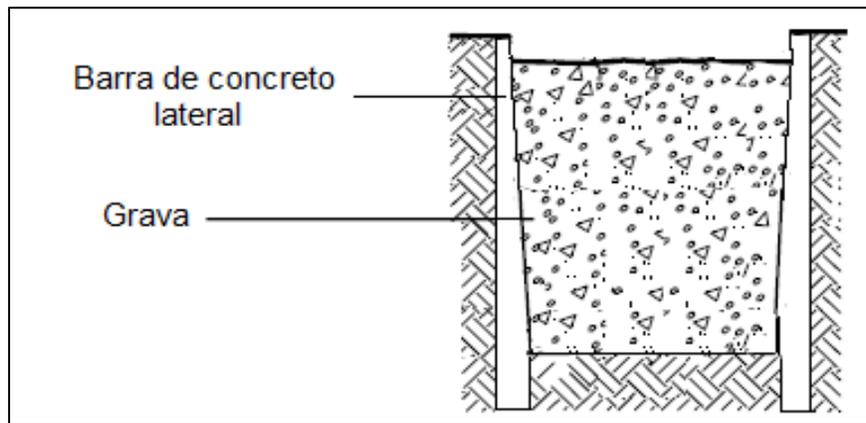


Figura 3. Trinchera de infiltración para recarga de acuíferos

### b. *Lagunas de infiltración para recarga de acuíferos*

La captación de picos de lluvia a través de lagunas de infiltración representa la estrategia con mayor potencial, y menos costo, para aumentar la recarga de los acuíferos que alimentan los pozos de zonas urbanas o con procesos de urbanización.

La desviación e infiltración de picos de lluvia antes de su llegada a la zona urbana, convertiría los volúmenes en un recurso valioso.

En experiencias internacionales, las lagunas de infiltración son creadas en tierras agrícolas pues aparte de infiltrar agua hacia el acuífero, se favorecen los cultivos debido a la materia orgánica depositada por las aguas lluvias, o sobre zonas de alta permeabilidad, de manera temporal, rotativa y voluntaria. Esta técnica consiste en generar una depresión en el suelo de aproximadamente un metro de profundidad y dependiendo de la cantidad de agua que se quiera infiltrar se determina el área.

Esta alternativa requiere de un espacio considerable para su implementación, debido a que no se alteran las condiciones del suelo y la recarga se presentaría de forma natural (Ver figura 4).

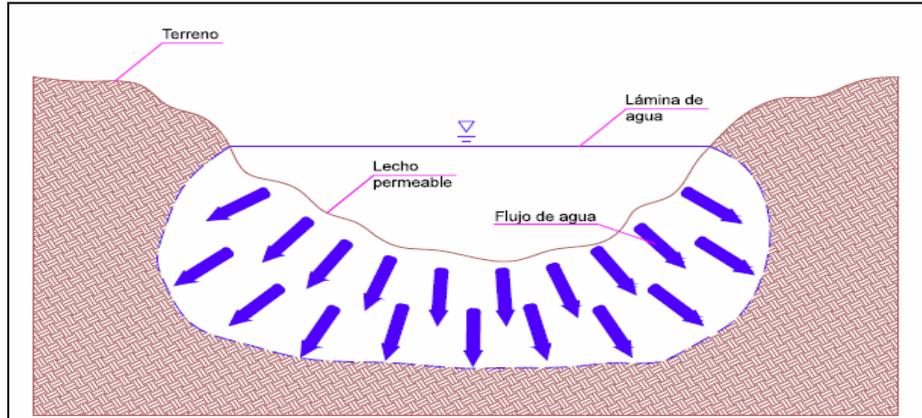


Figura 4. Lagunas de infiltración para recarga de acuíferos

### c. Asfalto permeable para recarga de acuíferos

El asfalto permeable ha sido utilizado para reducir el área efectivamente impermeable en una zona urbana. La capacidad de infiltración y de almacenamiento que pueden presentar contribuye al control hidrológico y ambiental de las aguas lluvias urbanas (Kipkie y James, 2000) además de contribuir con procesos de infiltración en el suelo. Los objetivos de los pavimentos permeables son recargar los acuíferos, reducir el volumen de escorrentía y el caudal máximo debido a las precipitaciones y disminuir la contaminación del escurrimiento superficial debido al lavado de contaminantes de las superficies urbanas. Consiste en aleación de piedra, cal y asfalto, con un 25% de espacio que permite la infiltración del agua. Una de las ventajas que presenta la tecnología, está reflejada en el mantenimiento, pues no es necesaria ninguna clase de intervención después de su construcción. En cuanto a costos, se ha estimado un 22% más que el asfalto convencional (Ver figura 5).

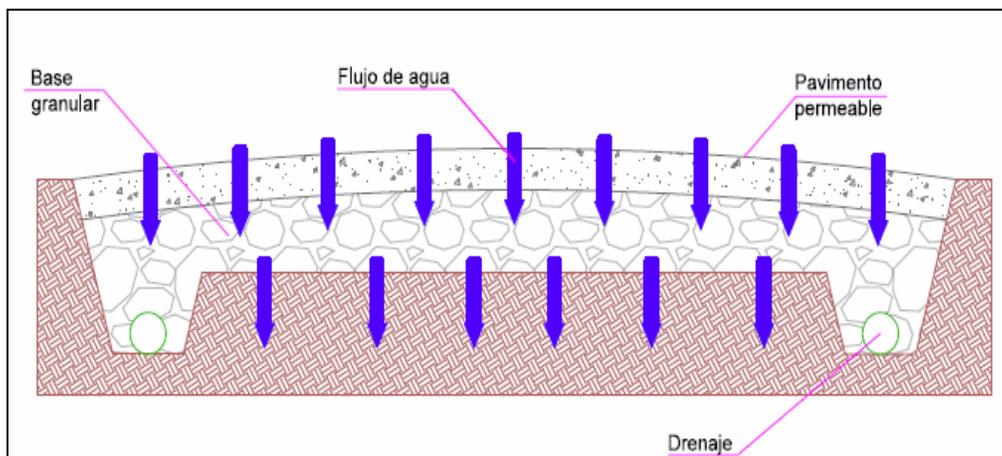


Figura 5. Asfalto permeable para recarga de acuíferos

### d. Jardines de lluvia

Los jardines de lluvia hacen parte de la estrategia de Desarrollo de Bajo Impacto que se ha venido implementando en diferentes países. Como respuesta a la problemática de impermeabilización del

suelo, la escorrentía superficial urbana y el retraso en la recarga de las aguas subterráneas, los jardines de lluvia se han concebido como alternativas ecotecnológicas que ayudan a mitigar dichas problemáticas. Es un método sostenible para el desarrollo de cuencas y restauración ecológica, donde se minimiza la impermeabilidad y se maximiza el ciclo hidrológico naturalizado y ya están siendo ampliamente utilizados en diversas partes del mundo (Woods-Ballard et al., 2007).

Son depresiones en el suelo que constan de una zona de encharcamiento, una zona de materia orgánica donde se desarrollarán las raíces de las plantas utilizadas, una zona de almacenamiento constituido por material filtrante (grava, arena o arcilla), para posteriormente encontrarse la zona de suelo nativo. Se presenta también en algunos casos, un tubo de drenaje del agua para evacuar las aguas que no se puedan infiltrar, ya sea por saturación del suelo frente fuertes eventos de lluvia (Figura 6. Estructura de un Jardín de Lluvia).

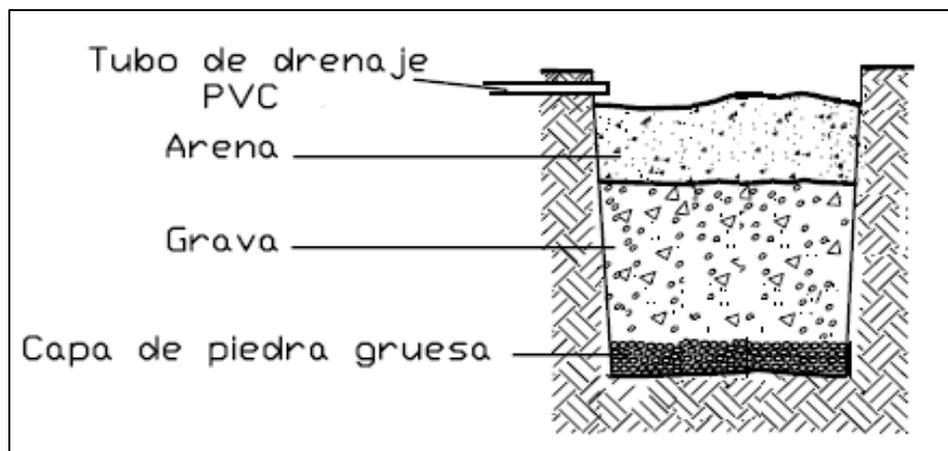


Figura 6. Estructura de un Jardín de Lluvia

Su auge se debe a la flexibilidad que presentan a la hora de su implementación pues si bien todos tienen unas características básicas como un suelo poroso plantado con vegetación nativa (Prince George's County, 2002) todos varían en cuanto a tamaño, ubicación, valor estético y rentabilidad en comparación con otro tipo de tecnologías (Davis, 2005; Srivastava y Majumder, 2008; Trowlade y Simcock, 2011).

Se habla de jardines de lluvia, los que no sólo atrapan e infiltran de manera efectiva el agua proveniente de la precipitación (Dillon et al., 1999; Winogradoff y Coffman, 2001; USEPA, 2004), sino que son adaptados igualmente para la infiltración de otras aguas, como por ejemplo las provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales (Lin et al., 1999; Carrera y Gaskin, 2008; Sánchez, 2008). Estos sistemas, han presentado ventajas no sólo por la infiltración del agua y la continuidad del acuífero en términos de cantidad sino también se habla de calidad, pues los jardines retienen algunos contaminantes que el agua puede arrastrar debido a la escorrentía por suelos contaminados u otros factores, por medio de técnicas como decantación, filtración, adsorción, descomposición, intercambio iónico y volatilización (Saayman y Adams, 2002; USEPA, 2004; Dietz y Clausen, 20005; Dietz y Clausen, 2006; Smith y Hunt, 2007). Se sabe pues que la recarga, aumenta el caudal y reduce significativamente el sobregiro de las aguas subterráneas y la intrusión de agua de mar en la zona (Munevar y Marino, 1999).

En las dos últimas décadas, los jardines de lluvia han arrojado resultados que cada vez mejoran la eficacia de los mismos en la reducción de grandes volúmenes de escorrentía y en la disminución de contaminantes como sedimentos y metales (Blecken et al., 2009; Davis et al., 2009).

Estas tecnologías, poseen a parte de su labor en la infiltración, la mejora en la calidad del agua de recarga y la reducción de la escorrentía, atributos ecológicos que le dan un valor agregado a la hora de su implementación, entre estos se encuentran la retención de contaminantes mediante ciclos de nutrientes, captura de carbono, aumenta las zonas de hábitat para especies y la conectividad del paisaje, embellecimiento de la zona, entre otros (Endreny y Collins, 2009).

Al ser herramientas de infiltración, presentan complejos procesos no sólo al interior de la estructura como lo es el movimiento del agua en el suelo, sino que depende de procesos externos relacionados con el clima como son la intensidad de la lluvia (relacionada directamente con la precipitación) y la evapotranspiración, la superficie de la zona ajardinada y disponible para la captación, el tipo de suelo o cobertura vegetal, el contenido de la humedad inicial del suelo y el grado de saturación del mismo, la infiltración y las necesidades hídricas de las especies a ser plantadas (Fernández, 2009).

- **Estudios realizados**

Si bien la mayor parte de los estudios relacionados con los jardines de lluvia se han centrado en la recarga de acuíferos (Shuster et al., 2007), existen otros que se han centrado en dar explicación a procesos individuales ocurridos al interior del jardín y que aportan al mejoramiento en la implementación de esta tecnología. Es así como existen varias configuraciones en cuanto a área, tipo de plantas, medio filtrante, remoción de contaminantes y tipo de vegetación.

En Nebraska, han optado por la creación de jardines de lluvia sin excavación y medio filtrante, sino sólo la siembra, en ciertas áreas, de especies de plantas de raíces profundas que abran paso a la infiltración del agua y retención de contaminación. Se ha demostrado, en los diferentes estudios realizados en esta zona, remoción de sólidos suspendidos totales, fósforo, nitrógeno, metales pesados, aceites y grasas y bacterias (Davis, 2001; Dietz y Clausen, 2005; Hunt et al., 2006; Li y Davis, 2009).

Estudios en el laboratorio de la Universidad de Maryland han reportado reducciones significativas en flujos de salida de células de bioretención (Davis, 2008), sin embargo se ha reportado también que la situación a escala de laboratorio difiere de la realidad en campo.

En Minneapolis el estudio realizado concluyó que los jardines mejoran la infiltración y reducen las concentraciones de iones disueltos además de ser muy eficientes en cuanto a las relaciones de área de las zonas impermeables dirigidas y el tamaño del jardín con relaciones de 1:15 es decir, el jardín filtra, sin rebose, agua proveniente de un tamaño 15 veces mayor a su área (Tornes, 2005).

Autores coinciden en que las mayores infiltraciones se dan en épocas de verano (Selbig, 2010; Hunt et al., 2006).

La vegetación, juega un papel importante en los jardines de lluvia. Coustumer et al. (2012) compararon cuencas de bioretención sin plantas y jardines de lluvia con plantas, concluyendo que estas reducen la obstrucción formando macroporos en la superficie.

Virahsawmg et al. (2013) analizaron la infiltración del agua en los alrededores de las plantas sembradas en el jardín, concluyendo que es allí donde se infiltra mayor volumen de agua, y que es la vegetación la que evita la obstrucción de la primera capa, reportando 50mm/h más de infiltración que en el resto del jardín.

Kuscow (1995) demostró que usar césped, podría limitar la infiltración del agua, pues este hacía que el agua más fácilmente se escurriera. Craig (2007) corrobora esta información al comparar dos (2) jardines de lluvia en los que utilizaba césped y plantas de pradera, obteniendo mayores infiltraciones y remociones en el último. Lo mismo reportan Steinke et al (2007).

En los últimos años, los estudios han tratado de dar mayor relevancia a los temas de calidad del agua, reportando remoción de contaminantes. Se ha encontrado que los jardines de lluvia son eficientes en la remoción principalmente de sólidos suspendidos, fósforo total, nitrógeno (Walsh, 2000; Clausen, 2005; Dietz, 2007; Roy-Porier et al., 2010) y metales pesados (Hatt et al., 2007; Henderson et al., 2007). En eventos de lluvia simulados se ha encontrado remoción de nitratos (Hsieh y Davis, 2005; Passeport et al., 2009).

La eliminación de sólidos suspendidos totales por retención en el medio ha sido común en todos los estudios analizados, variando el tema de la obstrucción de la primera capa del jardín y del mantenimiento del mismo, donde algunos han reportado obstrucción en dos (2) años y la reducción del rendimiento global del jardín, disminuyendo la tasa de infiltración (Hatt et al., 2008) y otros que durante cinco (5) años de estudio no han realizado ningún raspado de la capa superior (Selbig, 2004).

Otro tema común de remoción ha sido el fósforo total, que se da en la primera capa del jardín de lluvia (Hsieh y Davis, 2005), pues en esta zona la infiltración es más lenta por ser materia orgánica permitiendo que las partículas se sedimenten, atrapando así sedimentos y fósforo unido a ellos.

La remoción de nitrógeno ha sido un tema complejo que ha presentado diferencias en cada estudio. En algunos se han encontrado remociones, argumentando que las propiedades del suelo y la presencia de oxígeno y materia orgánica favorecen su eliminación (Jetten, 2001; Davis et al., 2006), otros reportan pequeñas remociones o mantenimiento de los valores iniciales de nitrógeno pues se requiere una zona saturada en la parte inferior del jardín (Kim et al., 2003).

Otros autores han coincidido en que la remoción de nitrógeno en jardines que usan como medio filtrante la arena, son menores en los que utilizan arcilla debido a que las tasas de infiltración en arena son más rápidas y la capacidad de intercambio de iones es baja, inhibiendo la formación de la zona saturada anaeróbica necesaria para que se dé la desnitrificación (Ho et al., 1992; Amado et al., 2012).

La utilización de arcillas en jardines de lluvia, es una opción siempre y cuando la necesidad principal sea la remoción de contaminantes, especialmente nitrógeno, pues permitiría la creación de la zona

saturada y un mayor número de procesos biológicos (Ouyang et al., 2011), el inconveniente es que los tiempos de infiltración disminuyen y así mismo el rendimiento hidráulico lo que ocasionaría desbordamientos ante grandes eventos de escorrentía (Cho et al., 2009).

Para mantener el rendimiento hidráulico y lograr mayores procesos biológicos, se han implementado sistemas bifásicos conocidos como tecnologías de reactor discontinuo secuencial que mejoran la eliminación de contaminantes orgánicos como hidrocarburos, bifenilos, herbicidas y nitratos (Kapagiannidis et al., 2012). En estos se crean condiciones aeróbicas y anaeróbicas que proporcionan un campo mayor de aceptores de electrones y más microorganismos para la degradación y un tiempo mayor de retención que asegura la mineralización completa de los contaminantes y manteniendo la infiltración (Grewal et al., 2011).

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Objetivo 1: Caracterización hidrológica de la zona de expansión occidental (ZEOX)

#### 5.1.1. Delimitación y análisis de problemáticas en la ZEOX

Para la realización del presente proyecto, se evaluó inicialmente, el estado actual de la zona de expansión occidental, analizando en el contexto del ordenamiento territorial y del acuífero de Pereira, la problemática relacionada. Para esto, por medio de cartografía, se delimitó la zona, identificando área, usos del suelo, proyección de densidades y los planes parciales que se encuentren aprobados a la fecha. Se realizó un recuento del estado actual del uso del agua subterránea, por medio del análisis de los puntos de agua que se han actualizado.

#### 5.1.2. Balance Hídrico

El balance hídrico superficial se determinó con el fin de obtener la cuantificación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea, el cual se genera por flujo descendente debido a la fuerza de gravedad o por un flujo horizontal debido a las diferentes condiciones hidráulicas de la capa que constituye el perfil del suelo (Balek, 1988), aplicando la Ecuación 2 que es la adaptación o contextualización de la Ecuación 1 (Chow, 1991).

**Ecuación 2.** Ecuación de continuidad para el cálculo del balance hídrico superficial

$$BH = P - Evt - Esc - ds$$

Donde;

BH: Balance hídrico (mm).

P: Precipitación media de la zona de estudio (mm).

Evt: Evapotranspiración (mm).

Esc: Escorrentía superficial (mm).

ds: Almacenamiento de humedad en el suelo (mm).

A partir del análisis de la Ecuación 2, se asumieron dos (2) posibles escenarios de respuesta los cuales se describen en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Escenarios de respuesta hídrica

| Escenario              | Interpretación   |
|------------------------|--|
| <i>Exceso hídrico</i>  | Se presenta cuando se arroja un resultado positivo de la Ecuación 2, lo cual indica que queda agua disponible y se asume como la lámina o volumen potencial de recarga del acuífero. De acuerdo con lo planteado por Chow (1991) y Guevara (1994), indica que el valor de los componentes de entrada (parámetros positivos) es mayor al valor de los componentes de salida (parámetros negativos) definidos en dicha ecuación. |
| <i>Déficit hídrico</i> | Se presenta cuando la Ecuación 2 arroja un resultado menor o igual a cero, lo cual indica que no se tiene agua disponible y se asume que no existe recarga al acuífero. De acuerdo con lo planteado por Chow (1991) y Guevara (1994), indica que el valor de los componentes de salida (parámetros negativos) es mayor al valor de los componentes de entrada (parámetros positivos) definidos en dicha ecuación.              |

Fuente: Elaboración GIAS

Los escenarios anteriores se contemplaron para dos periodos de análisis distintos, tomando como referencia el comportamiento climático de la zona, que se caracteriza por presentar variaciones ante la influencia de periodos de sequía y lluvias prolongadas, los cuales se relacionan a continuación.

### Período general

Es la agrupación de todos los registros históricos de cada una de las variables contempladas sin establecer periodos de comportamiento especial que altere el comportamiento promedio de cada uno de éstos. Para efectos de este estudio se trabajó con la información media mensual multianual.

### Período no modal

Hace referencia a la agrupación de los registros históricos de cada una de las variables consideradas, donde se tuvo un comportamiento de sequía o lluvia prolongado (Ver Tabla 5), que en la zona de expansión occidental de Pereira se manifiesta a través del fenómeno del NIÑO (sequía) como del fenómeno de La NIÑA (lluvia) de acuerdo con lo definido por NOAA (2012). Este periodo se trabajó con la información media mensual multianual de los periodos no modales tanto del periodo NIÑO como del periodo NIÑA, previa calibración hidrológica con lo cual, se descartaron los registros atípicos o anormales registrados fuera del periodo de ocurrencia de alguno de los fenómenos mencionados.

**Tabla 5.** Periodos de ocurrencia de fenómenos de NIÑO y NIÑA

| EL NIÑO (SEQUÍA) |           |           | LA NIÑA (LLUVIA) |           |           |
|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
| Débil            | Moderado  | Fuerte    | Débil            | Moderado  | Fuerte    |
| 1963-1964        | 1951-1952 | 1965-1966 | 1954-1955        | 1950-1951 | 1955-1956 |
| 1968-1969        | 1957-1958 | 1972-1973 | 1956-1957        | 1970-1971 | 1973-1974 |
| 1969-1970        | 1977-1978 | 1982-1983 | 1962-1963        | 1998-1999 | 1975-1976 |
| 1976-1977        | 1987-1988 | 1991-1992 | 1964-1965        | 2000-2001 | 1988-1989 |
| 1986-1987        | 1994-1995 | 1997-1998 | 1967-1968        | 2007-2008 |           |
| 1992-1993        | 2002-2003 |           | 1971-1972        |           |           |
| 2004-2005        | 2009-2010 |           | 1974-1975        |           |           |
| 2006-2007        |           |           | 1984-1985        |           |           |
|                  |           |           | 1995-1996        |           |           |
|                  |           |           | 1999-2000        |           |           |
|                  |           |           | 2008-2009        |           |           |

Fuente: NOAA, 2012

### Precipitación media.

La Precipitación Media, se calculó empleando el método de Isoyetas mensuales a partir de la espacialización de las estaciones pluviométricas de influencia sobre el área de estudio, el trazado de cada isolínea a partir del uso de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) y la aplicación de la Ecuación 3, tanto para el periodo general como el periodo no modal.

**Ecuación 3.** Cálculo de la Precipitación media en la zona de estudio

$$Pm = \frac{\sum_{j=1}^n Pj * Aj}{A}$$

Donde;

Pm = Precipitación Media (mm/mes)

Aj = Área de la franja i – ésima determinada por isoyetas consecutivas (Km<sup>2</sup>, ha).

Pj = Precipitación media de la franja iésima (mm).

A= Área total de la zona de estudio (Km<sup>2</sup>, ha).

### Evapotranspiración

Se estimó la evapotranspiración media potencial y la evapotranspiración potencial respecto al uso del suelo. Dichos cálculos se realizaron a escala mensual, aplicando el método de Penman – Monteith relacionado en la Ecuación 4, debido a que tiene en cuenta un mayor número de registros climáticos y además contempla todas las variables que afectan de manera directa esta variable (MAVDT, 2004; Jiménez, 1992).

**Ecuación 4.** Cálculo evapotranspiración en la zona de estudio

$$ETP = \frac{R_n \Delta + \left[ \frac{\rho * c_p * \delta e}{r_a} \right]}{\lambda * \left[ \Delta + \gamma * \left( 1 + \left( \frac{r_s}{r_a} \right) \right) \right]}$$

Donde;

ETP= Evapotranspiración media (mm).

R<sub>n</sub>= Radiación neta (W/m<sup>2</sup>).

Δ=Pendiente de la curva de presión de vapor a la temperatura media del aire (kPa/C°).

ρ=Densidad del aire a presión constante (kg/m<sup>3</sup>).

$c_p$  = Capacidad térmica del aire húmedo (J/kg/C°).

$\delta_e$  = Diferencia entre la presión de vapor saturante  $e_s$  (kPa) y la presión de vapor efectiva en el aire  $e_a$  (kPa); es decir:

$$\delta_e = e_s - e_a$$

$r_a$  = Resistencia aerodinámica (s/m).

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua (J/kg).

El cálculo de la evapotranspiración potencial con respecto al uso del suelo se realizó a partir de la evapotranspiración media potencial y el coeficiente de cultivo (Kc) con base en los usos de suelo de la zona de estudio, aplicando la Ecuación 5.

**Ecuación 5.** Cálculo evapotranspiración media potencial respecto al uso del suelo

$$ETV = Kc * ETP$$

Donde;

ETV: Evapotranspiración respecto al uso del suelo (mm).

Kc: Coeficiente del cultivo (adm).

ETP: Evapotranspiración potencial (mm).

### Retención (S)

La retención representa el valor o lámina de precipitación que se retiene por parte de cobertura vegetal o usos de suelo establecidos en la zona de estudio a través del número de curva CN utilizando la Ecuación 6 (SCS, 1968).

**Ecuación 6.** Estimación de la Retención en la zona de estudio

$$S = \left( \frac{25400}{CN} \right) - 254$$

Donde;

S= Retención (mm).

CN= Número de curva de escorrentía (adm).

### Escorrentía (E)

Es la lámina de agua que se estima que se infiltra o se escurre superficialmente, la cual va en función de la precipitación de acuerdo a la expresión que relaciona en la Ecuación 7 para determinar la escorrentía o escurrimiento, se aplicó el método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS,1968), el cual estima la escorrentía superficial de una zona de estudio a partir de registros de precipitación (horaria, diaria o mensual), la Retención (S) y el Número de Curva de Escorrentía (CN).

**Ecuación 7.** Estimación de la escorrentía en la zona de estudio.

$$E = \frac{(P - (0.2 * S))^2}{P + (0.8 * S)}$$

Donde;

E= Escorrentía (mm).

P=Precipitación media (mm).

S=Retención (mm).

## 5.2. Objetivo 2: Determinación eficiencia de jardines de lluvia en términos de cantidad y calidad

### 5.2.1. Relación precipitación, infiltración y recarga

- **Determinación Infiltración**

Para conocer el comportamiento de la infiltración en la zona de estudio, se hizo la selección de los usos más representativos (piña, guadua, café, cítricos, pasto, yuca y caña de azúcar), en cada uno de ellos se realizaron pruebas de infiltración in situ aplicando el método de infiltrómetros o anillos dobles, las cuales se llevaron a cabo hasta obtener un valor constante de infiltración por lo que el tiempo de cada una varió dependiendo del uso del suelo. Posteriormente aplicando la ecuación teórica propuesta por Kostiaikov (1932), se establecieron las curvas de infiltración y se calculó la infiltración básica.

#### a. Componente de Campo

La prueba de infiltración, se realizó aplicando el método de anillos infiltrómetros dobles, que son dos anillos concéntricos, uno interior de 20 a 25 cm de diámetro para determinar la velocidad de infiltración, mientras que el exterior de 35 a 40 cm se inunda a las mismas profundidades para disminuir los efectos de frontera del anillo anterior.

En cada cobertura de la zona de estudio, se realizaron tres (3) ensayos de infiltración, con el fin de obtener datos representativos de la misma; durante el procedimiento in situ se desarrolló el siguiente protocolo (Zuleta, 2011):

- Ubicación dentro de la cobertura de tres (3) sitios planos, retirados de caminos y carreteras.
- Ubicación de la fuente de agua y medios de conducción (mangueras) para el llenado de los tanques de agua y posterior suministro durante la jornada.
- Toma de muestras de suelo a una distancia aproximada de 1m del sitio de ensayo con profundidades de 0-5 cm, 10-15 cm y 15-30 cm, y peso del mismo en campo para determinar el contenido de humedad, por medio de una balanza electrónica.

## b. Componente Teórico

Se estimó el contenido de humedad gravimétrico y volumétrico por medio de una balanza electrónica. Se llevó a cabo, colocando las muestras tomadas en campo, en un horno secador por 24 horas a 110°C de temperatura.

**Ecuación 8.** Forma gravimétrica

$$w (\%) = \left( \frac{Msh+Mss}{Mss} \right) * 100$$

Donde,

$w$ : Contenido de humedad en el suelo (%).

$Msh$ : Masa de suelo húmedo (g), obtenido en campo a través del peso de la muestra de una balanza electrónica.

$Mss$ : Masa de suelo seco (g), obtenido en laboratorio a través del peso de la muestra en una balanza electrónica después de 24 horas en horno secador a una temperatura  $T=110^{\circ}\text{C}$ .

Como se utilizaron tres (3) anillos se obtuvieron (3) muestras de suelo, para ello se realizó un promedio aritmético para determinar la humedad promedio  $\bar{w}$  aplicando la Ecuación 9

**Ecuación 9.** Promedio aritmético

$$\bar{w} = \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^3 H_1 + H_2 + H_3$$

Luego se expresó el contenido de humedad de forma volumétrica para estimar la relación del volumen de agua presente en un determinado volumen de suelo, aplicando la Ecuación 10.

**Ecuación 10.** Relación de volumen de agua

$$\theta = \frac{Vw}{Vt} = \frac{Vw}{Vw+Vs}$$

$Vw$ : Volumen de agua presente en el suelo ( $\text{cm}^3$ )

$Vs$ : Volumen de suelo o sólido ( $\text{cm}^3$ )

$Vt$ : Volumen total de la muestra ( $\text{cm}^3$ )

Luego, se estableció la relación entre humedad volumétrica ( $\theta$ ) y humedad gravimétrica ( $w$ ) aplicando la Ecuación 11.

**Ecuación 11.** Relación humedad volumétrica y humedad gravimétrica

$$\theta = Db * w * prof = \left( \frac{Msh-Mss}{\rho_w * Vt} \right) * prof$$

Donde,

- $\theta$  : Contenido de humedad de suelo volumétrica  
 $D_b$  : Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)  
 $w$  : Contenido de humedad de suelo gravimétrica  
 $v_t$  : Volumen total de la muestra tomada en campo (cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_w$  : Densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

Con la diferencia de la capacidad de campo volumétrica y la humedad volumétrica se obtuvo el volumen de agua que faltaría para alcanzar la capacidad de campo, con el fin de determinar el volumen de agua máximo a almacenar en el jardín de lluvia (Ecuación 12).

**Ecuación 12.** Lámina de agua a almacenar

$$CC_{\theta} - \bar{\theta} = \text{Lámina}$$

Donde,

- $CC_{\theta}$  : Humedad volumétrica  
 $\theta$  : Humedad de la muestra volumétrica

Finalmente, la velocidad o tasa de infiltración se obtuvo realizando una modelación de tipo matemático aplicando el método de Kostiaikov (Ecuación 13), el cual asume una tasa de lámina infiltrada a través del tiempo.

**Ecuación 13.** Método costiacov

$$VI = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt} ct^m$$

$$VI = mct^{m-1}$$

$$VI = kt^{-n}$$

$$D = ct^m$$

Después de obtener la lámina, se estimó la lámina infiltrada en cada una de las profundidades tomando varios eventos de lluvia. Teniendo en cuenta también la evapotranspiración y la capacidad de campo volumétrica se tuvo la lámina infiltrada esperada en milímetros (Ecuación 14)

**Ecuación 14.** Lámina infiltrada

$$P - EVt + \theta cc = \text{lámina infiltrada}$$

Ya para conocer el tiempo en horas que tardará cada una de las láminas en infiltrarse, se emplearon dos maneras. La primera, consistió en tomar la lámina esperada para infiltración y se dividió con la infiltración básica  $lb$  (mm/h):

**Ecuación 15.** Tiempo de infiltración

$$T_{inf} = \frac{lám}{lb}$$

Con la segunda manera, se obtuvo el tiempo de infiltración despejando dicho parámetro a partir de la Ecuación 1.14, despejando se obtiene (Ecuación 16):

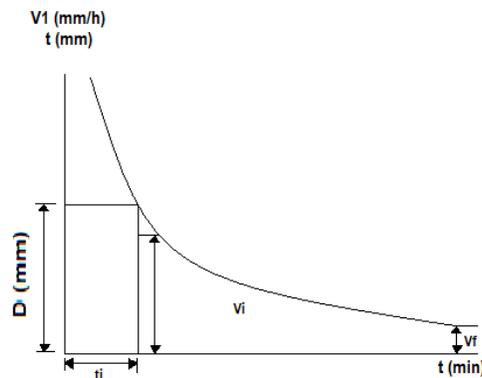
**Ecuación 16.** Tiempo de infiltración 2.

$$\left(\frac{D}{c}\right)^{\frac{1}{m}} = t$$

Donde,

$t$ : Tiempo de infiltración

A partir de los datos obtenidos en campo se elaboró una curva de infiltración de cada cobertura de suelo hasta llegar a un valor de lámina de infiltración, para diferentes profundidades de suelo.



$V_f$ : Infiltración básica. Infiltración constante a suelo saturado.

Considerando que el comportamiento de la infiltración y su análisis está condicionado por las características físicas del suelo (porosidad, humedad, textura, densidad aparente); en cada prueba se tomaron muestras de suelo y se pesaron in situ para conocer el peso húmedo, posteriormente estas muestras fueron llevadas a la estufa de secado durante veinticuatro (24) horas para determinar el peso seco y calcular el porcentaje de humedad, porcentaje de porosidad y densidad aparente.

- **Recarga**

Para estimar la recarga mensual se aplicó el enfoque metodológico propuesto por Schosinsky (2007), el cual ha sido aplicado por Schosinsky y Losilla (2000). Este modelo se basa en la

realización de un balance hídrico a escala mensual o diaria expresado en la Ecuación 2, contemplando la variación de la humedad del suelo, el cual está asociado con la textura del suelo, la infiltración y la retención por follaje o vegetación aplicando la Ecuación 17.

**Ecuación 17.** Cálculo de recarga para la zona de expansión occidental de Pereira.

$$R = P_i + H_{si} + H_{sf} - ETP$$

Donde,

R = Recarga (mm).

P<sub>i</sub> = Precipitación que se infiltra (mm).

H<sub>sf</sub> = Humedad volumétrica de suelo a final de mes (mm).

La cual se contempló a partir del comportamiento teórico de capacidad campo y punto de marchitez permanente para un suelo de tipo arcilloso, como se relaciona en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Humedad volumétrica de acuerdo a tipo de suelo

| Tipo de suelo       | CC (mm) | PMP (mm) |
|---------------------|---------|----------|
| Arcilloso           | 350     | 170      |
| Prof. Raíces máxima |         | 1        |
| H suelo prom. (%)   |         | 25       |
| H.suelo (mm)        |         | 250      |
| Densidad Aparente   |         | 0.57     |

Fuente: Tomado de Schosinsky (2007) y Gurovich (1985).

Para determinar la humedad de suelo a final de mes h<sub>Sf</sub> se consideraron los siguientes aspectos, con base en lo planteado por Schosinsky (2007) :

- Si, (h<sub>D</sub> + PM – ETR) es menor que la capacidad de campo entonces h<sub>Sf</sub> = h<sub>D</sub> + PM – ETR.
- Si, (h<sub>D</sub> + PM – ETR) es mayor o igual que la capacidad de campo entonces h<sub>Sf</sub> = CC.

H<sub>si</sub> = Humedad volumétrica de suelo a inicio de mes (mm).

Se asumió como la humedad inicial del suelo, la humedad final (h<sub>Sf</sub>) del mes anterior (Ver Tabla 7).

**Tabla 7.** Humedad del suelo inicial y Final mensual para la zona de expansión occidental de Pereira

| Humedad final(mm/mes) -Hf-           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ENE                                  | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
| 297.7                                | 311.4 | 296.3 | 311.9 | 314.1 | 321.2 | 305.7 | 299.7 | 304.6 | 313.2 | 321.9 | 312.0 |
| Humedad inicio del mes (mm/mes) -HD- |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| ENE                                  | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
| 312.0                                | 297.7 | 311.4 | 296.3 | 311.9 | 314.2 | 321.2 | 305.7 | 299.7 | 304.6 | 313.2 | 321.9 |

Fuente: Elaboración GIAS

La evapotranspiración potencial ETP con respecto al uso del suelo, se obtuvo a partir de la aplicación de la Ecuación 4.

### 5.2.2. Descripción implementación jardines de lluvia

La instalación de los jardines de lluvia, se realizó en el Vivero Pavas ubicado sobre la ZEOX, en las coordenadas 4°48'55.26" N y 75°48'18.22" O a 1217 msnm. Se eligió esta zona por la facilidad para la instalación de pluviómetros, el área, la existencia de pozos y aljibes, además de presentar todas las coberturas de suelo existentes en la zona de expansión.

Se realizó la instalación de cuatro (4) jardines de lluvia con áreas de 1m<sup>2</sup> ubicados en un costado de la casa de la zona de estudio, la cual presentaba un área de 100m<sup>2</sup>. Se decidió la implementación de cuatro (4) jardines con el fin de mejorar la distribución del agua y evitar obstrucciones del mismo (Virahsawmg et al., 2013) además que en cuestiones de implementación resulta más fácil y económico. También se variaron las profundidades y porcentajes de arena y grava en cada uno de los jardines con el fin de reconocer diferencias en cuanto al agua infiltrada, pues entre menos profundo sea el jardín pero con la misma infiltración, más eficiente es (ver Tabla 8 y Figuras de la 7 a la 10).

**Tabla 8.** Esquema de propuesta de experimento

|   |    |   |    |
|---|----|---|----|
| 1 | A  | 2 | A  |
|   | P1 |   | P2 |
|   | M1 |   | M2 |
| 3 | A  | 4 | A  |
|   | P1 |   | P2 |
|   | M2 |   | M1 |

A: Área del jardín de lluvia.

#### **P<sub>i</sub>: Profundidad del jardín de lluvia**

P1: Profundidad 1 (1 m)

P2: Profundidad 2 (0.6 m)

#### **M<sub>i</sub>: Combinación de material filtrante**

M1:40% Grava y 60% arena.

M2:60% Grava y 40% arena.

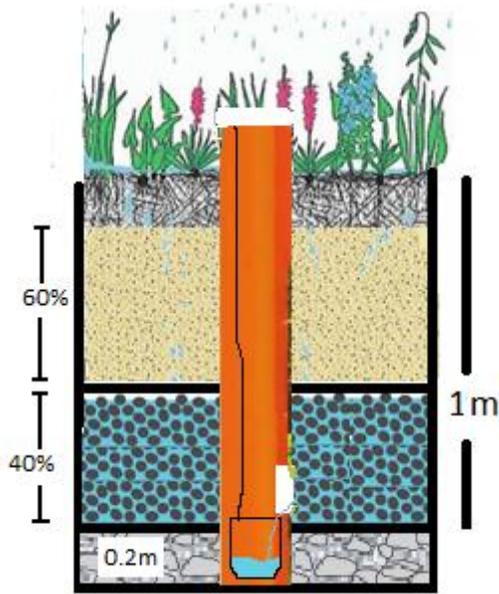


Figura 7. Configuración Jardín 1

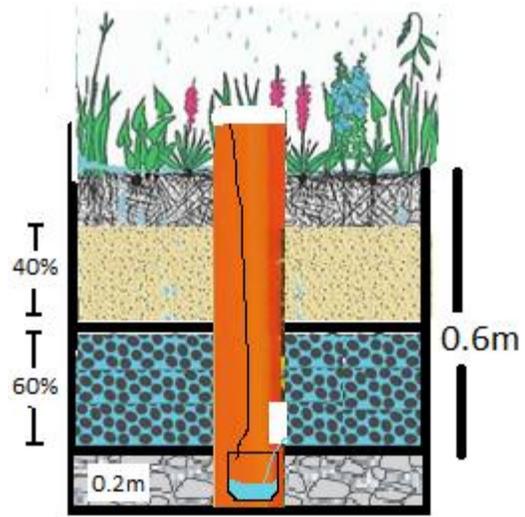


Figura 8. Configuración Jardín 2

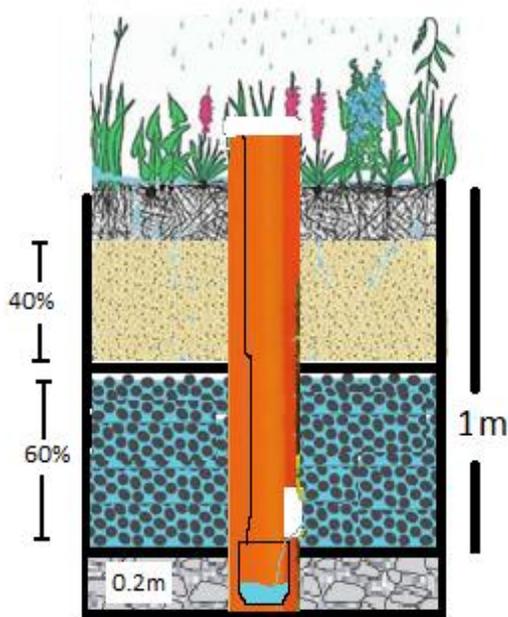


Figura 9. Configuración Jardín 3

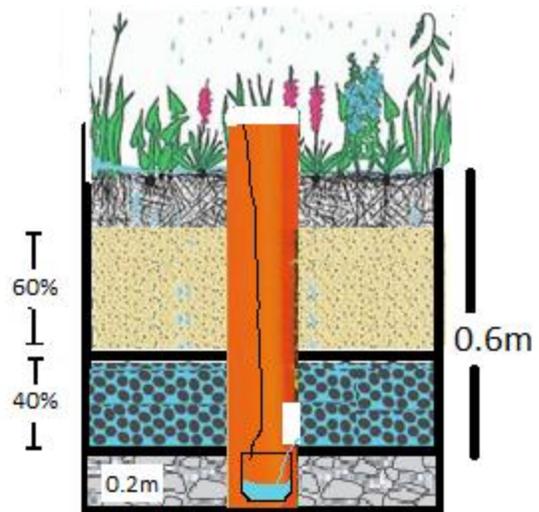


Figura 10. Configuración Jardín 4

Haciendo la relación de área cada jardín de lluvia infiltraría agua proveniente de 25 veces su tamaño. Esta relación se escogió basado en Tornes (2005) y teniendo en cuenta las características del suelo de la zona (suelo franco) con buena infiltración del agua.

El medio filtrante seleccionado, fue arena y grava pues el principal objetivo de la implementación de los mismos, es infiltrar importantes volúmenes de agua para la recarga del acuífero, más no la

remoción de nitrógeno. Por esto la arena cumple con dicho rendimiento hidráulico (Ouyang et al., 2011). Además del medio filtrante, se tiene una capa de tierra superficial para mejorar la retención de sólidos, reducir la obstrucción del medio y minimizar la erosión en el jardín (Anderson, 2011) además para la siembra de las plantas.

En cada jardín se sembraron plantas con el fin de aportar a la belleza paisajística del lugar, además para la formación de macroporos alrededor de las mismas, favorecer la infiltración y evitar la obstrucción de los jardines (Hatt et al., 2008; Coustumer et al., 2012). La vegetación seleccionada para la siembra fueron especies de plantas nativas que soportaran humedad, así como épocas secas (Anderson, 2011). Se plantaron así *Begonia spp* las cuales no superan nunca el metro de altura y son aptas para jardines en zonas tropicales pues no resisten heladas (ASOCOA, 2012) (ver Figura 11).



Figura 11. Jardines de Lluvia

Al techo de la casa se le instalaron canales a lado y lado a favor de la pendiente para la recolección de las aguas (ver Figura 12). Después de la ubicación de canales recolectores, se derivó la tubería correspondiente para llevar el agua a los jardines de lluvia. De un lado del techo se llevaba el agua para dos (2) jardines.



Figura 12. Canal recolector de agua del techo

Cada jardín fue acondicionado para obtener la muestra de calidad, por medio de un tubo de 6 pulgadas que permitía el contacto entre la superficie y el fondo del jardín. Se asumió un área constante, con el fin de comparar diferentes materiales filtrantes y profundidades de los mismos (ver Figura 13).



Figura 13. Tubo para toma de muestra de calidad

Para establecer los criterios de diseño del jardín de lluvia, se realizaron las siguientes actividades:

- Verificación de la profundidad del nivel freático, ya que éste no debía estar a menos de 1.2 metros pues la profundidad del jardín sería esa. Para ello, se realizó una actividad de sondeo, donde, se determinó el nivel freático con una medición puntual empleando una sonda que detecta la presencia de agua y mide la profundidad y la altura de la lámina de agua respecto a la cota de perforación. Finalmente, se asumió el nivel freático encontrado en cada uno de éstos, como el promedio para la zona de estudio.
- Determinación del área de aferencia superficial que drena hacia el jardín, con el fin de obtener las áreas y los coeficientes de cobertura. A partir de cartografía, se ubicó la zona

acorde para la construcción del jardín de lluvia, asumiendo la zona de cotas más bajas como el mejor punto para su ubicación.

- Y finalmente, obras de rebose, para evacuar hacia el sistema de drenaje superficial, o hacia los colectores, los excesos de lluvias mayores a la capacidad de infiltración del jardín de lluvia (Anderson, 2011). Para ello se instaló un tubo de PVC a la salida del jardín y debajo del tubo un recipiente marcado en litros con el fin de conocer la cantidad de agua de salida y apoyar el balance hídrico.

Para determinar la cantidad de agua infiltradas se realizó el balance hídrico con el fin de determinar la tasa de recarga potencial diaria y horaria en los jardines de lluvia instalados en la zona de estudio. Para ello, se trabajó con la información arrojada por un pluviómetro instalado en ésta ver Figura 14, con la evapotranspiración hallada en el capítulo anterior. Para efectos de dicho trabajo, de acuerdo a la textura del suelo de la zona identificada, se trabajó con una tasa de infiltración básica teórica (20 mm/h).



Figura 14. Pluviómetro instalado zona de estudio

- **Evaluación del cumplimiento de requisitos de calidad del agua infiltrada**

Se determinó cuál es el jardín de lluvia operacionalmente mejor, teniendo en cuenta la cantidad de agua infiltrada, el área de construcción y el mantenimiento de una calidad que coincidiera con los parámetros básicos para infiltración de aguas.

Programa de monitoreo: El monitoreo de los jardines de lluvia se llevó a cabo durante seis (6) meses, evaluando, el agua infiltrada mediante un balance hídrico, precipitación (datos de las estaciones pluviométricas) y el agua de rebose y por otro lado, se tomaron muestras en la entrada y salida del sistema después de una lluvia para determinar la calidad del agua infiltrada (Ver Tabla 9). Las muestras de agua colectada fueron analizadas en el laboratorio de procesos biológicos de la

facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica, siguiendo los procedimientos del Standard Methods (APHA, 2000).

**Tabla 9.** Parámetros a evaluar y métodos de medición

| PARÁMETRO                            | MÉTODO DE MEDICIÓN                  |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Caudal afluente y efluente           | Volumétrico                         |
| Sólidos suspendidos totales, SST     | Gravimétrico                        |
| Nitrógeno amoniacal, NH <sub>4</sub> | Titolométrico                       |
| Zinc                                 | Espectrometría de absorción atómico |
| DQO                                  | Dicromato                           |
| Fósforo                              | Digestión colorimétrico             |
| Potasio                              | Espectrometría de absorción atómico |

La configuración de los jardines se resume de la siguiente manera:

**Tabla 10.** Factores, niveles y tratamientos del diseño experimental

| FACTOR                      | NIVELES               | No. NIVELES | No. TRATAMIENTOS |
|-----------------------------|-----------------------|-------------|------------------|
| Relación Área / Profundidad | Relación 1            | 2           | 2*2= 4           |
|                             | Relación 2            |             |                  |
| Material Filtrante          | 40% Arena - 60% Grava | 2           |                  |
|                             | 60% Arena - 40% Grava |             |                  |

Los tratamientos serían los siguientes:

**Tabla 11.** Descripción de los tratamientos

| No. | DESCRIPCIÓN                                  |
|-----|--|
| 1   | Jardín 1: Relación 1 - 40% Arena - 60% Grava |
| 2   | Jardín 2: Relación 1 - 60% Arena - 40% Grava |
| 3   | Jardín 3: Relación 2 - 40% Arena - 60% Grava |
| 4   | Jardín 4: Relación 2 - 60% Arena - 40% Grava |

Las variables evaluadas en el análisis estadístico son:

**Tabla 12.** Variables del diseño experimental

| Variables no controladas | Variables Control   | Principales variables de respuesta  |
|--------------------------|---|---|
| Condiciones ambientales  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Profundidad</li> <li>Material filtrante</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cantidad de agua infiltrada</li> <li>% de reducción de N, P, K, SST</li> </ul> |

### 5.2.3. Hipótesis

**Tabla 13.** Hipótesis

| Factor             | Ho   | Ha   |
|--------------------|--|--|
| PROFUNDIDAD        | No existe diferencia en la infiltración del agua con la relación de área/profundidad 1 que con la 2.<br>Ho: Rap1 = Rap 2 | Existe diferencia en la infiltración del agua con la relación de área/profundidad 1 que con la 2.<br>Ha: Rapi ≠ Rapj ∃ i ≠ j |
| MATERIAL FILTRANTE | No existe diferencia en la calidad del agua con los diferentes porcentajes de arena y grava.<br>Ho: AG = GA              | Existe diferencia en la calidad del agua con los diferentes porcentajes de arena y grava.<br>Ha: AGi ≠ GAj ∃ i ≠ j           |
| Ho: Rap1 = Rap2    | Vs. Ha: Rapi ≠ Rapj  | E i ≠ j  |

Ho:  $AG = GA$  Vs. Ha:  $AG_i \neq GA_j$   $E_i \neq j$   
Ho:  $(T\lambda)_{ij} = 0$  Vs. Ha:  $(T\lambda)_{ij} \neq 0$

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Objetivo 1. Caracterización ZEOX

#### 6.1.1. Generalidades

La Zona de Expansión a estudiar, se encuentra ubicada en el costado occidental del casco urbano del municipio de Pereira, con una extensión total de 928Ha (704,72 Ha sin contar el parque temático), con altitudes que varían entre los 1.085 msnm y los 1.230 msnm (ver figuras 15 y 16).

La climatología de la zona es de Tipo Bosque Húmedo Pre-montano, con una temperatura promedio anual de 22°C y una precipitación bimodal con dos estaciones húmedas (marzo - junio; septiembre - noviembre) y dos estaciones secas (diciembre - febrero; julio - agosto) y una media anual de 2300 mm/año.

Geomorfológicamente se diferencian tres unidades asociadas a la litología y a las formaciones superficiales. Unidad A: caracterizada por un relieve ondulado en forma de abanico aluvial de cimas amplias redondeadas y laderas cortas de pendiente más fuerte; Unidad B: está localizada en la parte oeste del área, presenta una geomorfología relativamente suave con colinas pequeñas un poco afiladas, y la Unidad C representa las zonas más bajas del área conformadas por aluviones heterométricos de los ríos Cauca y Otún. Al norte de la zona, hay dos relieves aproximadamente de 2000 msnm.

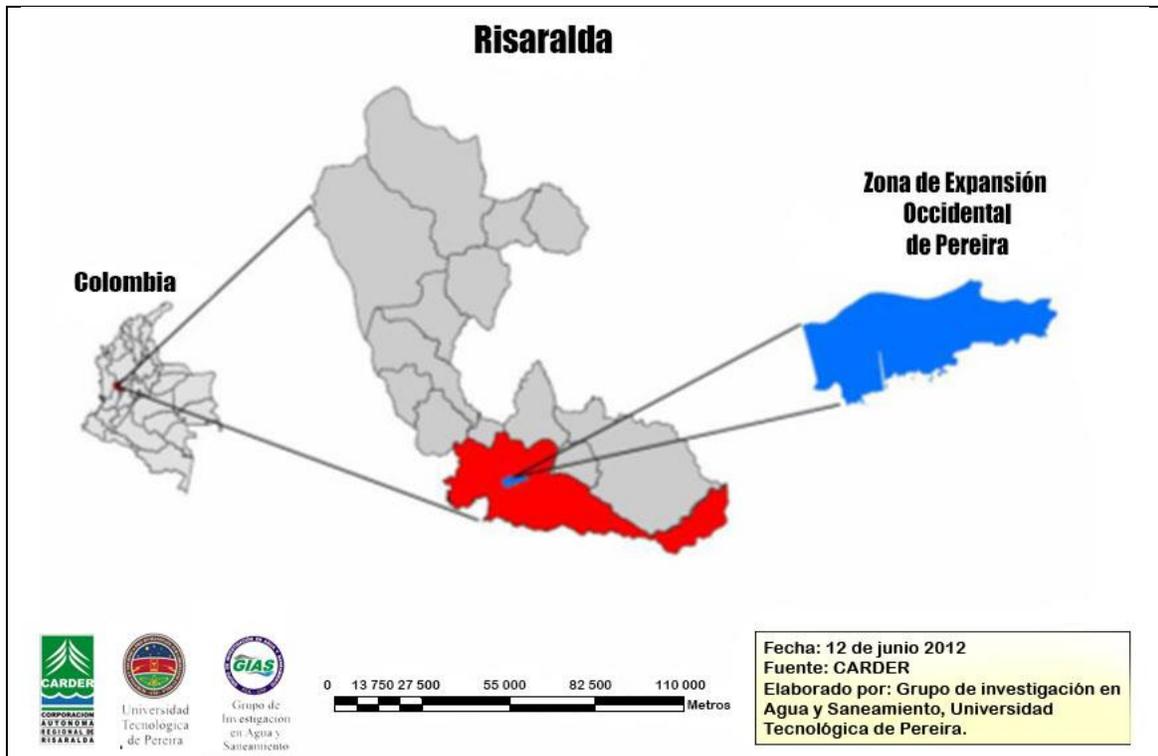


Figura 15. Mapa de ubicación ZEOX  
Fuente: Elaboración propia

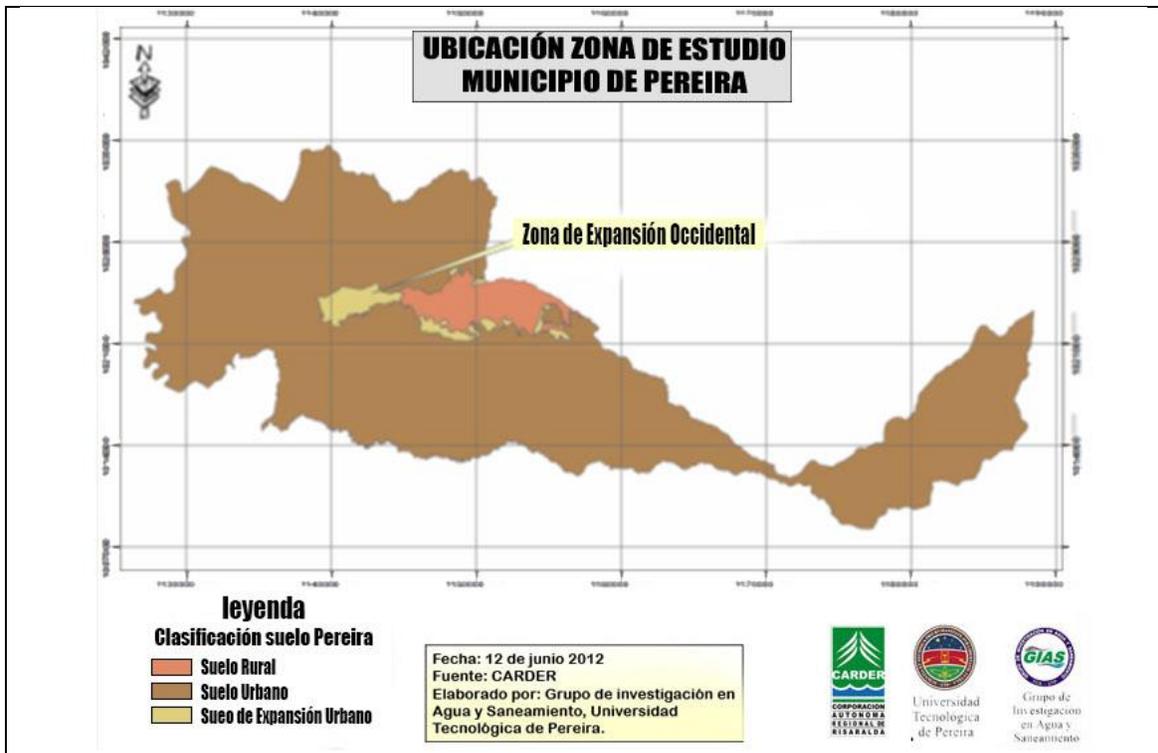


Figura 16. Mapa de ubicación de la ZEOX en Pereira  
Fuente: Elaboración propia

Entre los accidentes orográficos que limitan el área se destacan los nevados del Quindío y Santa Isabel, situados en los límites con los departamentos de Quindío y Tolima respectivamente. El sistema hidrográfico lo comprenden los ríos Cauca, Barbas, La Vieja, Otún y Consota y las Quebradas Cestillal y el Piñal.

La población actual de la zona metropolitana (Pereira, Dosquebradas, La Virginia), de la cual hace parte la zona de estudio, es de aproximadamente 520.000 habitantes. En la ciudad de Pereira, capital del Departamento, la industria manufacturera concentra más del 60% de la producción. El cultivo de café ha sido tradicional en el sector gracias a la vocación de los suelos, siendo Pereira el primer municipio productor de Colombia, además, de ser el mayor productor de caña de azúcar industrial panelera de Risaralda, seguido del plátano, yuca, piña y cacao.

Las variadas condiciones geográficas del área, la proyectan como un polo de atracción turística, por su ubicación estratégica en el denominado "Triángulo de Oro" entre las ciudades de Medellín, Bogotá y Cali, por su riqueza hídrica, su agradable clima, acceso al Parque Nacional Natural de Los Nevados, por sus fuentes hidrotermales y abundantes senderos ecológicos, entre otros (CARDER, 2007).

#### 6.1.2. Formaciones geológicas superficiales

- **Depósitos de flujos de escombros (TQfe):** Estos depósitos de alta energía están compuestos por clastos y bloques subredondeados a angulares de andesitas, diabasas y basaltos, con una matriz areno arcillosa. Presenta espesores entre 10 y 20 m y se localizan principalmente en laderas y márgenes del Río Otún y en cercanías de la antigua banca del ferrocarril, donde existen afloramientos.
- **Depósitos de caída piroclástica – Cenizas volcánicas (Qc1):** Estos depósitos de caída piroclástica cubren la mayor parte de la zona de estudio, donde han suavizado el paisaje. Se presentan en espesores variables de varios metros a decenas de metros, reduciendo su espesor hasta desaparecer en cercanías de los valles aluviales de los ríos Otún y Consota. Sus características se pueden observar en cortes de la antigua banca del ferrocarril, donde están expuestas.
- **Depósitos aluviales (QAlo):** Corresponden a los sedimentos depositados en épocas recientes por los ríos Otún y Consota, siendo los de este último más importante por formar un valle aluvial más extenso ( 2un poco más de 2 Km de longitud y anchos hasta de 200 m) Rellenos de pantano (Qhp): Corresponden a depósitos de sedimentos finos en el fondo de algunos drenajes, formados a partir de la remoción de material particulado, transportados por escorrentía y asociado con la agricultura intensiva (cultivos limpios).
- **Rellenos antrópicos:** Rellenos mecánicos formados en el proceso de adecuación de terrenos para infraestructura vial y para diversas construcciones.

### 6.1.2.1. Morfometría

Las pendientes son suaves en la mayor parte del territorio, especialmente en las colinas y en los valles aluviales. Se presentan de manera abrupta hacia la vertiente del río Otún (zona nororiental del proyecto) y en las laderas de las principales quebradas. Para el cálculo de los rangos se utilizaron los siguientes criterios:

- Estabilidad de los terrenos (según comportamiento del suelo para diferentes tipos de pendiente)
- Delimitación de suelos de protección (pendientes superiores al 60 %)
- Pendientes para llenos a media ladera (inferiores al 40 %)
- Áreas de cesión y equipamientos (según especificaciones establecidas en el POT28 para pendientes inferiores y superiores al 20 %)

#### Rangos:

- A: 0 – 10%
- B: 10 – 20%
- C: 20 – 40%
- D: 40 – 60%
- E: > 60%

### 6.1.2.2. Unidades geomorfológicas

Aunque en un origen, por pertenecer al macroabánico, toda el área de estudio corresponde con geoformas de origen deposicional, se han diferenciado unidades denudacionales, considerando que actualmente actúan sobre ellas procesos de erosión o procesos denudativos.

#### **a. Geoformas de origen denudacional:**

- Lomos o cimas de colinas: Son las geoformas más ampliamente distribuidas en la zona de estudio y corresponden a las partes altas o superiores de las colinas, con pendientes muy bajas. Por sus características, ofrecen las mejores posibilidades para urbanizar.
- Colinas bajas y terrazas erosivas del río Consota: Geoformas de baja pendiente y baja altura cercanas al valle aluvial del río Consota.
- Laderas de quebradas: Corresponden a las vertientes de los drenajes, donde las pendientes son más elevadas.
- Laderas del Consota: Son las zonas de la vertiente Consota que presentan las mayores pendientes, especialmente en el sector más oriental de la zona de estudio.

- Laderas del Otún: Son las zonas de mayor pendiente y mayor susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.
- Hondonada incipiente: Es una geoforma muy particular, debido a la presencia de un drenaje de poca incisión, con márgenes de baja pendiente y un alto nivel de intervención.
- Terraza aluvial, llanura aluvial o planicie de inundación: Corresponden a los depósitos aluviales de los ríos Otún y Consota, donde se forman planicies de baja pendiente.
- Morfología transformada por procesos antrópicos (cortes y llenos): Área de una amplia intervención antrópica en los procesos de transformación y adecuación de terrenos con fines constructivos.

### **6.1.3. Componente hídrico**

#### **6.1.3.1. Sistema hidrológico**

De acuerdo a lo establecido en la sectorización hidrográfica realizada para el departamento de Risaralda, la zona ZEOX pertenece al sistema hidrológico conformado por las cuencas de los ríos Cauca, Otún, la Vieja, Consota y Quebrada Grande.

Hacia el sector nororiental el drenaje vierte directamente al río Otún; es corto y de muy alto gradiente. El sector centro – norte drena a la cuenca pequeña, alongada en sentido sur norte, perteneciente a la quebrada Chile, la cual desemboca en el río Otún. El drenaje es corto, de bajo a mediano gradiente y de tipo subdendrítico. El sector noroccidental, corresponde a las cabeceras de la quebrada Grande, la cual es fuente de abastecimiento del acueducto de Caimalito, corregimiento del municipio de Pereira, localizado sobre la margen derecha del Río Cauca.

La Franja Hidrológica Río Consota, es la de mayor influencia y cobertura en la zona de estudio. El drenaje en su mayoría es de primer orden; es subdendrítico, con una relativamente alta densidad; es corto, de bajo a medio gradiente, no muy profundo y conforma pequeñas quebradas que vierten sus aguas al río Consota.

Los caudales son muy bajitos, excepto para los ríos Otún y Consota que presentan caudales importantes. Parte de los drenajes menores de la zona de estudio, tanto en la zona norte, como sur, han sido utilizados para alimentar pequeños lagos artificiales dedicados al cultivo de peces, para la práctica de pesca deportiva y artesanal. Los lagos más hacia el sur, cerca al río Consota en la actualidad no funcionan y han dejado depósitos de pantano debido a la sedimentación de finos. El río Consota forma justo en la zona de estudio un pequeño valle aluvial de cerca de dos (2) Km de largo y un ancho máximo que supera los doscientos (200) metros. El comportamiento de río en esta zona es meandriforme, dado su bajo gradiente, ocupando un pequeño canal de varios metros en épocas de estiaje y aún en épocas de caudales medios, pero ocupando su amplio valle, en épocas de invierno.

Este valle es un tanto anómalo si se tiene en cuenta que hacia aguas arriba el río viene un poco encañonado, formando un valle estrecho (justo hasta el cruce con la vía El Tigre) y hacia aguas

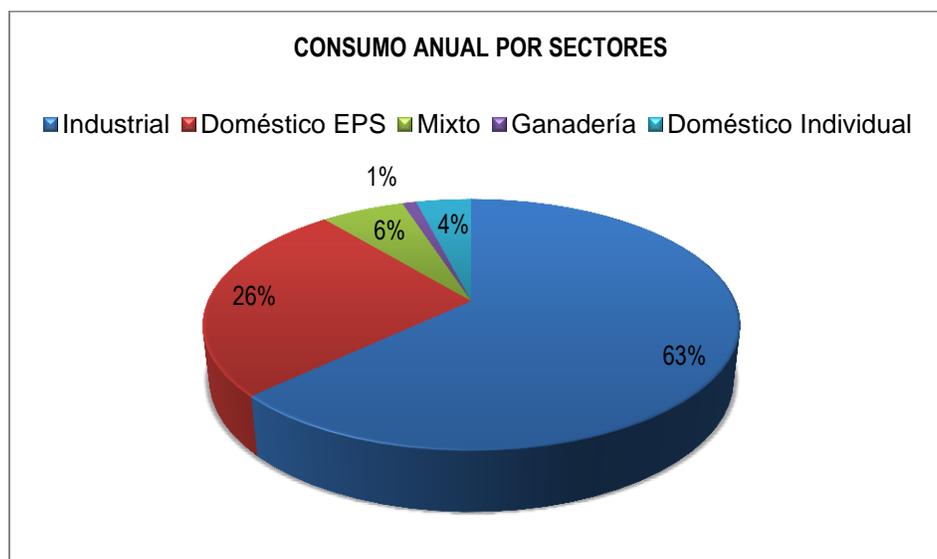
abajo, después del sector de Comfamiliar, el gradiente aumenta considerablemente de tal manera que el río forma un cañón estrecho y profundo (CARDER, 2007).

### 6.1.3.2. Calidad de aguas

En la zona de expansión, no se cuenta con informes muy consolidados relacionados con la calidad de aguas tanto subterráneas como superficiales. Sin embargo, se puede deducir que los pequeños drenajes existentes en la mayor parte de la zona de estudio presentan cierto nivel de contaminación debido a dos factores: por un lado los agroquímicos utilizados en estas amplias zonas de cultivos limpios, especialmente de piña, yuca y caña de azúcar; por otro lado los vertimientos de aguas servidas, procedentes de alcantarillados (CARDER, 2007). Por otro lado, se ha convertido en un factor preocupante el mal uso que se le ha dado a los aljibes utilizados para la extracción del agua subterránea, pues cuando cumplen su ciclo, no se clausuran de forma adecuada y se convierten en depósitos de residuos y desechos, lo que causa la contaminación de los acuíferos. En cuanto a los ríos Otún y Consota, justo en la zona de estudio comienza su recuperación ambiental, ya que vienen con niveles altos de contaminación, debido a que son receptores de la totalidad de alcantarillados de la zona urbana de Pereira (CARDER, 2007).

### 6.1.3.3. Aguas subterráneas

El agua subterránea es una fuente importante de abastecimiento de la zona. El caudal de agua extraído por pozos, según las primeras estimaciones, es del orden de 6.000.000 m<sup>3</sup>/año. El sector industrial es el gran demandante de aguas subterráneas con el 63% del volumen anual extraído, seguido por el abastecimiento doméstico considerado como EPS (Empresa Prestadora de Servicio), entre los que se encuentran acueductos comunitarios, urbanizaciones y condominios, con el 26%, y el uso doméstico individual representa el 4% del consumo total. A pesar de que la mayoría de los pozos tienen un uso mixto (doméstico y ganadería o irrigación) sólo consumen el 6% del total anual, la ganadería por su parte consume el 1%. (Ver Figura 17).



**Figura 17.** Estimación del consumo actual de pozos por sectores económicos  
Fuente: CARDER, 2007

Según un estudio realizado por la CARDER en el año 2007, en la formulación del Plan de Manejo Integrado de Aguas Subterráneas de Pereira y Dosquebradas, en la región existen varios acuíferos con algún potencial de explotación o aprovechamiento de agua subterránea, tales como el Abanico Pereira – Armenia (o Glacis del Quindío), las formaciones sedimentarias de Cartago y zarzal, los valles aluviales de los ríos Cauca y Risaralda y el valle de relleno de Dosquebradas; sin embargo, el principal, más promisorio y el que mayor aprovechamiento presenta es el acuífero de la Formación Pereira. Una zona importante de éste está localizada al occidente de la Ciudad de Pereira, en el sector de Cerritos. Según el modelo hidrogeológico, el acuífero de la Formación Pereira presenta dos niveles en contacto directo: Uno superior, captado en su mayoría por aljibes (600 aprox.), conformado en cenizas volcánicas, y un nivel inferior, captado por pozos profundos (entre 40 y 258 m), conformado principalmente por depósitos fluviovolcánicos.

La dirección regional del flujo es este – oeste, con bifurcación al NW y SW, coincidente con los drenajes superficiales, mostrando como zonas de descarga los ríos Cauca y Barbas.

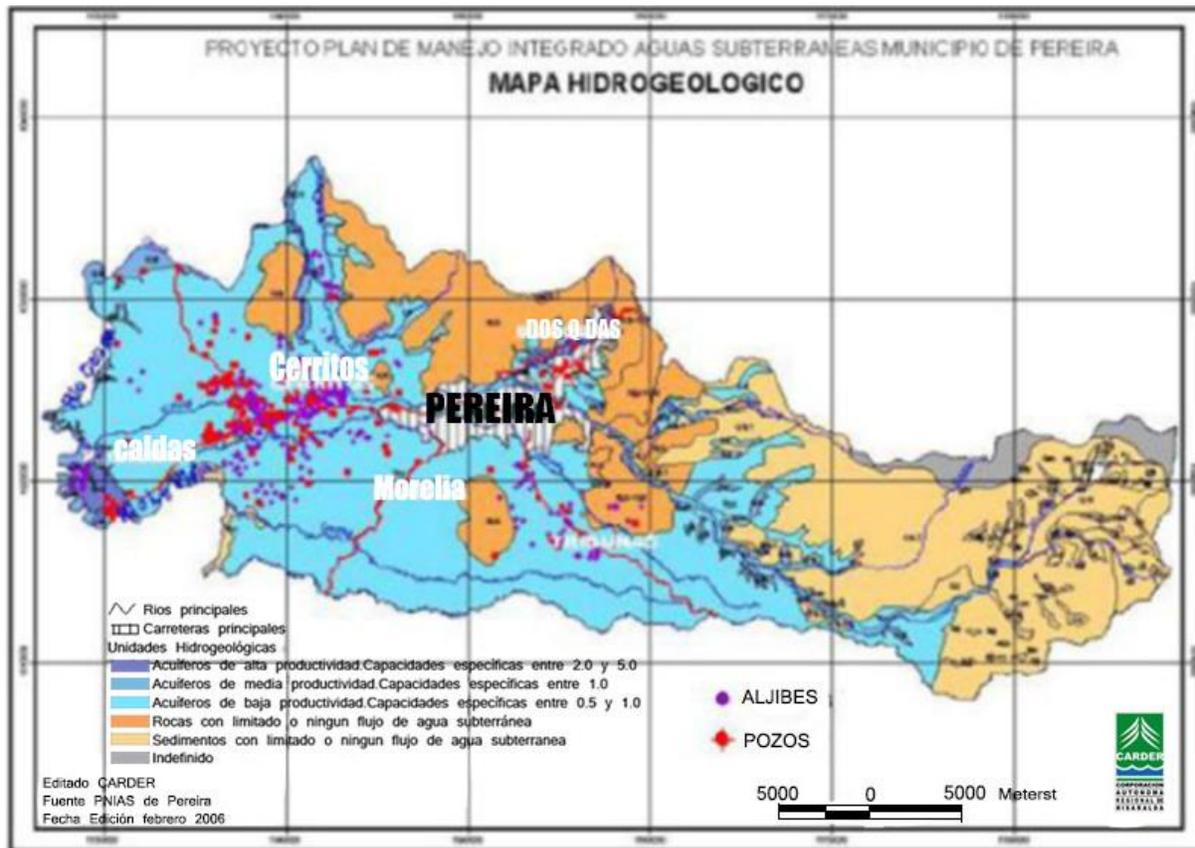


Figura 18. Mapa hidrogeológico sistema de acuíferos de Pereira y Dosquebradas  
 Fuente: CARDER, 2007

Con la aplicación de técnicas isotópicas, empleadas como parte de los estudios técnicos que la CARDER ha realizado en el marco del plan, se han determinado como zonas de recarga del acuífero las áreas de afloramiento hasta altitudes de 1500 m.s.n.m., teniendo además un componente de

recarga inferior a 50 años. Tanto por su alta dinámica, como por las características de recarga (precipitación e infiltración directa y fuentes superficiales cercanas), el acuífero presenta una alta vulnerabilidad a la contaminación. Las fuentes contaminantes son: Alcantarillados (domésticos e industriales), agroquímicos, potenciales derrames de petróleo y derivados, al igual que químicos, entre otros. Se debe destacar la necesidad de mejorar las coberturas vegetales, con el fin de regular la escorrentía, aumentar la retención de agua y posibilitar mayores cantidades de infiltración.

De los estudios que se tienen, se cuenta que en la zona se presenta un consumo de agua de aproximadamente 6 millones m<sup>3</sup>/año, dependiendo en gran medida, de las aguas subterráneas, por lo que se resalta la importancia no sólo ecológica de mantener el acuífero, sino también social.

#### 6.1.4. Componente biótico

##### 6.1.4.1. Usos del suelo y coberturas vegetales

De acuerdo a los usos del suelo del 2011, procesados a partir de la información cartográfica brindada por CARDER y establecida con la metodología Corine Land Cover, se determinaron los usos de la zona, donde predominan los cultivos generales con un 24% seguido de pastos y rastrojos con un 22%. (Ver Figura 19).

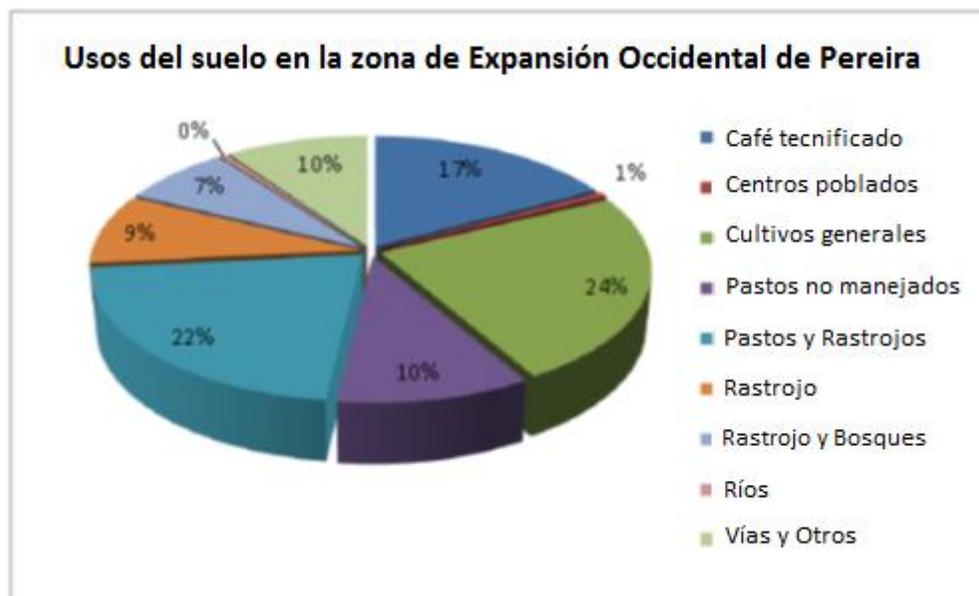


Figura 19. Usos del suelo 2011, ZEOX

En términos generales los usos del suelo de la zona se enmarcan en tres clases de usos y coberturas: los *cultivos limpios*, *rastrojos* y *potreros*, donde la mayor parte está dominada por pastos manejados cultivos limpios de piña, yuca y caña de azúcar; cítricos y plátano. Se localizan en la vertiente del Río Consota, en la zona central y occidental. Las zonas de rastrojo están concentradas en la vertiente Otún (zona noroccidental) y en la parte más oriental de la vertiente Consota. Las zonas de potreros (ganadería intensiva) se localizan en las colinas bajas y valle aluvial del río Consota (zona sur del proyecto).

El uso *misceláneo*, con los usos no discriminados y mezclados de cultivos, lagos, fincas de recreo y comercio. Se localiza en una franja paralela al norte de la doble calzada Pereira – Cartago.

Y la categoría de *bosques*, los cuales son escasos en la zona de expansión occidental. Sólo se presentan relictos de guadua de tres maneras, así:

- Franjas discontinuas de guadua a lo largo del cauce del río Consota.
- Bosque de galería en el drenaje principal de la Hacienda Galicia, el cual abastece los lagos de Comfamiliar.
- Pequeños guaduales de manera dispersa, ubicados principalmente en drenajes.

Debido a la vocación turística que se presenta en la gran parte de la zona de estudio, la cobertura de bosque es prácticamente nula, teniendo suelos desnudos expuestos a los procesos de erosión pluvial, fluvial y algunas veces eólica. De allí, que la biodiversidad también es baja, principalmente en fauna. Pese a que las coberturas boscosas son escasas, las pocas que existen e incluso las coberturas de uso agrícola, forman un suelo permeable que permite que las aguas pluviales se infiltren y se mantenga la continuidad de la recarga de los acuíferos (Ver Figura 20).

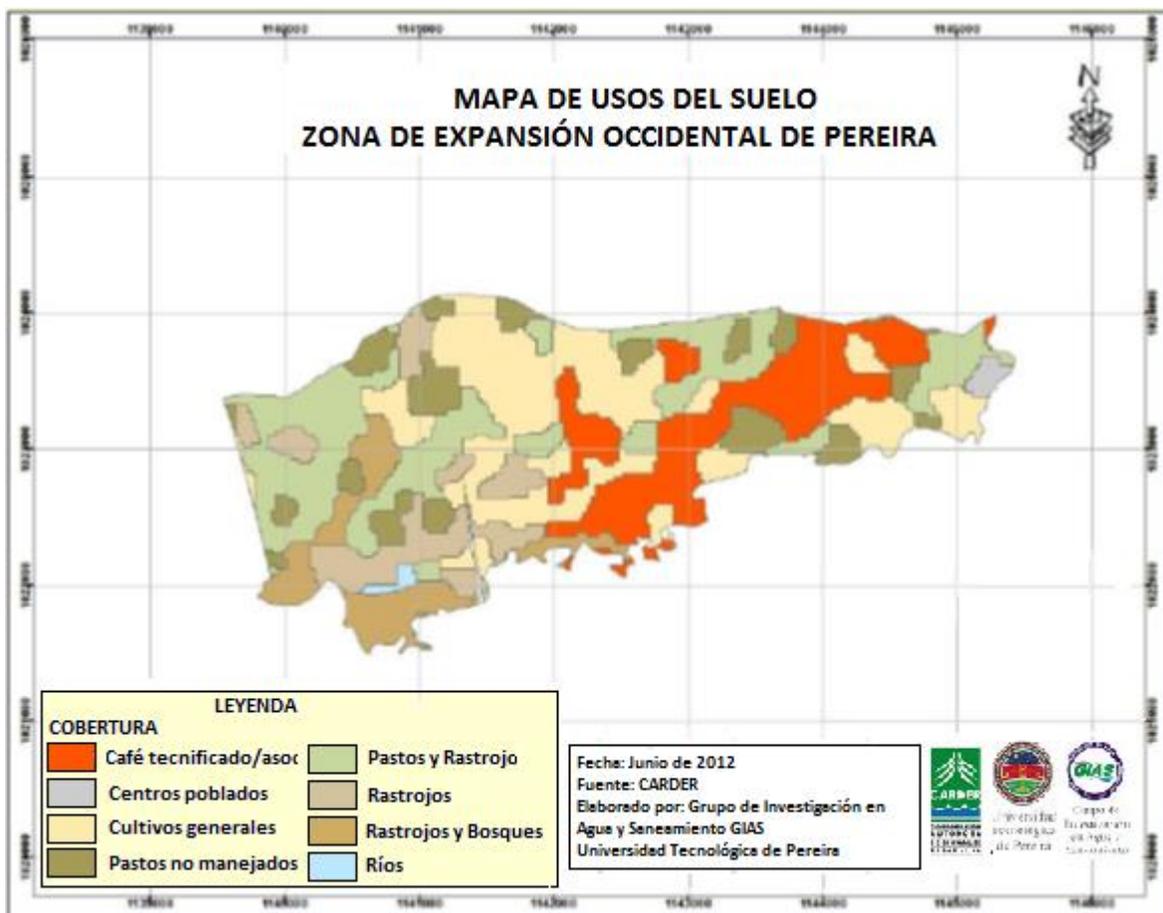
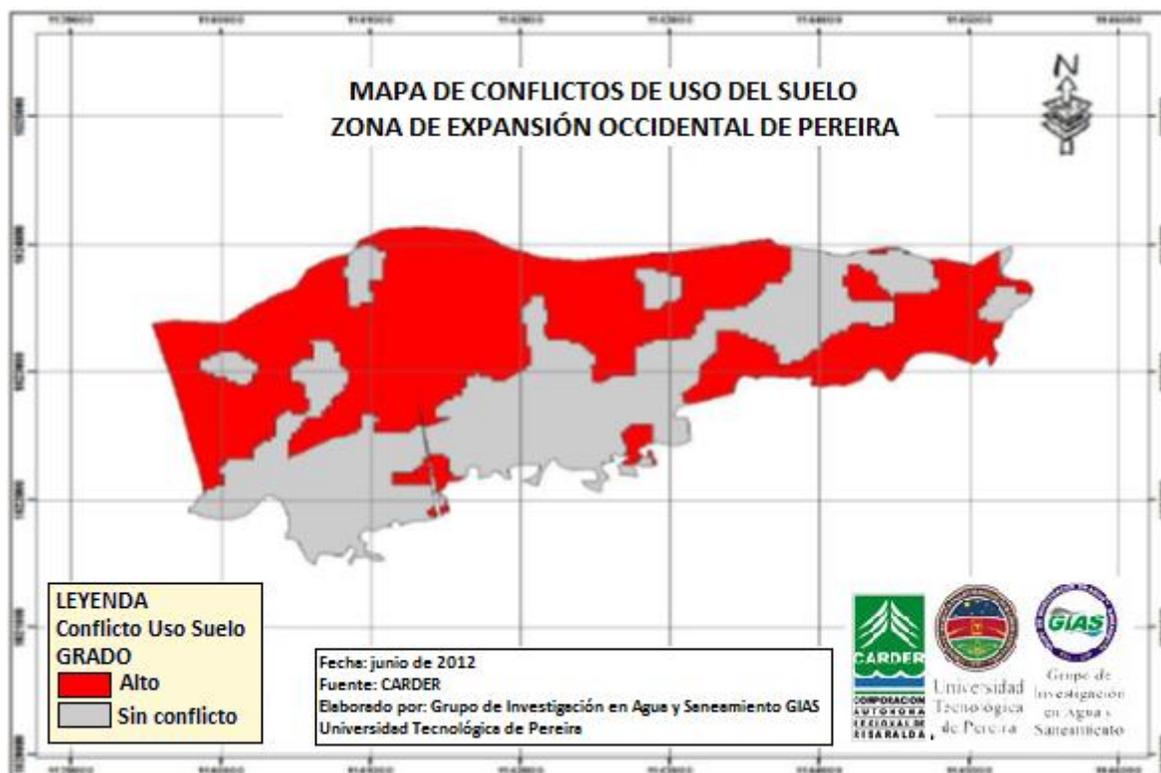


Figura 20. Mapa de usos del suelo de la ZOEX  
Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.4.2. Conflictos de uso del suelo

De las aproximadamente 928 Ha que tiene la zona, el 52% del territorio presente algún tipo de conflicto de uso. Actualmente el conflicto está representado principalmente por el establecimiento de cultivos limpios, pero con las proyecciones establecidas de urbanización de la zona en el Plan de Ordenamiento Territorial, el conflicto aumentará de manera significativa (Ver Figura 21).



**Figura 21.** Mapa de conflictos de uso del suelo ZEOX  
Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.4.3. Suelos de protección

Los suelos de protección de la zona, están referidos principalmente a áreas forestales protectoras de cauces superficiales y no existen aún definidas éstas para aguas subterráneas. Es así como para las llanuras aluviales de los ríos Otún (unas pequeñas áreas al nororiente de la zona de estudio) y Consota (un pequeño valle que marca el límite sur de la zona de expansión), la zona de retiro llega hasta la línea de niveles máximos de inundación, para períodos de retorno de 50 años. La zona de retiro comprende una faja de 30 metros, medidos a partir de la línea del cauce natural en proyección horizontal.

#### 6.1.5. Proyectos de urbanización en la ZEOX

El Acuerdo municipal N° 23 de julio 28 de 2006 en su artículo 25, establece las áreas de expansión para el municipio de Pereira, dentro de las cuales se encuentra la Zona de Expansión Tres o Zona de Expansión Occidental, objeto de este estudio.

La zona definida como de expansión, como se mencionó anteriormente, comprende un área total de 704,72 Ha (sin contar con el parque temático de Flora y Fauna), en las que se incluyen nueve (9) planes parciales formulados y los corredores ambientales de los ríos Consota y Otún. Asimismo se tienen algunas preexistencias como y el corredor de seguridad que define una línea de alta tensión en el nororiente, el sistema de espacio público propuesto y las vías nacionales y zonales que constituyen la malla vial primaria.

Es así como el 62,93% (443,47 Ha) es la que corresponde a los polígonos de planificación. De éstos hay que discriminar las áreas de espacio público que incluye áreas de cesión y equipamientos colectivos por lo que restándolas al área bruta urbanizable, se tiene un área de 302,68 Ha correspondientes al 42,95%.

Para la distribución de las densidades poblacionales que tendría la Zona de Expansión Occidental de Pereira, la Secretaría de Planeación, realizó mapas de aptitud de uso del suelo en 2006, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

| FACTOR                   | PARÁMETRO  |
|--------------------------|--|
| Topografía               | Distribución de pendientes                         |
| Geología y geomorfología | Formaciones superficiales                          |
|                          | Procesos erosivos                                  |
|                          | Unidades geomorfológicas                           |
| Amenazas                 | Zonas inundables                                   |
|                          | Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa    |
| Suelos de protección     | Zanjas o franjas de retiro de drenajes permanentes |

La clasificación obtenida, con las características por categoría, es la siguiente:

| UNIDAD | APTITUD     | DESCRIPCIÓN   |
|--------|-------------|---|
| A      | Alta        | Urbanizable sin restricciones   |
| M      | Moderada    | Urbanizable con restricciones, debido a potenciales problemas de estabilidad de terrenos contiguos. Se requieren estudios geotécnicos y análisis de estabilidad |
| B      | Baja        | No urbanizable, debido a pendientes fuertes y la ubicación de suelos de protección. Se requieren medidas de protección.   |
| S      | Sin Aptitud | No urbanizable, debido a la presencia de zonas inundables. Se requieren medidas de protección   |

Descripción:

**A:** Unidad geomorfológica de lomos de colina o cimas planas, con una morfometría de bajas pendientes (0 – 10%), en suelos derivados de cenizas volcánicas; no se registran procesos erosivos, ni fenómenos de remoción en masa.

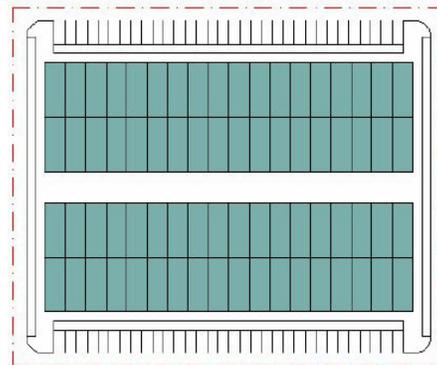
**M:** Unidad geomorfológica de terraza, con pendientes bajas (0 -10 %); no se evidencian problemas de estabilidad, pero la rodean terrenos con una relativamente alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

**B:** Laderas de alta pendiente (40 – 60%), en cenizas volcánicas y otros materiales transportados. No se presentan procesos activos.

**S:** Valles inundables de los ríos Otún y Consota y suelos de protección de corrientes hídricas permanentes.

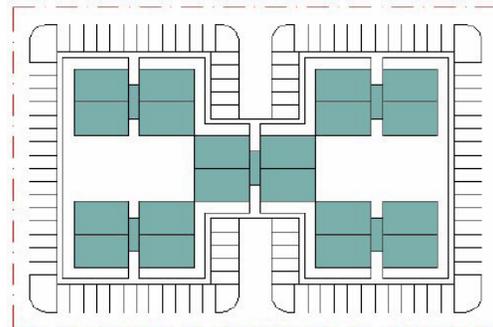
De acuerdo a lo obtenido de la superposición de los mapas con los criterios establecidos, la ZEOX fue delimitada en polígonos y a cada uno se le estableció la densidad poblacional que podía tener, según la aptitud obtenida (ver Figura 25. Mapa de densidades poblacionales ). Se establecieron igualmente tres (3) modelos de ocupación del territorio de la siguiente manera:

**DENSIDAD ALTA:** Denominado como *Vivienda Unifamiliar independiente de orden continuo*: Se modeló una manzana típica, de viviendas mínimas (54 m<sup>2</sup>) agrupadas en orden continuo en doble crujía con contacto vial en el perímetro y una vía peatonal en el centro. El área de la muestra fue de 7.505 m<sup>2</sup> definida por el eje de la vía secundaria perimetral. Se lograron ubicar 72 unidades de vivienda con sus respectivos parqueaderos superando el requerimiento de la norma mínima<sup>19</sup>. Se obtuvo una ocupación del 51,81% del área de la muestra, quedando el 48,19% restante para vías locales, andenes, parqueaderos y zonas verdes. La densidad neta resultante de este modelo es de 96 Viv/Ha.



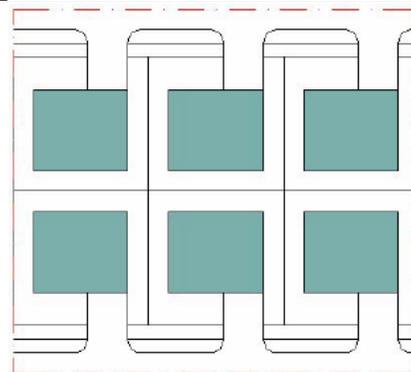
**Figura 22.** Modelo de densidad alta  
Fuente: Secretaría de Planeación Municipal, 2006

**DENSIDAD MEDIA:** *Vivienda Multifamiliar Independiente en Orden Discontinuo*: La tipología representa una ocupación de bloques de vivienda multifamiliar con aislamientos y una provisión de parqueaderos en el exterior de los edificios. La unidad de vivienda aplicada es de 60 m<sup>2</sup> en cinco pisos, lo que hace prever un sistema de mampostería estructural que impide los estacionamientos subterráneos. Se modelaron cinco bloques de cuatro apartamentos por piso para un total de 100 unidades de vivienda. El área de la muestra es de 5.104 m<sup>2</sup> a ejes viales, con un área ocupada en primer piso de 1.200 m<sup>2</sup>. El aprovechamiento es de 6.000 m<sup>2</sup> privados contra 3.904 m<sup>2</sup> de vías, andenes, zonas verdes y parqueaderos. La densidad resultante neta es de 196 Viv/Ha. Aplica la misma consideración anterior donde se enfatiza que es densidad neta.



**Figura 23.** Modelo de densidad media  
Fuente: Secretaría de Planeación Municipal, 2006

**DENSIDAD BAJA:** *Vivienda Unifamiliar Independiente en Orden Discontinuo* Este modelo se acerca más a la norma definida por el PORTE para suelo de expansión tipo 2, cercándose a la tipología suburbana. Se modelaron predios mínimos de 400 m<sup>2</sup>, con ocupaciones máximas del 40% que da viviendas de 160 m<sup>2</sup> por nivel. El área de la muestra es de 3.240 m<sup>2</sup>, donde se ubicaron seis parcelas con una vivienda cada una. El área que ocupan los predios corresponde a un 74,07% del área total, quedando un 25,93% para vías, andenes y zonas verdes. La densidad neta resultante de este modelo da 18,52 Viv/Ha.



**Figura 24.** Modelo de densidad baja  
Fuente: Secretaría de Planeación Municipal, 2006

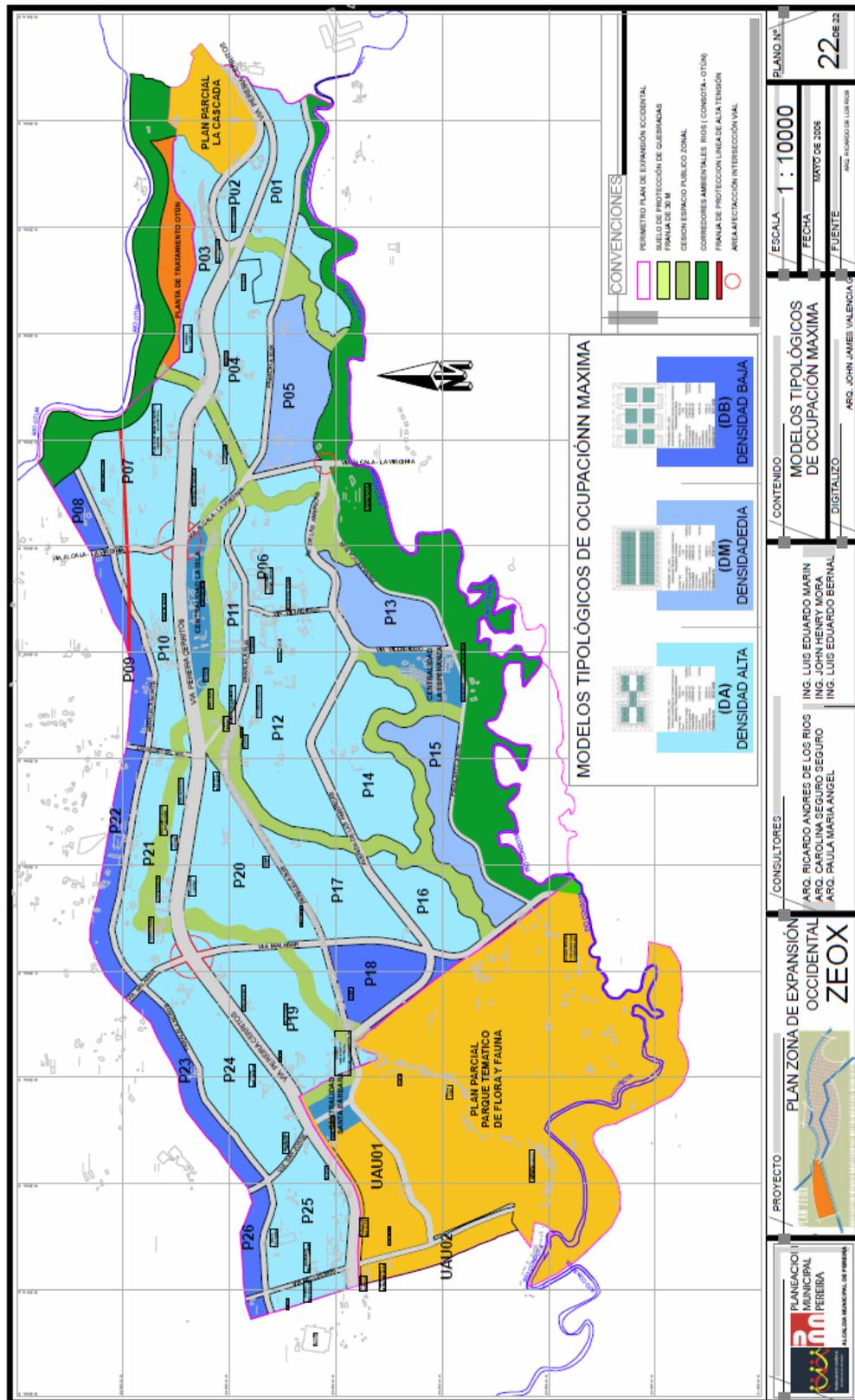


Figura 25. Mapa de densidades poblacionales ZEOX

### 6.1.6. Balance hídrico ZEOX

Después de conocer los usos del suelo, el tipo de suelo, el clima y el recurso hídrico de la zona, se realizó el balance hídrico para conocer la cantidad de agua disponible en épocas modales y no modales para infiltración y comparar con los usos de suelo existentes la infiltración actual y la futura con los planes de urbanización de la zona.

#### 6.1.6.1. Precipitación

Se estableció la variación promedio espacial y temporal de la precipitación, procesando la información pluviométrica media mensual multianual de las estaciones relacionadas en la Tabla 14, las cuales son operadas y administradas por el Centro De Investigaciones De Café -CENICAFÉ- (67% de las estaciones pertenecen a esta entidad) y el Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- (33% de las estaciones pertenecen a esta entidad). Los criterios de selección de las estaciones fueron:

- Cercanía a la zona de estudio.
- Antigüedad. Se tomaron estaciones con registros históricos iguales o mayores a diez (10) años, con el fin de obtener un comportamiento medio consolidado y por ende una estimación más real de la lámina de recarga.
- Consistencia. Se contemplaron registros históricos de estaciones cuyo número de registros estuvieran por encima del 80% del número total de registros mensuales. Para lograr una consistencia cerca o igual al 100%, el procedimiento previo realizado fue estimar datos faltantes utilizando herramientas de tipo estadístico sugeridos por la literatura.

**Tabla 14.** Estaciones meteorológicas consideradas para el cálculo de la precipitación media mensual.

| ESTACIÓN           | TIPO | X       | Y       | ENTIDAD  | PERÍODO   |
|--------------------|------|---------|---------|----------|-----------|
| COMBIA             | PM   | 1143950 | 1026067 | CENICAFÉ | 1981-1996 |
| EL CEDRAL          | CO   | 1171708 | 1020572 | CENICAFÉ | 1981-1996 |
| PLANTA TTO         | PM   | 1156907 | 1022384 | CANECAFÉ | 1967-1997 |
| LA CATALINA        | PM   | 1147671 | 1016835 | CENICAFÉ | 1987-1997 |
| AEPTO MATECAÑA     | SP   | 1149506 | 1024213 | IDEAM    | 1948-2011 |
| SAN ISIDRO         | PM   | 1135318 | 1022801 | IDEAM    | 1990-2011 |
| MARACAY            | PM   | 1152888 | 1024293 | IDEAM    | 1991-2011 |
| EL BOSQUE          | PM   | 1155050 | 1026067 | CENICAFÉ | 1978-1996 |
| HIROSHIMA-LA BAMBA | PM   | 1149160 | 1011620 | CENICAFÉ | 1948-2011 |

El comportamiento de la precipitación para cada una de las estaciones se relaciona en la información consolidada en la Figura 26 con el comportamiento medio mensual general y no modal y en el

Anexo 1 que reúne las tablas correspondientes.

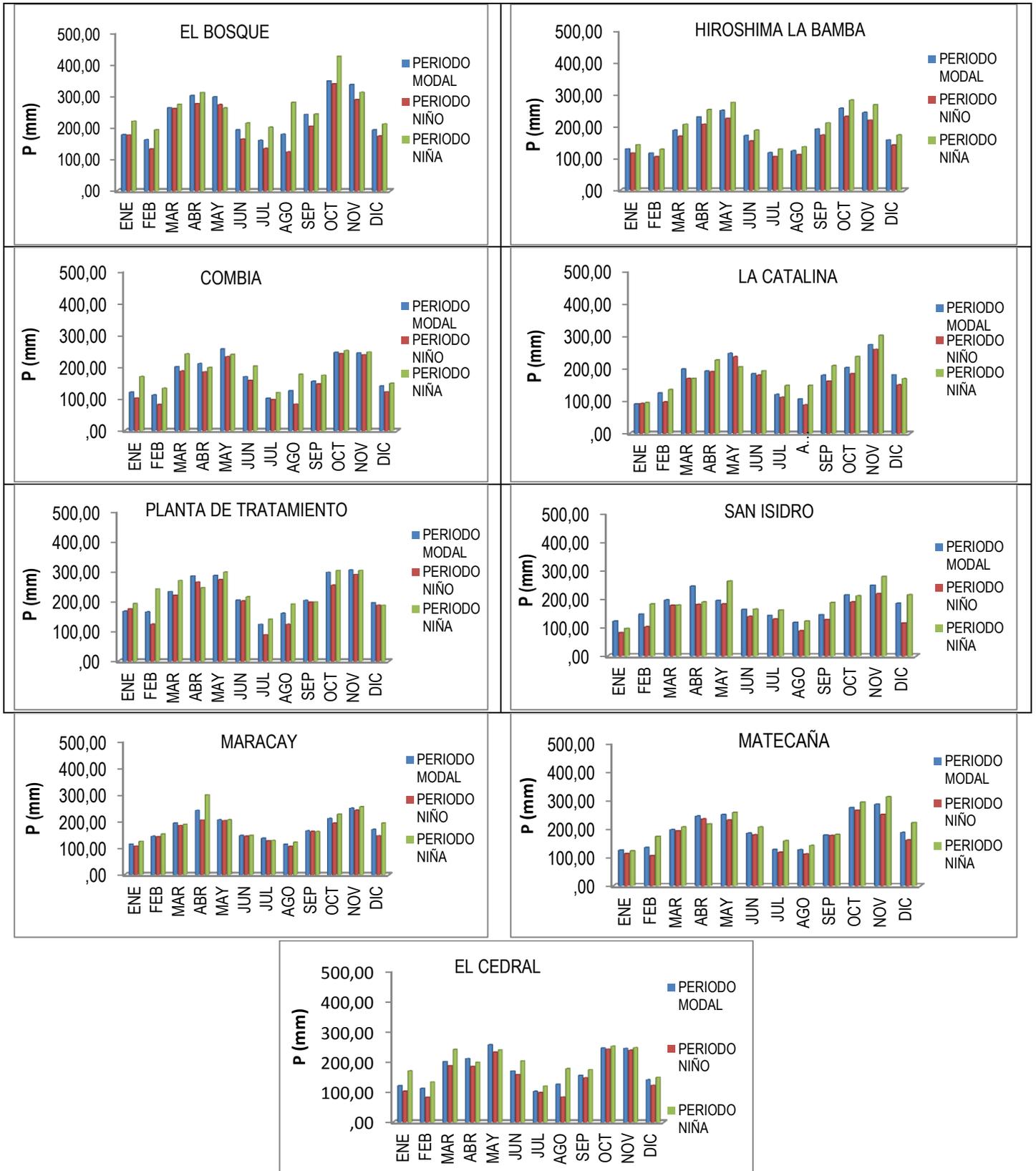


Figura 26. Comportamiento medio mensual general y no modal por estación

Como se observa en las gráficas anteriores, en las estaciones analizadas la mayoría de los meses presenta mayor precipitación en épocas donde se presentan períodos de La NIÑA, en algunos casos hasta en 60 mm más de lluvia que en el período modal, mientras que en los períodos NIÑO, la precipitación se encuentra por debajo del modal pero no se aleja tanto de este. De lo anterior, se espera que durante las épocas de NIÑA, la infiltración del agua lluvia se incremente en la proporción de la lluvia y por lo tanto la recarga sea mayor.

### a) Precipitación media multianual general

La distribución de la precipitación media multianual general corresponde a un comportamiento de tipo bimodal (ver Figura 27) con dos períodos secos (junio, julio, agosto y diciembre, enero y febrero) y dos períodos húmedos (marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre), típicos de la región andina colombiana. Relacionando el comportamiento de ésta con el comportamiento del balance hídrico, es lógico también, esperar que en períodos más secos, la recarga sea más baja, y en los períodos húmedos, ésta se incremente. Para la recarga, se puede analizar, que ésta será alta sólo durante una parte del período húmedo (hasta que el almacenamiento de agua en el suelo alcance un nivel de saturación (Jiménez, 1992)

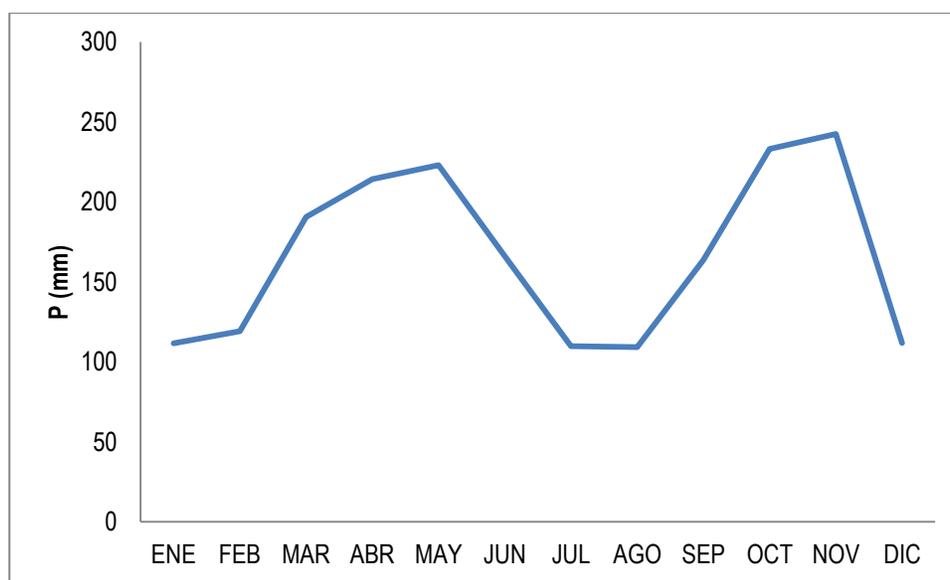


Figura 27. Comportamiento precipitación media mensual multianual general ZEOX.

Los meses de mayor pico en la precipitación corresponden a noviembre (242.5 mm) y octubre (233.1 mm), y los meses de menor precipitación corresponden a agosto (109.2 mm) y julio (109.8 mm) (ver Tabla 15).

Tabla 15. Precipitación media mensual multianual general para la zona de expansión occidental

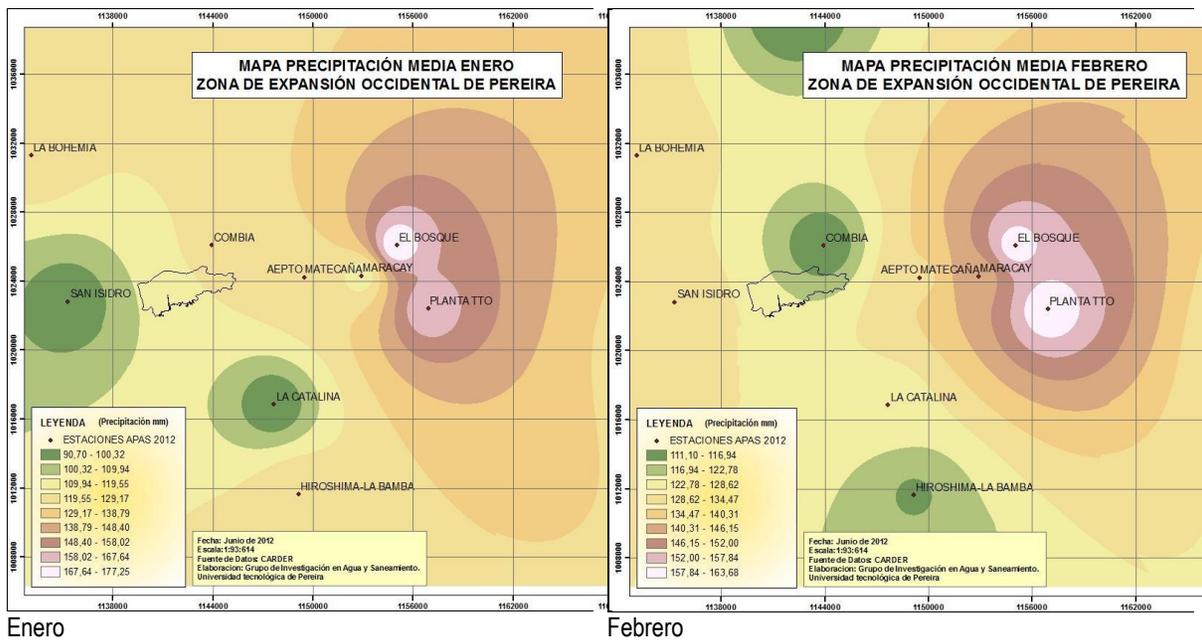
| ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   | VR ANUAL |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 111.7 | 119.1 | 190.6 | 214.3 | 223.0 | 166.1 | 109.8 | 109.2 | 163.8 | 233.1 | 242.5 | 111.8 | 1995.0   |

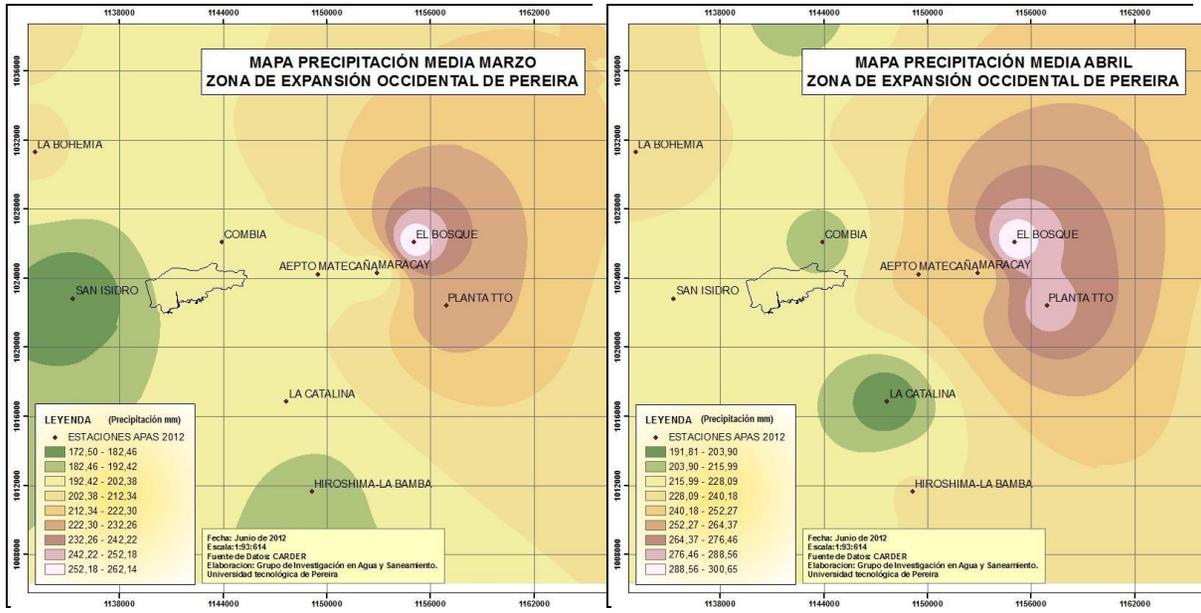
Por otro lado, como se observa en la Figura 28, el comportamiento de la precipitación media es mayor hacia el sector oriental de la zona de estudio donde se espera (sólo en términos de aporte de

precipitación), láminas de recarga mayores. En la Tabla 16 se relacionan las precipitaciones correspondientes a cada color en el mapa.

Tabla 16. Leyenda precipitación

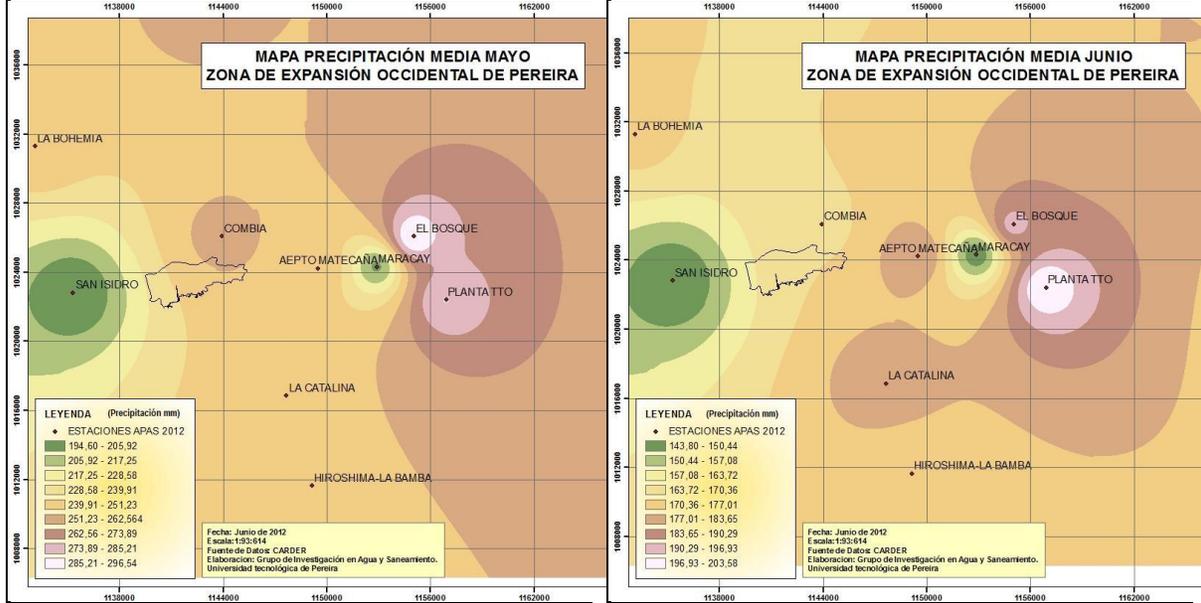
| LEYENDA   |                 |
|---|-----------------|
| Precipitación (mm)  |                 |
|  | Estaciones      |
|  | 90.7 – 100.32   |
|  | 100.33 – 109.94 |
|  | 109.95 – 119.55 |
|  | 119.56 – 129.17 |
|  | 129.18 – 138.79 |
|  | 138.80 – 148.40 |
|  | 148.41 – 158.02 |
|  | 158.03 – 167.64 |
|  | 167.65 – 177.25 |





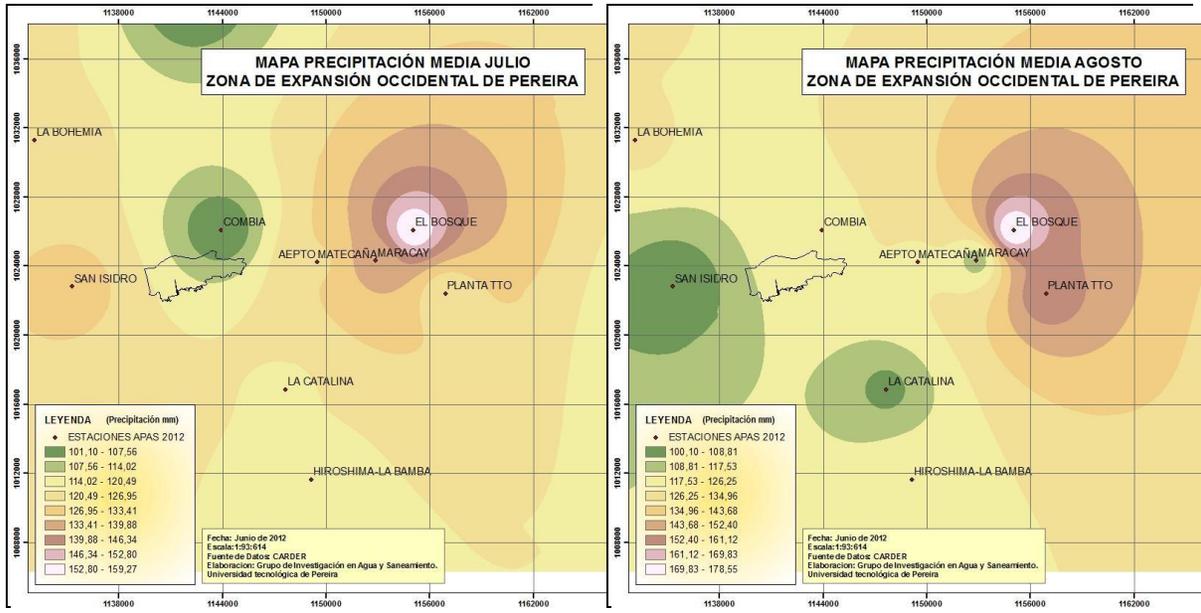
Marzo

Abril



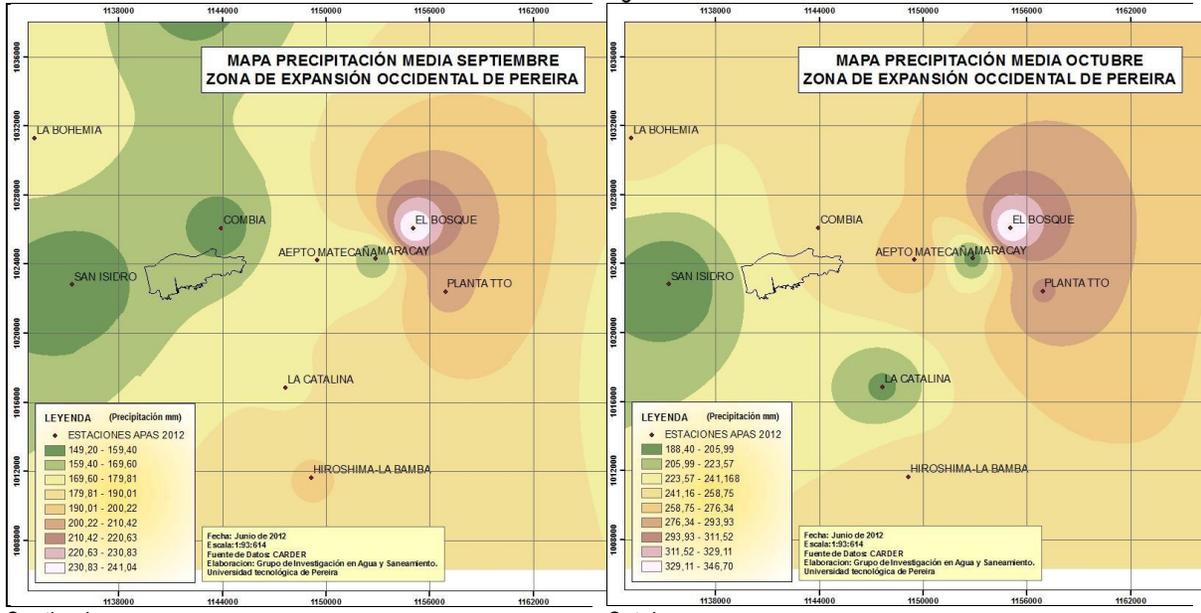
Mayo

Junio



Julio

Agosto



Septiembre

Octubre

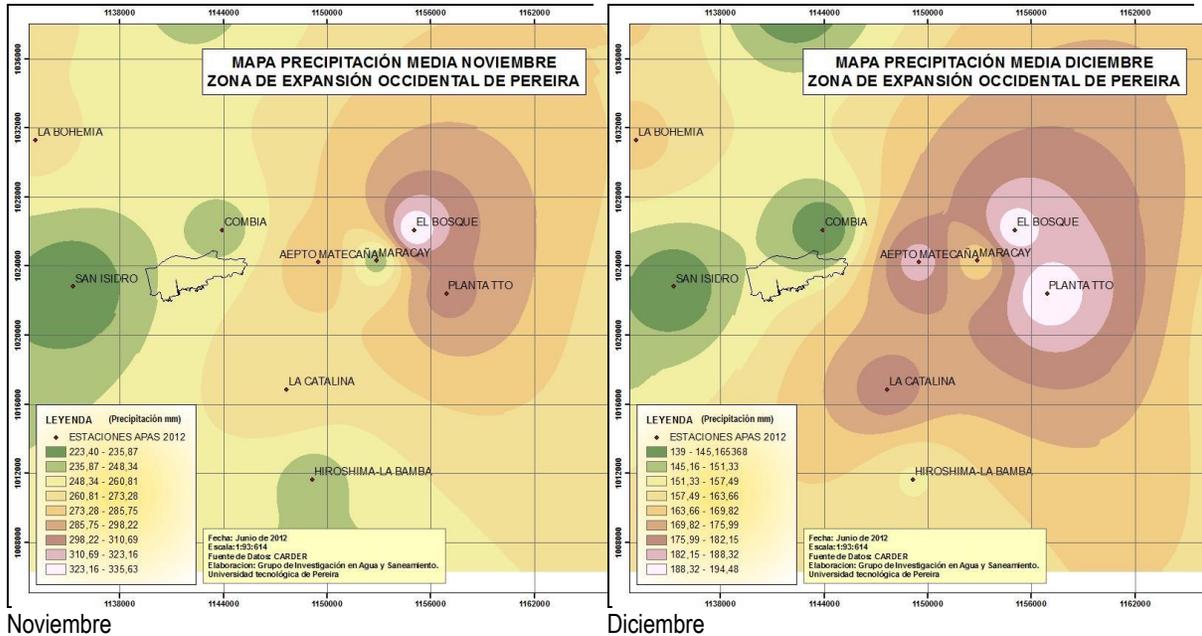


Figura 28. Precipitación media de la ZEOX por cada mes del año

### b) Precipitación media no modal

La precipitación media no modal de la ZEOX se determinó a través de la información pluviométrica media mensual multianual de las nueve (9) estaciones seleccionadas contemplando los periodos de presencia u ocurrencia tanto de fenómeno de EL NIÑO como el fenómeno de LA NIÑA de acuerdo con lo definido por NOAA (2012).

- **Análisis de resultados para periodos NIÑO**

En la Figura 29 se presenta la distribución media mensual multianual de la precipitación en periodos NIÑO comparado con la distribución media mensual multianual general. A partir de ésta, es posible analizar que el comportamiento de la precipitación media en periodos NIÑO en la zona de estudio sigue obedeciendo a un régimen de tipo bimodal durante el año, con una disminución en la precipitación en diez de los doce meses del año, a excepción de los meses de Julio y Diciembre, en los cuales se observa un comportamiento promedio de la precipitación, mayor que el comportamiento general. Lo anterior relacionado con las siguientes razones:

- En la zona de estudio no se obtiene en la mayoría de periodos NIÑO un comportamiento consolidado o acentuado de éste para los meses analizados.
- Los meses de febrero y agosto cuentan con comportamientos de precipitación atípicos o demasiado alejados del comportamiento promedio de la precipitación durante la ocurrencia de periodos de sequía prolongados.
- Los meses de julio y diciembre no son alterados en su mayoría por ocurrencia del fenómeno del NIÑO.

Finalmente, se deduce que para efectos de la estimación del balance hídrico y la recarga, es lógico esperar una disminución de ésta a futuro durante períodos de sequía prolongados progresivo al estado de maduración o consolidación del fenómeno del NIÑO.

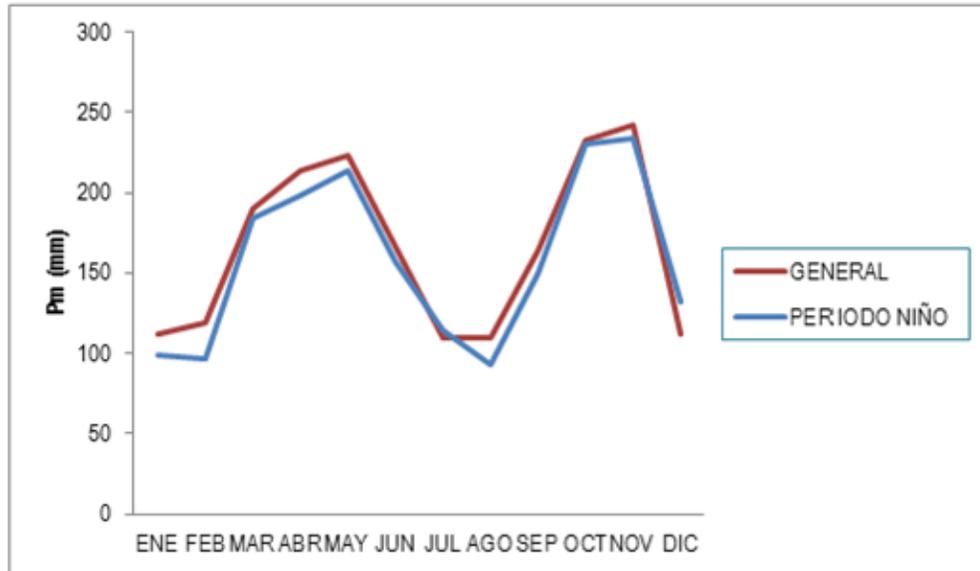


Figura 29. Precipitación media mensual Vs. Precipitación media mensual NIÑO.

A partir del análisis de la Figura 29, se determinó que para el cálculo del balance hídrico contemplando este escenario de sequía prolongado, puedan presentarse resultados negativos en algunos meses (déficit hídrico) o muy cercanos a la condición de equilibrio (que es un escenario de déficit de acuerdo a lo planteado por Chow, (1991), Guevara (1994), Jiménez (1992) y Lasso (2008)). De igual manera, se espera que la recarga al acuífero sea menor.

#### • Análisis de resultados para períodos NIÑA

En la Figura 30 se observa la distribución media mensual multianual de la precipitación en períodos NIÑA comparado con la distribución media mensual multianual general. Al igual que en período NIÑO durante este, también se sigue presentando un régimen de tipo bimodal durante el año, con un incremento respecto al comportamiento medio general, exceptuando el mes de Abril donde se observó un comportamiento de la precipitación media general, mayor que el comportamiento en períodos NIÑA, relacionando ésta con las siguientes razones:

- Dado que el mes de Abril es un período húmedo o de altas precipitaciones, no se genera una alteración en el comportamiento de éste bajo la influencia del fenómeno de La NIÑA, haciendo que los registros entre ambos sean similares.
- A partir de los registros históricos contemplados en este estudio, el mes de Abril no ha sido un mes donde se presente una etapa desarrollada del fenómeno de La NIÑA, siendo la precipitación menor que la precipitación general para este mes.
- Los períodos NIÑA obtenidos a partir de los registros de cada una de las estaciones contempladas en este estudio son insuficientes para obtener un comportamiento acentuado en el mes de Abril.

- Finalmente, se deduce que para efectos de la estimación del balance hídrico, este sea mayor (presentando exceso hídrico), mientras para el cálculo de la recarga, es lógico esperar un aumento de ésta a futuro durante períodos de lluvia prolongados hasta alcanzar niveles de saturación en el suelo, haciendo que este comportamiento de aumento en la recarga no se presente de manera constante (ver figura 30) (Vélez y Vélez, 2002).

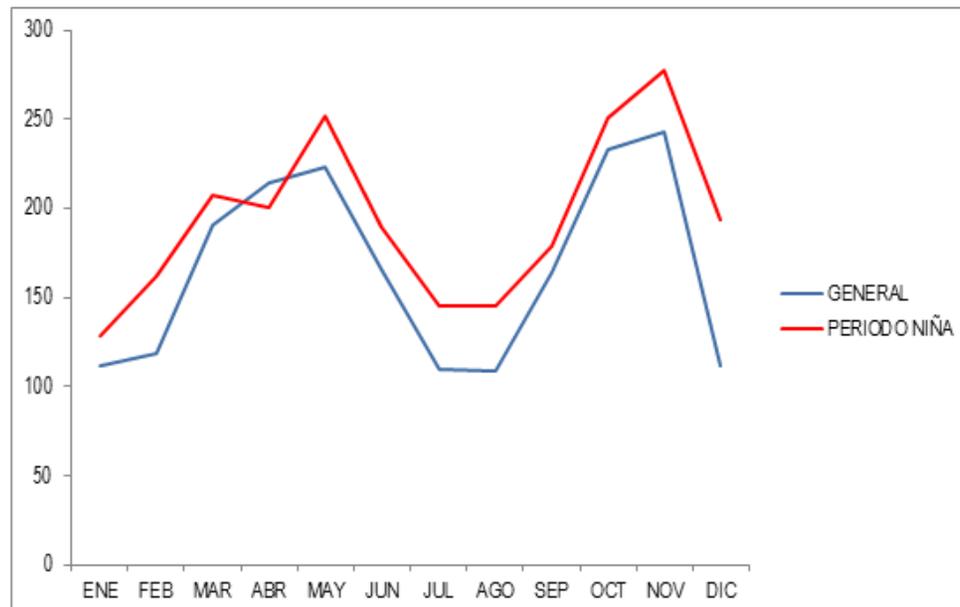


Figura 30. Precipitación media mensual Vs. Precipitación media mensual NIÑA.

- **Variación de la precipitación y la recarga**

Se espera entonces que para la zona de estudio en períodos NIÑO (Ver Figura 33) a pesar de mantenerse un régimen de lluvia bimodal, se presenta una reducción en la precipitación mensual respecto al comportamiento promedio general (Ver Figura 31), contrario a lo presenciado en períodos NIÑA, donde se observó un incremento de ésta (Ver Figura 32). Por lo tanto, para la zona de estudio en términos de recarga, se espera a futuro que ésta varíe de acuerdo con la presencia o incidencia de alguno de estos fenómenos climáticos.

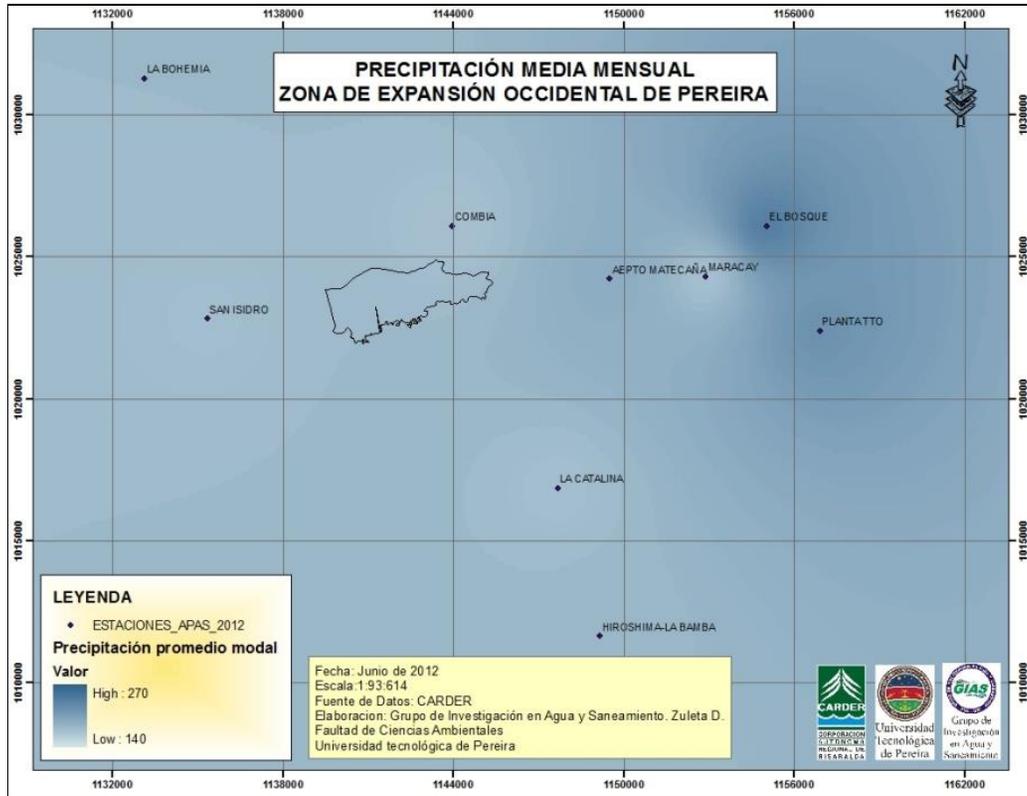


Figura 31. Precipitación media mensual.

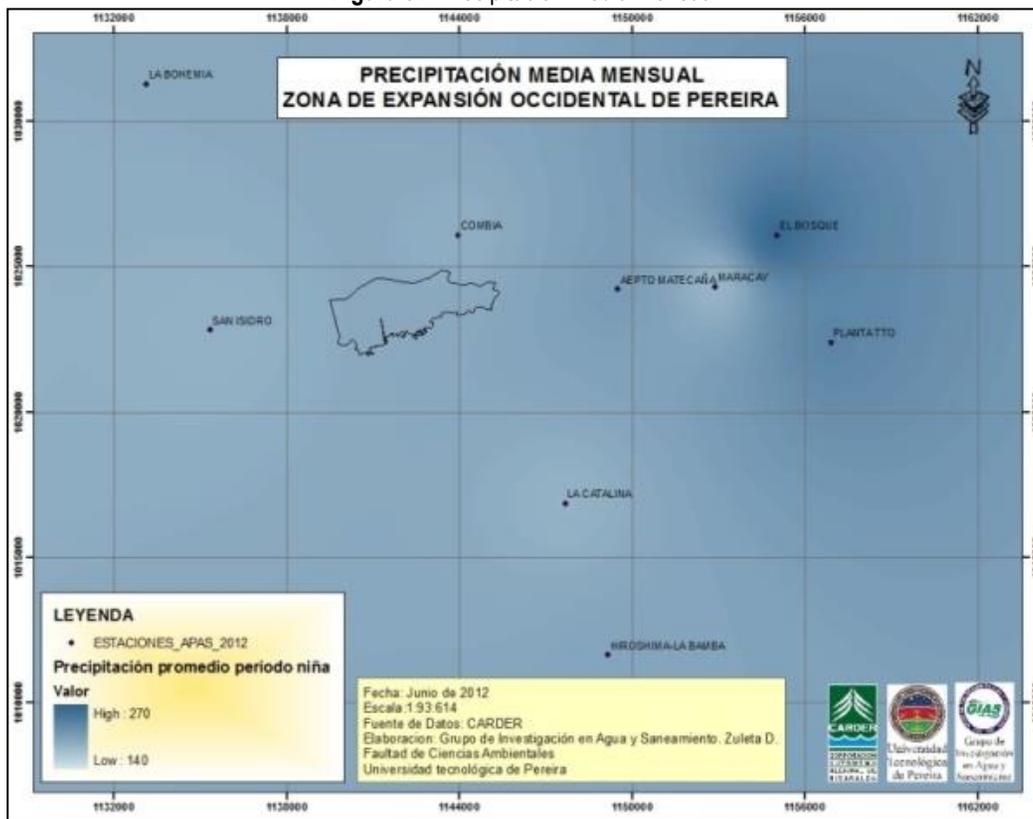


Figura 32. Precipitación media mensual periodo NIÑA.

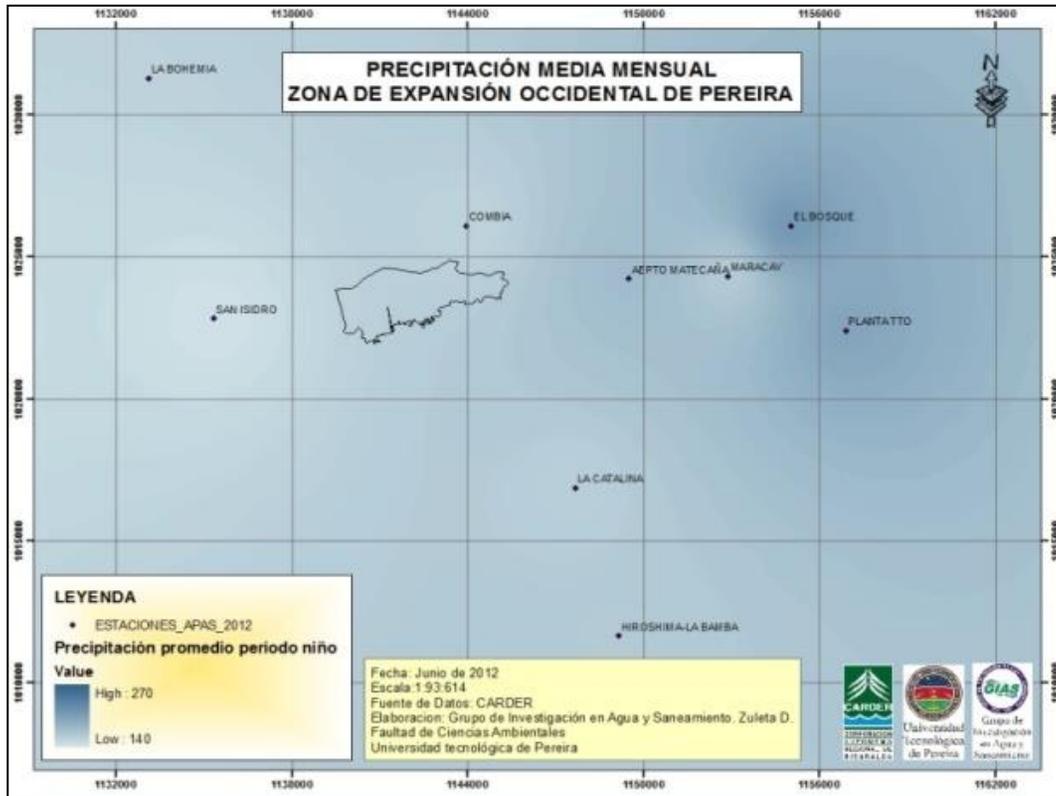


Figura 33. Precipitación media mensual periodo NIÑO.

### 6.1.6.2. Evapotranspiración

#### a) Evapotranspiración mensual general

En la Tabla 17 se presentan los resultados del cálculo de la evapotranspiración mensual multianual, donde se observó que no existe gran diferencia entre los valores mensuales; sin embargo se encontró que los meses de mayores registros de evapotranspiración corresponden a marzo (121.9 mm) y enero (120.5 mm), y los de menor evapotranspiración son noviembre (96.6 mm) y junio (97.3 mm).

Tabla 17. Evapotranspiración media mensual general en la zona de expansión occidental.

| Mes  | Temp Min (°C) | Temp Max (°C) | Humedad (%) | Viento (m/s) | Insolación (h) | Rad (MJ/m <sup>2</sup> /día) | Eto (mm/día) | Eto (mm/mes) |
|------|---------------|---------------|-------------|--------------|----------------|------------------------------|--------------|--------------|
| ENE  | 20.2          | 24.9          | 73          | 1.8          | 7              | 18.8                         | 3.89         | <b>120.5</b> |
| FEB  | 20.2          | 24.4          | 73          | 1.7          | 6              | 18.2                         | 3.82         | 107.0        |
| MAR  | 20.1          | 24.6          | 74          | 1.7          | 6              | 18.8                         | 3.93         | <b>121.9</b> |
| ABR  | 20.4          | 23.2          | 77          | 1.7          | 5              | 17.1                         | 3.55         | 106.5        |
| MAY  | 20.2          | 23.1          | 78          | 1.6          | 5              | 16.4                         | 3.36         | 104.3        |
| JUN  | 20.3          | 23            | 78          | 1.5          | 5              | 16                           | 3.24         | <b>97.3</b>  |
| JUL  | 20.4          | 24            | 74          | 1.6          | 6              | 17.6                         | 3.63         | 112.6        |
| AGO  | 20.5          | 24.3          | 73          | 1.6          | 6              | 18.2                         | 3.82         | 118.6        |
| SEP  | 20            | 23.4          | 75          | 1.6          | 6              | 18.6                         | 3.79         | 113.7        |
| OCT  | 19.9          | 22.8          | 78          | 1.6          | 5              | 16.7                         | 3.39         | 105.2        |
| NOV  | 19.9          | 22.7          | 78          | 1.6          | 5              | 16                           | 3.22         | <b>96.6</b>  |
| DIC  | 20.1          | 24            | 76          | 1.6          | 6              | 17                           | 3.43         | 106.4        |
| PROM | 20.2          | 23.7          | 76          | 1.6          | 5.7            | 17.5                         | 3.59         | 1310.8       |

La curva de comportamiento de este componente se presenta en la Figura 34.

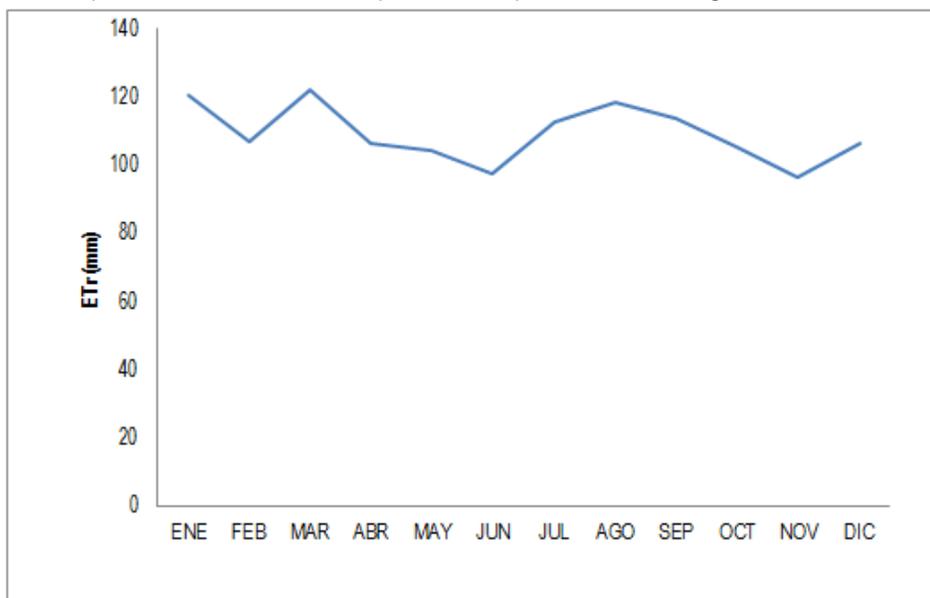


Figura 34. Comportamiento de la evapotranspiración media ZEOX.

Teniendo en cuenta los usos de suelo identificados en la zona de estudio en la Tabla 18, se estimó la evapotranspiración, de los cultivos y otras áreas, de acuerdo a sus coeficientes de cultivo Kc.

Tabla 18. Cálculo de Kc para la zona de expansión occidental de Pereira.

| USO                 | Ha            | Kc           |             |
|---------------------|---------------|--------------|-------------|
|                     |               | Kc           | Kci         |
| Café tecnificado    | 157.19        | 0.9          | 0.15        |
| Centros poblados    | 6.21          | 1.0          | 0.01        |
| Cultivos generales  | 219.94        | 1.0          | 0.24        |
| Pastos no manejados | 94.26         | 1.1          | 0.11        |
| Pastos y Rastrojos  | 198.36        | 1.1          | 0.23        |
| Rastrojo            | 81.62         | 1.1          | 0.09        |
| Rastrojo y bosques  | 69.2          | 1.2          | 0.09        |
| Ríos                | 4.07          | 1.0          | 0.00        |
| Vías y Otros        | 90.09         | 1.0          | 0.10        |
| <b>TOTAL</b>        | <b>920.94</b> | <b>TOTAL</b> | <b>1.02</b> |

Fuente: Adaptado de FAO, (2006)

### 6.1.6.3. Escorrentía

La escorrentía superficial mensual se halló con la diferencia correspondiente entre la escorrentía superficial generada por la lluvia mensual con la retención y lámina neta que se infiltra en el suelo. También se realizó el análisis para períodos NIÑO y NIÑA. Los cálculos de retención y la precipitación que infiltra se relacionan en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Parámetros para determinar retención método balance hídrico de suelos.

| USO                 | Ha            | %              | Kp<br>Pendiente | Kv<br>Kpi   | Cobertura  | Kvi         |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|-------------|------------|-------------|
| Café tecnificado    | 157.19        | 17.07%         | 0.10            | 0.017       | 0.10       | 0.003       |
| Centros poblados    | 6.21          | 0.67%          | 0.15            | 0.001       | 0.09       | 0.000       |
| Cultivos generales  | 219.94        | 23.88%         | 0.10            | 0.024       | 0.10       | 0.006       |
| Pastos no manejados | 94.26         | 10.24%         | 0.10            | 0.010       | 0.18       | 0.001       |
| Pastos y rastrojos  | 198.36        | 21.54%         | 0.10            | 0.022       | 0.18       | 0.005       |
| Rastrojo            | 81.62         | 8.86%          | 0.10            | 0.009       | 0.21       | 0.001       |
| Rastrojo y bosques  | 69.2          | 7.51%          | 0.06            | 0.005       | 0.20       | 0.000       |
| Ríos                | 4.07          | 0.44%          | 0.15            | 0.001       | 0.09       | 0.000       |
| Vías y otros        | 90.09         | 9.78%          | 0.15            | 0.015       | 0.09       | 0.001       |
| <b>TOTAL</b>        | <b>920.94</b> | <b>100.00%</b> | <b>Kpt</b>      | <b>0.10</b> | <b>Kvt</b> | <b>0.02</b> |

Fuente: Adaptado de Schosinsky (2007).

- **Análisis del comportamiento de la Escorrentía**

Con base en los resultados de Tabla 20 se observa que los meses de mayor escorrentía son Noviembre (149.8 mm) y Octubre (141.9 mm) y los de menor escorrentía corresponden a Agosto (37.1 mm) y Julio (37.6 mm), los cuales hacen parte de los periodos húmedos y secos. Por lo tanto, se deduce que para el cálculo de la escorrentía la aplicación de éste método es confiable ya que permite visualizar que los periodos húmedos coinciden con los meses de alta escorrentía, al igual que los periodos secos coinciden con los meses de baja escorrentía.

Con respecto al análisis para periodos NIÑO, los meses de mayor escorrentía corresponden a Noviembre (142.8 mm) y Octubre (139.8 mm), y los de menor escorrentía son Agosto (23.7 mm) y Febrero (25.9 mm). Respecto a los meses de Agosto y Diciembre, se analiza que aunque la precipitación es mayor al comportamiento promedio general y por ende la lámina de escorrentía, se espera que la lámina de recarga durante la ocurrencia de este fenómeno, sea mayor a la lámina de escorrentía superficial. Para periodos NIÑA los meses de mayor escorrentía corresponden a Noviembre (179.8 mm) y Mayo (157.7 mm), y los de menor escorrentía son Enero (53.6 mm) y Julio (67.5 mm) respectivamente.

De igual manera se determina que sigue existiendo una relación directa entre la precipitación y la escorrentía, siendo ésta mayor ante un aumento de la precipitación, en la que la lámina de recarga estará condicionada a factores de velocidad de infiltración y humedad de suelo (Jiménez, 1992).

**Tabla 20.** Escorrentía mensual general, Periodos NIÑO y NIÑA zona de expansión occidental de Pereira

| Escorrentía (mm)           | ENE  | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL  | AGO  | SEP  | OCT   | NOV   | DIC   |
|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Mensual Multianual general | 39.1 | 45.4 | 105.9 | 125.9 | 133.3 | 85.2  | 37.6 | 37.1 | 83.2 | 141.9 | 149.8 | 39.2  |
| Periodos NIÑO              | 27.9 | 25.9 | 100.8 | 112.9 | 125.5 | 77.7  | 41.1 | 23.7 | 71.0 | 139.8 | 142.8 | 56.1  |
| Periodos NIÑA              | 53.6 | 81.7 | 120.0 | 114.2 | 157.7 | 105.4 | 67.5 | 68.0 | 96.3 | 156.7 | 179.8 | 108.8 |

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 35 se relaciona el comportamiento medio mensual de la escorrentía a partir de este método, identificándose un comportamiento similar de los meses analizados anteriormente para el componente de precipitación (abril, para periodos NIÑA, y julio y diciembre para periodos NIÑO) lo

cual se pueden atribuir a las mismas razones de comportamiento analizados por la relación directa entre el componente de precipitación y escorrentía.

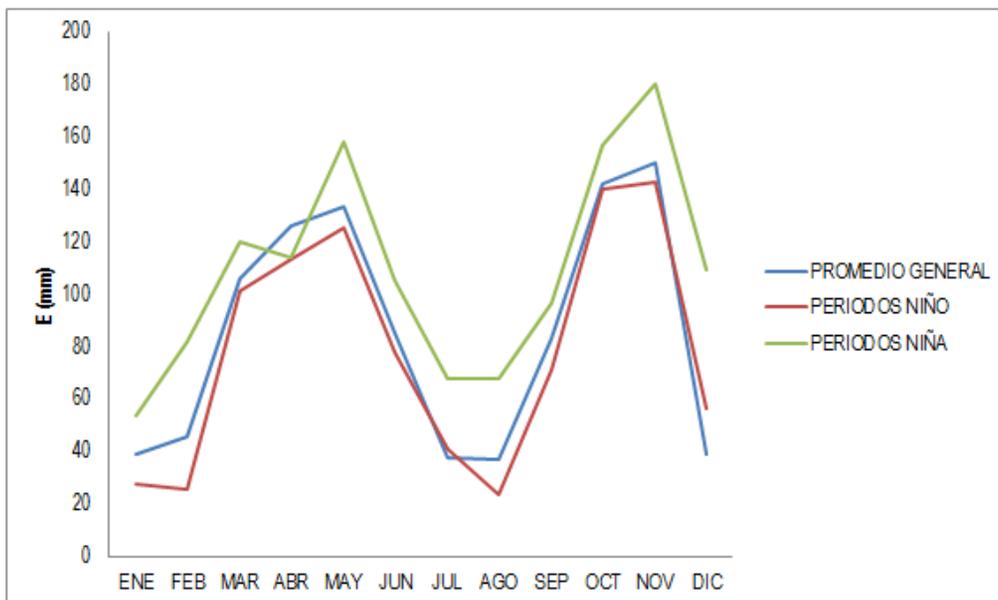


Figura 35. Comportamiento de la escorrentía media mensual ZEOX.

#### 6.1.6.4. Balance hídrico promedio general

Teniendo en cuenta los factores de precipitación, evapotranspiración y escorrentía, se obtuvo que el balance hídrico mensual (ver Tabla 21), es positivo en cada uno de los meses generando lámina de almacenamiento, tal como se observa en la figura 36. Se observa también en la Tabla 21 que febrero y diciembre son los meses de menor balance hídrico (92.7 mm y 101.2 mm, respectivamente), y noviembre y octubre son los meses de mayor balance hídrico (197.5 mm y 193.1 mm, respectivamente).

Tabla 21. Balance hídrico para la zona de expansión occidental (mm).

| ENE   | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 114.3 | 92.7 | 191.7 | 189.6 | 179.9 | 138.2 | 106.6 | 119.3 | 146.9 | 193.1 | 197.5 | 101.2 |

Fuente: Elaboración propia

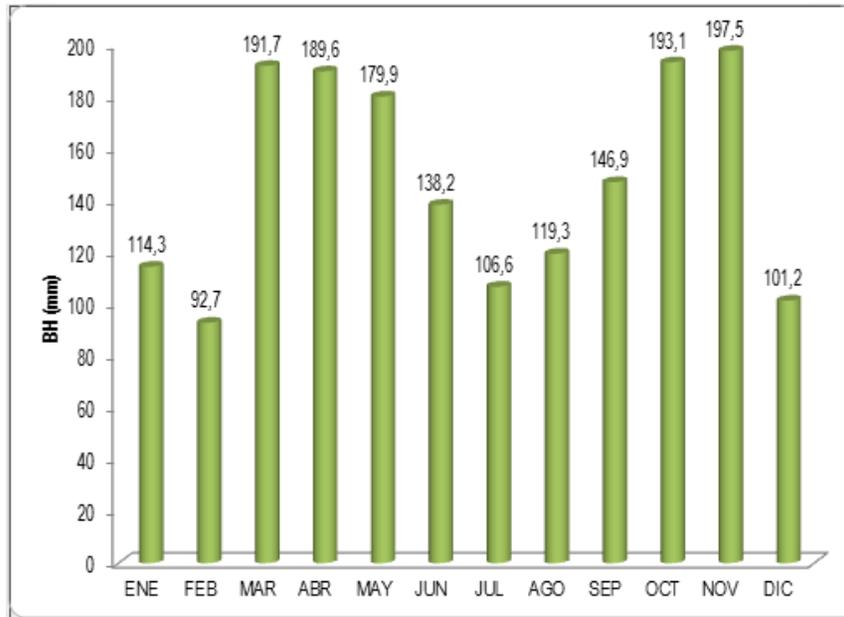


Figura 36. Comportamiento del Balance hídrico promedio general ZEOX.

La figura 37, hace referencia a la distribución de la recarga en la zona de expansión occidental de Pereira, donde se confirma (de acuerdo a la distribución de la precipitación) que la mayor recarga promedio se da hacia el sector suroccidental de la zona de estudio, lo que indica también que los suelos en la zona de estudios, son de cierta forma homogéneos por no ser un área muy grande.

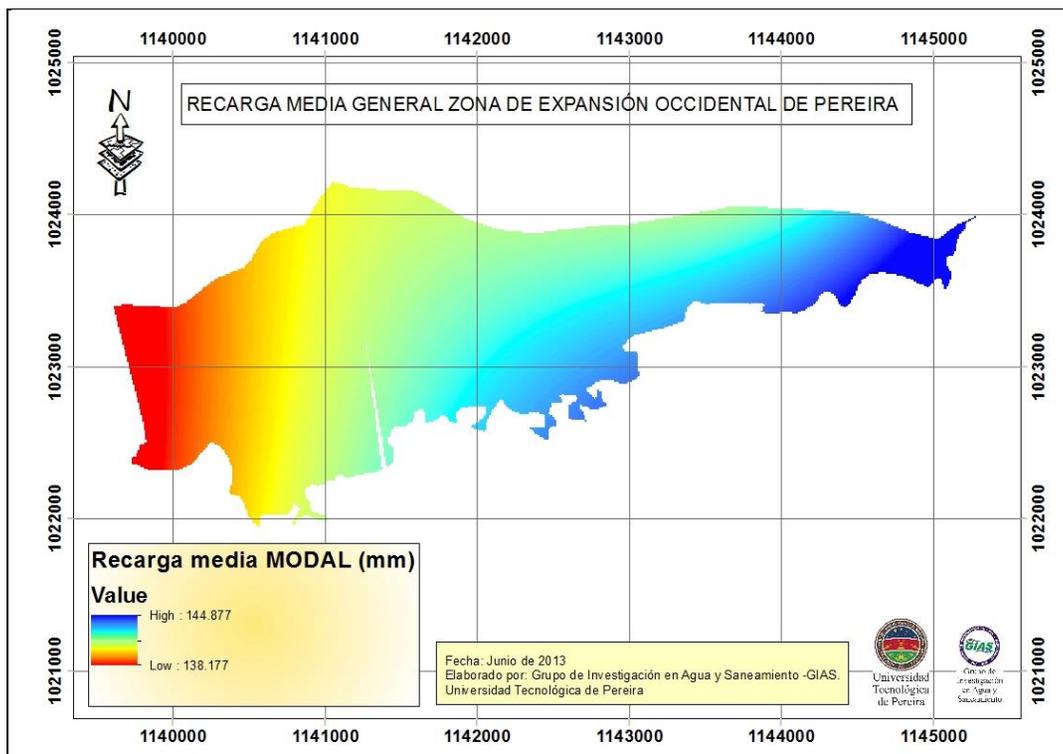


Figura 37. Recarga media general para la ZEOX.

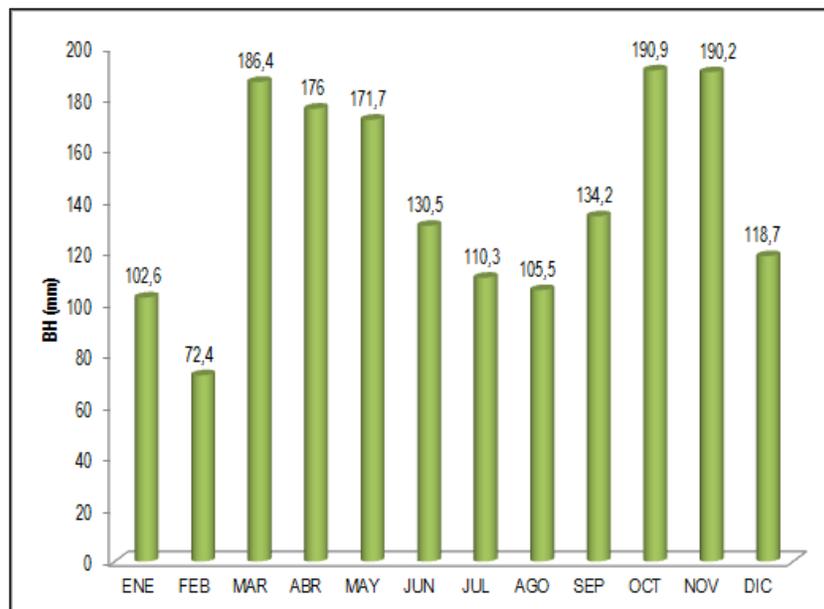
### 6.1.6.5. Balance hídrico períodos NIÑO

En períodos NIÑO debido a que la disminución en la precipitación no es muy marcada, existe un balance hídrico positivo (ver Tabla 22), generando lámina de almacenamiento que favorece la recarga del acuífero en la zona de estudio (Ver figura 38). De igual manera, se observa que febrero y enero son los meses de menor balance hídrico y por ende de menor recarga (72.4 mm y 102.6 mm, respectivamente) y los meses de mayor recarga son octubre y (190.9 mm y 190.2 mm, respectivamente).

**Tabla 22.** Balance Hídrico para la zona de expansión occidental contemplando periodos NIÑO (mm).

| ENE   | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 102.6 | 72.4 | 186.4 | 176.0 | 171.7 | 130.5 | 110.3 | 105.5 | 134.2 | 190.9 | 190.2 | 118.7 |

Fuente: Elaboración propia



**Figura 38.** Comportamiento del Balance hídrico promedio ZEOX en periodos NIÑO.

En la figura 39; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se relaciona la distribución de la recarga media en períodos NIÑO para la zona de Expansión Occidental de Pereira, asumiendo que ésta respecto a la recarga en un periodo medio, tiene un comportamiento de mayor recarga desplazado hacia la parte suroriental de la zona.

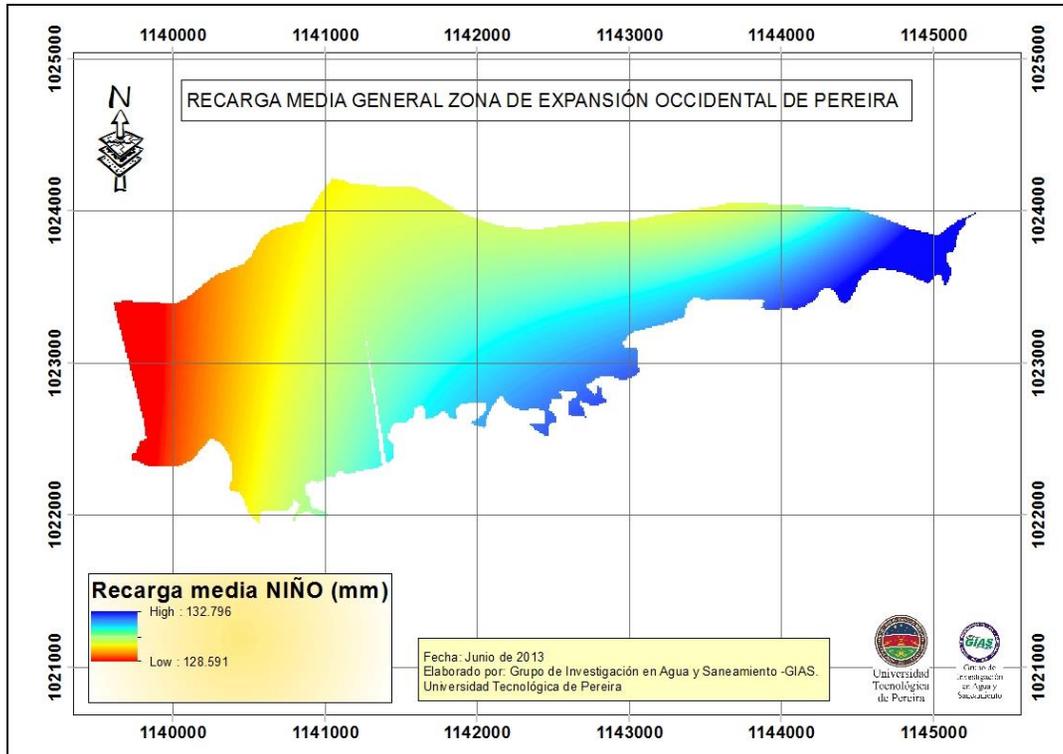


Figura 39. Recarga media ZEOX en periodo NIÑO.

#### 6.1.6.6. Balance hídrico periodos NIÑA

Siendo positivo el balance hídrico y la recarga en el período modal, durante La NIÑA es positivo en cada mes (ver Tabla 23) generando lámina de almacenamiento (Ver figura 40). De igual manera, se observa que enero y febrero son los meses de menor balance hídrico y por ende de menor recarga (129.3 mm y 130.4 mm, respectivamente) y noviembre y octubre son los meses que presentan mayor recarga (228.6 mm y 208.5 mm, respectivamente).

Tabla 23. Balance Hídrico para la zona de expansión occidental contemplando periodos NIÑA.

| ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 129.3 | 130.4 | 206.4 | 177.4 | 205.2 | 159.3 | 137.8 | 151.5 | 160.5 | 208.5 | 228.6 | 173.5 |

Fuente: Elaboración propia

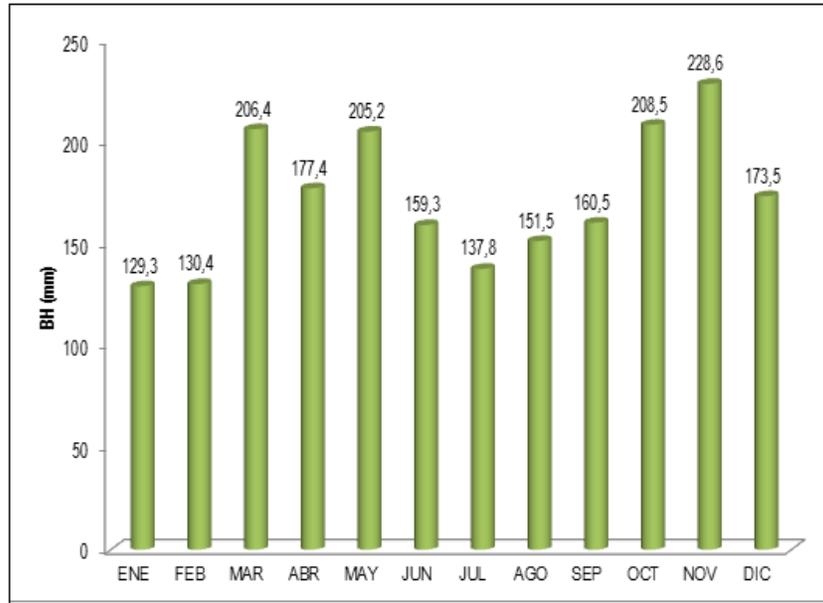


Figura 40. Comportamiento del Balance hídrico en la ZEOX contemplando periodos NIÑA.

Por otro lado en la figura 41 se relaciona la distribución de la recarga en periodos NIÑA para la zona de estudio, observándose un comportamiento similar al comportamiento medio de la recarga estimado en un periodo NIÑO.

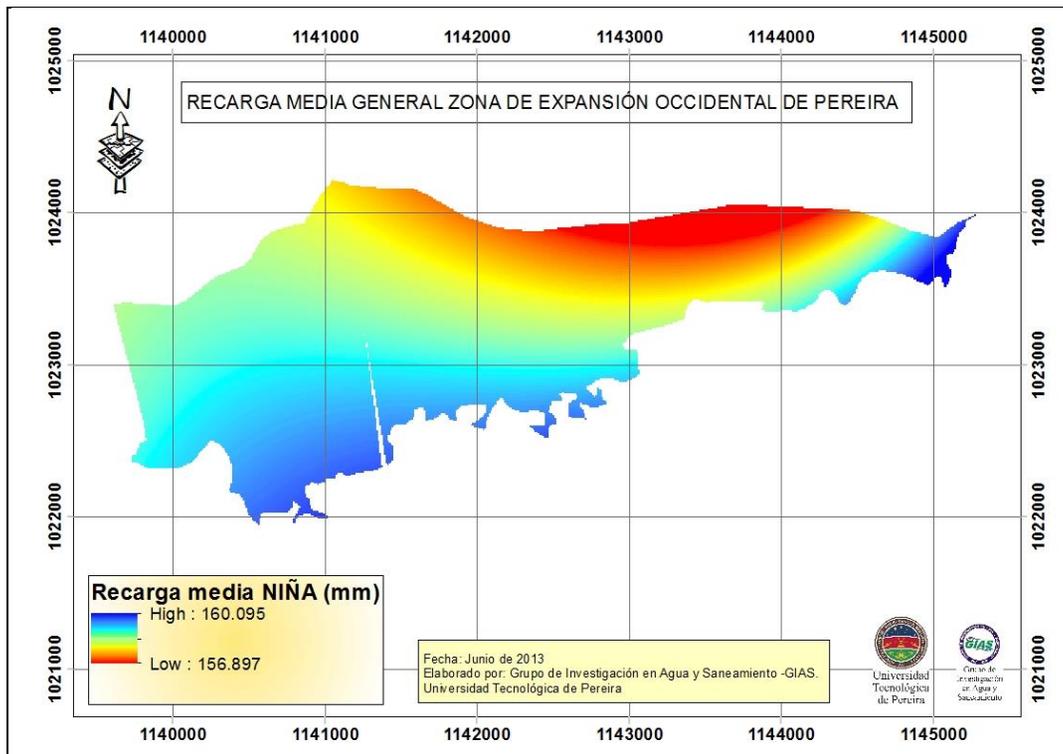


Figura 41. Recarga media ZEOX en periodo NIÑA.

## 6.2. Objetivo 2. Evaluación eficiencia de Jardines de Lluvia en cantidad y calidad

### 6.2.1. Relación Precipitación – Recarga

Como se ha mencionado a lo largo del documento, la precipitación y la escorrentía y por ende la recarga del acuífero, se espera tengan una relación directa, debido a los estudios realizados por CARDER (2007) donde se estableció que el acuífero se recargaba por precipitación directa sobre el suelo. Analizando la información procesada de la ZEOX, se encontró que existe efectivamente una relación directa entre el comportamiento de la precipitación y la recarga del acuífero para cada uno de los meses del año, donde una reducción en la precipitación genera una reducción en el comportamiento de la recarga, al igual que un incremento en la misma genera una recarga máxima permisible de acuerdo con las condiciones del suelo. También es posible deducir, de acuerdo con los alcances y limitantes del método utilizado, que a mayor lámina de escorrentía, hay mayores probabilidades de obtener mayor lámina de recarga condicionados principalmente por:

- **Velocidad de infiltración del suelo:** Entre más rápido sea ésta, mayor recarga se obtiene. De igual manera, a velocidades de infiltración lentas, hay mayor lámina de escorrentía superficial impidiendo que la recarga sea mayor, que sería el comportamiento esperado en la zona de expansión occidental dada las características texturales de sus suelos (predominio de arcillas) (Jiménez, 1992).
- **Humedad inicial del suelo:** Un suelo no saturado permite el almacenamiento de agua en el suelo, permitiendo obtener un aumento en la recarga en tiempos cortos. Por otro lado, suelos saturados o que se encuentren a capacidad de campo (CC), aumentará la recarga siempre y cuando la velocidad de infiltración sea rápida.

La figura 42 hace referencia al análisis comparativo sobre el comportamiento de precipitación y la recarga, encontrando que en los meses de Enero y Agosto el valor de la recarga es mayor al de la precipitación, lo cual se debe a las condiciones de humedad inicial y final asumidas para la aplicación del método seleccionado (balance hídrico de suelos). Por tal motivo, se sugiere que trabajos futuros vayan enfocados a la calibración de este método a partir de la estimación de valores reales para los suelos representativos en la zona de expansión occidental.

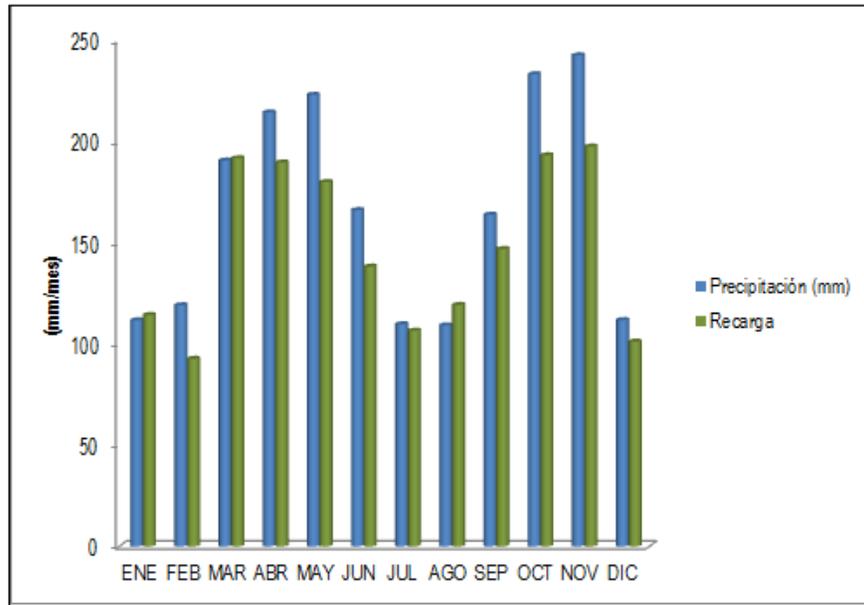


Figura 42. Comparación del comportamiento entre precipitación media y recarga en la ZEOX.

### 6.2.2. Infiltración en la ZEOX

Después de realizar el balance hídrico para la zona, se procedió a estimar la velocidad de infiltración en el suelo, para determinar así la lámina de agua que llega al acuífero a partir de la ocurrencia de un evento de precipitación. La velocidad de infiltración se determinó en campo mediante la técnica de infiltrómetros o anillos dobles (Gurovich, 1981; Jiménez, 1992), realizando tres repeticiones en el área de cada uso de suelo identificado dentro de la zona de estudio (Ver Figura 43 y Figura 44).



Figura 43. Técnica de infiltrómetros dobles



Figura 44. Prueba de infiltración en campo

Las pruebas de infiltración, se realizaron para seis (6) coberturas de uso, donde se tiene establecida la construcción de la infraestructura, por lo que no se tuvieron en cuenta los usos de conservación que sí se mantendrán. Cada prueba, duró hasta obtener valores constantes, por lo que el tiempo varió de una cobertura a otra, teniendo establecido un tiempo mínimo de 4 horas. A partir de los datos obtenidos se estableció la curva de infiltración aplicando el modelo matemático de Kostiakov (Jiménez, 1992).

La curva de infiltración, se obtuvo para los usos de: guadua, yuca, piña, cítricos, pasto manejado y café. En general, la mayor infiltración de agua se da en las zonas donde existen cultivos de cítricos con una lámina esperada de 213 milímetros en 4,2 horas, y la menor infiltración se presenta en cultivos de yuca de 190.5 milímetros en 3.8 horas, para profundidades hasta de 30 centímetros. En el Anexo 2 se encuentran las curvas de infiltración para cada uno de los usos en cada repetición y el cálculo de la infiltración.

### 6.2.2.1. Pruebas físicas de los suelos

Debido a que el movimiento del agua a través de sus perfiles, depende de las propiedades físicas de los suelos como textura, estructura, cantidad y tipo de arcilla y contenido de materia orgánica, se determinaron dichas propiedades para relacionarlas después con la capacidad de infiltración (Jimenez, 1992). En el Anexo 3, se encuentran todos los cálculos realizados de las propiedades físicas del suelo).

Para determinar las propiedades físicas de los suelos más relacionadas con los procesos de infiltración, se tomaron muestras de los diferentes tipos de suelo y se realizaron pruebas fisicoquímicas para saber los pesos secos del suelo y así el porcentaje de humedad, el porcentaje de porosidad y la textura. A partir de lo anterior calcular densidad aparente y capacidad de campo. En las Figuras 45 y 46 se muestran dos tipos de suelo típicos de la zona de estudio.



Figura 45. Excavación suelo ZEOX



Figura 46. Características del suelo ZEOX

Se puede observar que los horizontes del suelo son profundos, pues no se notan cambios en los primeros 30 centímetros. También se puede percibir la tendencia de una textura arcillosa principalmente por la coloración amarillenta que presentan.

La textura del suelo fue determinada en el laboratorio de análisis de suelos y foliares de la Universidad Tecnológica de Pereira a partir de muestras obtenidas en cada punto donde se realizaron las pruebas de infiltración, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 24, donde se observa que en general en la ZEOX predominan suelos con textura arcillosa.

**Tabla 24.** Textura de suelo por cobertura

| Cobertura | Textura          |
|-----------|------------------|
| Piña      | Arcilloso        |
| Guadua    | Franco Arcilloso |
| Café      | Franco           |
| Cítricos  | Arcilloso        |
| Pasto     | Arcilloso        |
| Yuca      | Franco Arcilloso |
| Caña      | Arcilloso        |

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la tabla que para la cobertura de café el tipo de suelo es franco arcilloso, correspondiente al vivero Pavas donde se realizó dicha prueba y donde se instalaron los jardines de lluvia, por lo que es necesario tener en cuenta que para el resto de la zona de expansión a la hora de construir jardines de lluvia se deben implementar relaciones de área de la zona impermeable respecto al jardín, menores que las usadas en este estudio piloto, pues entre más arcilloso sea el suelo, menor infiltración tendrá.

Para cada cobertura y profundidad de suelo, se halló el porcentaje de humedad teniendo en cuenta el peso del suelo húmedo (obtenido en campo) en relación con el peso del suelo seco. En la Tabla 25 se resume la información obtenida de acuerdo de los porcentajes de humedad para cada cobertura y profundidad del suelo cada uno de los ensayos (tres Infiltrómetros), donde se observa variaciones asociadas principalmente con las coberturas.

**Tabla 25.** % de humedad por cobertura de suelo

| Cobertura | % Humedad |
|-----------|-----------|
| Piña      | 14 – 20   |
| Guadua    | 10 - 27   |
| Café      | 14 – 23   |
| Cítricos  | 14 – 19   |
| Pasto     | 7 – 24    |
| Yuca      | 9 – 28    |
| Caña      | 4 – 19    |

Fuente: Elaboración propia

Utilizando los datos de densidad aparente, se obtuvo el porcentaje de porosidad en cada uso del suelo. En general estos porcentajes variaron entre un 10% y un 40%. La densidad aparente, obtenida a partir del valor del suelo seco, se calculó para cada cobertura de suelo estudiado. Las variaciones obtenidas se muestran en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Densidad aparente por cobertura de suelo

| Cobertura | G/Cm <sup>3</sup> |
|-----------|-------------------|
| Piña      | 1.79 – 2.36       |
| Guadua    | 1.57 – 2.03       |
| Café      | 1.71 – 2.18       |
| Cítricos  | 1.65 – 2.22       |
| Pasto     | 1.73 – 2.11       |
| Yuca      | 1.59 – 2.04       |
| Caña      | 1.53 – 2.14       |

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos son altos, debido a los procesos de compactación, generados por los cultivos existentes, teniendo un impacto directo sobre los procesos de infiltración y aireación del suelo, sin embargo para la textura de los suelos de la zona (principalmente franco arcillosos), la densidad aparente no debería ser mayor a 1.5 g/cm<sup>3</sup>.

Para realizar el cálculo de la infiltración potencial, se tomaron los datos obtenidos anteriormente (densidad, porosidad y textura) hasta llegar a un valor de lámina de infiltración, para diferentes profundidades de suelo.

En la figura 47 se presenta el mapa de infiltración sobre las zonas destinadas a urbanización en la zona de expansión, teniendo en cuenta los diferentes usos del suelo a una profundidad de 30 centímetros y con la mínima precipitación presentada en la zona. Donde se observa que en general, la lámina promedio de infiltración en la zona de estudio oscila entre 198.03 mm y 205.56 mm (representaría entre 1.82 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> y 1.89 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> de volumen de recarga), lo cual se reduciría de manera considerable al expandirse la ciudad de Pereira hacia este sector.

La zona de menor recarga se encuentra distribuida por la zona de Galicia, presentando infiltraciones entre 190 y 198 mm. Es importante resaltar que la mayor infiltración se da hacia el nororiente de la zona de expansión, coincidiendo con lo obtenido en los mapas de recarga del acuífero según las condiciones climáticas presentadas.

Para agrupar los rangos de infiltración, se construyeron intervalos de clase, tomando los valores máximos y mínimos y se obtuvieron igualmente los rangos de frecuencia con base en la información registrada en la Tabla 27.

**Tabla 27.** Valores bases para determinar rangos de infiltración

| Uso      | Infiltración A 30 Cm De Profundidad (Mm) |
|----------|--|
| PIÑA     | 198,7                                    |
| GUADUA   | 202,6                                    |
| CAFÉ     | 206,2                                    |
| CÍTRICOS | 213,1                                    |
| PASTO    | 203,9                                    |
| YUCA     | 190,5                                    |
| CAÑA     | 204,1                                    |

Fuente: Elaboración propia

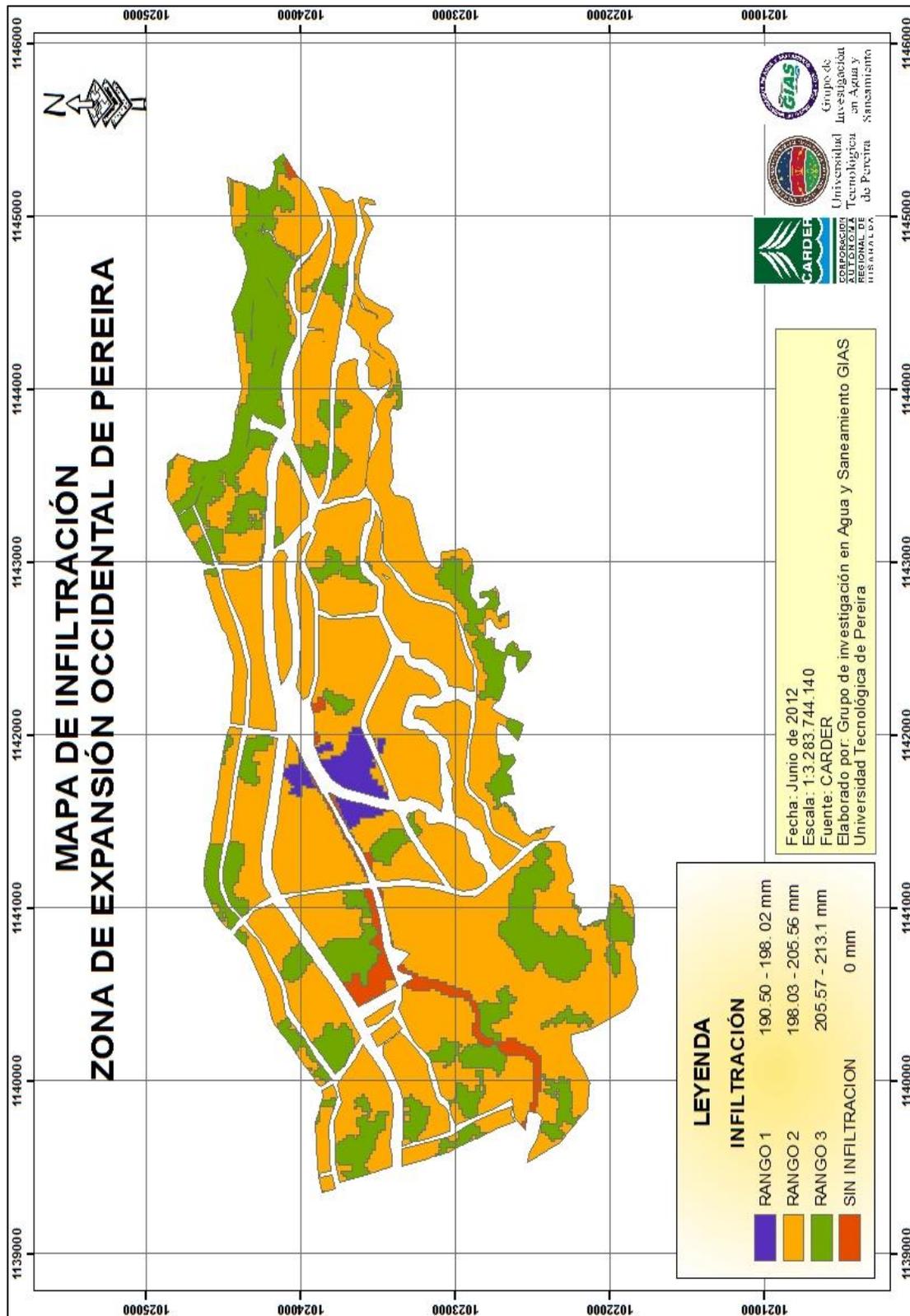


Figura 47. Mapa de Infiltración sobre polígonos de proyección de población

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3. Impacto en la recarga del acuífero en la zona de estudio por efectos de la urbanización

Una vez analizadas la infiltración y la recarga a partir de la estimación del balance hídrico, se procedió a determinar de manera teórica el impacto sobre la recarga por la urbanización en la zona de estudio. Para ello, se trabajó con la información de los modelos de ocupación de territorio establecidos por la Secretaría de Planeación de Pereira (2006). Posteriormente, se calculó el número de curva de escorrentía (CN) para las condiciones actuales y futuras y finalmente los resultados de escorrentía y recarga fueron comparados con los obtenidos hasta el momento.

#### 6.2.3.1. Cálculo del Número de Curva (CN) para uso de suelo actual (sin proceso de urbanización)

El cálculo del CN actual se determinó teniendo en cuenta información de usos de suelo suministrados por CARDER (2011), los cuales fueron procesados y determinados para la zona de estudio a través del procesamiento aplicando herramientas SIG y el método de número de curva CN expresado en la Ecuación 6. De acuerdo la información registrada en la Tabla 28, los usos más representativos son pastos en general (manejados y con rastrojo) con 292.6 ha aproximadamente, cultivos en general (incluye cultivos de caña panelera, piña y cítricos) con 219.9 ha y café tecnificado con 157.19 ha. De igual manera como se trabajó para las variables analizadas anteriormente, se estimó la escorrentía tanto general como no modal los resultados se presentaron en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Cálculo del Número de Curva (CN) de acuerdo con usos del suelo año 2011.

| Uso                 | Ha            | %              | Cn           | Cni       |
|---------------------|---------------|----------------|--------------|-----------|
| Café tecnificado    | 157.19        | 17.07%         | 82           | 14.00     |
| Centros poblados    | 6.21          | 0.67%          | 90           | 0.60      |
| Cultivos generales  | 219.94        | 23.88%         | 83           | 19.82     |
| Pastos no manejados | 94.26         | 10.24%         | 75           | 7.68      |
| Pastos y Rastrojos  | 198.36        | 21.54%         | 71           | 15.29     |
| Rastrojo            | 81.62         | 8.86%          | 91           | 8.06      |
| Rastrojo y bosques  | 69.2          | 7.51%          | 70           | 5.26      |
| Ríos                | 4.07          | 0.44%          | 1            | 0.00      |
| Vías y Otros        | 90.09         | 9.78%          | 90           | 8.80      |
| <b>TOTAL</b>        | <b>920.94</b> | <b>100.00%</b> | <b>TOTAL</b> | <b>80</b> |

Fuente: Elaboración GIAS

#### 6.2.3.2. Cálculo del Número de Curva (CN) para uso de suelo con proceso de urbanización

Para recalcular el número de curva CN, se tomó la información del área de muestra, el área destinada para vivienda y el área destinada para andenes, parqueaderos y zonas verdes, determinando un CN ponderado para cada uno de los modelos de ocupación propuestos para la zona de expansión occidental de Pereira, los cuales se resumen en la Tabla 29.

**Tabla 29.** Estimación del número de curva CN para cálculo de recarga contemplando el modelo de ordenamiento territorial propuesto para la zona de expansión occidental.

| Polígono                    | Densidad poblacional propuesta | Áreas sin urbanizar (ha) | Cn | A <sub>i</sub> | Número de curva Cn <sub>a<sub>i</sub></sub> | Área urbanizada (ha) | Número de curva Cn | A <sub>ii</sub> | Numero de curva cna <sub>ii</sub> | Cn <sub>t</sub> (vna <sub>i</sub> + cna <sub>ii</sub> ) |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|----|----------------|---|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------------|---|
| 1                           | a                              | 20.0                     | 87 | 0.024          | 2.09  | 8.94                 | 90                 | 0.0107          | 0.96                              | 3.1   |
| 2                           | a                              | 6.0                      | 87 | 0.007          | 0.62  | 6.01                 | 90                 | 0.0072          | 0.64                              | 1.3   |
| 3                           | a                              | 13.0                     | 87 | 0.015          | 1.35  | 2.3                  | 90                 | 0.0027          | 0.24                              | 1.6   |
| 4                           | a                              | 27.9                     | 87 | 0.033          | 2.91  | 17.13                | 90                 | 0.0205          | 1.85                              | 4.8   |
| 5                           | m                              | 17.6                     | 88 | 0.021          | 1.85  | 71.56                | 90                 | 0.0859          | 7.73                              | 9.6   |
| 6                           | a                              | 22.4                     | 87 | 0.027          | 2.34  | 13.09                | 90                 | 0.0157          | 1.41                              | 3.8   |
| 7                           | a                              | 25.2                     | 87 | 0.030          | 2.63  | 9.09                 | 90                 | 0.0109          | 0.98                              | 3.6   |
| 8                           | b                              | 3.9                      | 89 | 0.0046         | 0.41  | 2.94                 | 90                 | 0.0035          | 0.31                              | 0.7   |
| 9                           | b                              | 7.8                      | 89 | 0.0093         | 0.83  | 7.06                 | 90                 | 0.0084          | 0.76                              | 1.6   |
| 10                          | a                              | 15.1                     | 87 | 0.0181         | 1.57  | 10.94                | 90                 | 0.0131          | 1.18                              | 2.8   |
| 11                          | a                              | 6.6                      | 87 | 0.0079         | 0.68  | 4.24                 | 90                 | 0.0050          | 0.45                              | 1.1   |
| 12                          | a                              | 38.0                     | 87 | 0.0456         | 3.97  | 26.92                | 90                 | 0.0323          | 2.91                              | 6.9   |
| 13                          | m                              | 12.6                     | 88 | 0.0151         | 1.33  | 12.39                | 90                 | 0.0148          | 1.34                              | 2.7   |
| 14                          | a                              | 24.3                     | 87 | 0.0291         | 2.54  | 22.29                | 90                 | 0.0267          | 2.41                              | 4.9   |
| 15                          | a                              | 15.5                     | 87 | 0.0186         | 1.62  | 15.51                | 90                 | 0.0186          | 1.67                              | 3.3   |
| 16                          | m                              | 11.3                     | 88 | 0.0135         | 1.19  | 10.17                | 90                 | 0.0122          | 1.09                              | 2.3   |
| 17                          | a                              | 17.4                     | 87 | 0.0208         | 1.81  | 14.93                | 90                 | 0.0179          | 1.61                              | 3.4   |
| 18                          | b                              | 12.4                     | 89 | 0.0149         | 1.33  | 10.04                | 90                 | 0.0120          | 1.08                              | 2.4   |
| 19                          | a                              | 27.9                     | 87 | 0.0334         | 2.91  | 21.4                 | 90                 | 0.0257          | 2.31                              | 5.2   |
| 20                          | a                              | 30.2                     | 87 | 0.0363         | 3.16  | 22.75                | 90                 | 0.0273          | 2.45                              | 5.6   |
| 21                          | a                              | 23.2                     | 87 | 0.0279         | 2.43  | 10.08                | 90                 | 0.0121          | 1.09                              | 3.5   |
| 22                          | b                              | 10.3                     | 89 | 0.0124         | 1.10  | 10.03                | 90                 | 0.0120          | 1.08                              | 2.2   |
| 23                          | b                              | 9.1                      | 89 | 0.0109         | 0.97  | 8.02                 | 90                 | 0.0096          | 0.87                              | 1.8   |
| 24                          | a                              | 25.8                     | 87 | 0.0310         | 2.69  | 23.35                | 90                 | 0.0280          | 2.52                              | 5.2   |
| 25                          | a                              | 22.6                     | 87 | 0.0271         | 2.36  | 17.15                | 90                 | 0.0206          | 1.85                              | 4.2   |
| 26                          | b                              | 5.0                      | 89 | 0.0060         | 0.53  | 3.04                 | 90                 | 0.0036          | 0.33                              | 0.9   |
| <b>Valor CN<sub>t</sub></b> |                                |                          |    |                |   |                      |                    |                 |                                   | <b>89</b>   |

Fuente: Elaboración GIAS

Con base en los resultados de las velocidades de infiltración para las diferentes coberturas se asumió de manera general una tasa de infiltración lenta con velocidades que oscilan entre 1 mm/h y 20 mm/h que corresponde a un grupo de suelo tipo C (suelos con baja infiltración, de textura franco arcillosa a arcillosa y con potencial de escorrentía alto).

Relacionando el valor de CN de la Tabla 30 con el obtenido en Tabla 28 (CN: 80), se analiza que hay una variación de este valor en nueve unidades, pasando de 80 (condiciones actuales) a 89 (condición proyectada) debido a que hay un aumento en las áreas impermeables (pavimentos) que afectan (reducen) la infiltración de agua en el suelo.

**Tabla 30.** Valores de CN recalculados de acuerdo con el modelo de ocupación de territorio

| Modelo Ocupación | Cn        |
|------------------|-----------|
| Densidad alta    | 87        |
| Densidad media   | 88        |
| Densidad baja    | 89        |
| <b>Total</b>     | <b>89</b> |

Fuente: Elaboración GIAS

Una vez estimado el nuevo valor de CN se procedió a estimar la escorrentía y posteriormente la recarga. A partir de los resultados relacionados en la Tabla 31 se observa que al existir impermeabilización en el suelo, hay un aumento en la lámina de escorrentía superficial, presentando una reducción en la recarga cuando existe urbanización de los suelos en la zona de expansión occidental, siendo éste el principal impacto que se genera sobre el acuífero de Pereira.

**Tabla 31.** Lámina de recarga en la zona de expansión occidental sin y con urbanización.

| MES                           | ENE   | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|-------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Recarga sin urbanización (mm) | 114.3 | 92.7 | 191.7 | 189.6 | 179.9 | 138.2 | 106.6 | 119.3 | 146.9 | 193.1 | 197.5 | 101.2 |
| Recarga con urbanización (mm) | 106.5 | 84.3 | 178.4 | 174.6 | 164.3 | 126.6 | 99.0  | 111.7 | 135.5 | 176.8 | 180.5 | 93.3  |

Fuente: Elaboración GIAS

Al relacionar la alteración de la recarga aplicando el método considerado en este estudio, se analizó que el comportamiento de ésta también se comporta de manera variable cuando la zona se ve influenciada por periodos de sequía y lluvia prolongados. El primero, con un descenso mayor respecto al descenso observado en la figura 48. De igual manera para el segundo caso, se adujo que el comportamiento de la recarga puede ser igual o menor al proyectado (recarga con urbanización) teniendo en cuenta las condiciones iniciales de humedad en el suelo en las zonas no revestidas o pavimentadas, al igual que la tasa de infiltración.

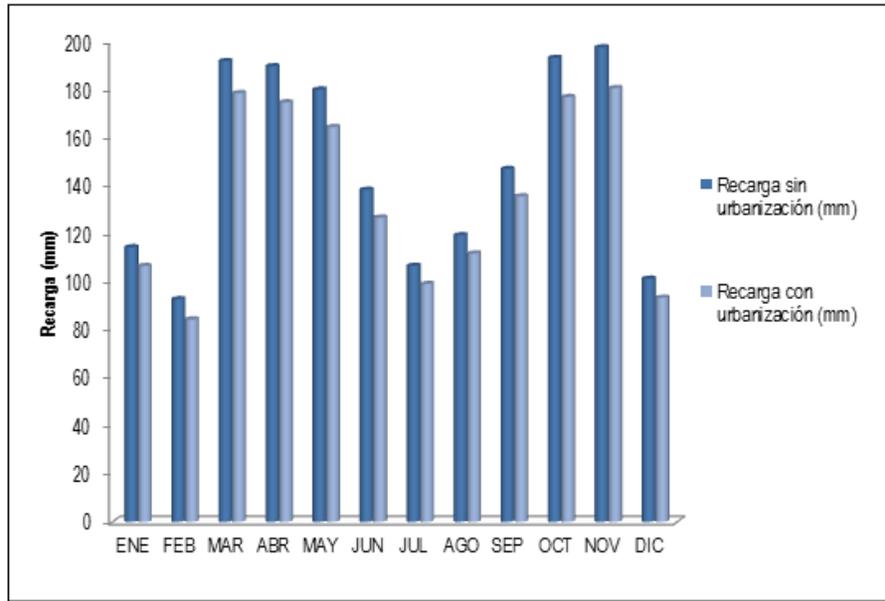


Figura 48. Comportamiento de la recarga mensual con y sin urbanización.

#### 6.2.4. Cantidad de agua infiltrada

En la Figura 49 se relacionó el comportamiento de la precipitación diaria obtenida a partir del pluviómetro instalado, donde se analizó que los valores altos correspondieron a eventos de lluvia de larga duración o de alta intensidad. Por ende, estos valores tienen una mayor incidencia con la capacidad de amortiguación de los jardines de lluvia instalados debido a que un evento de intensidad de precipitación mayor a la capacidad de infiltración básica del suelo originará una escorrentía superficial de cada uno de éstos.

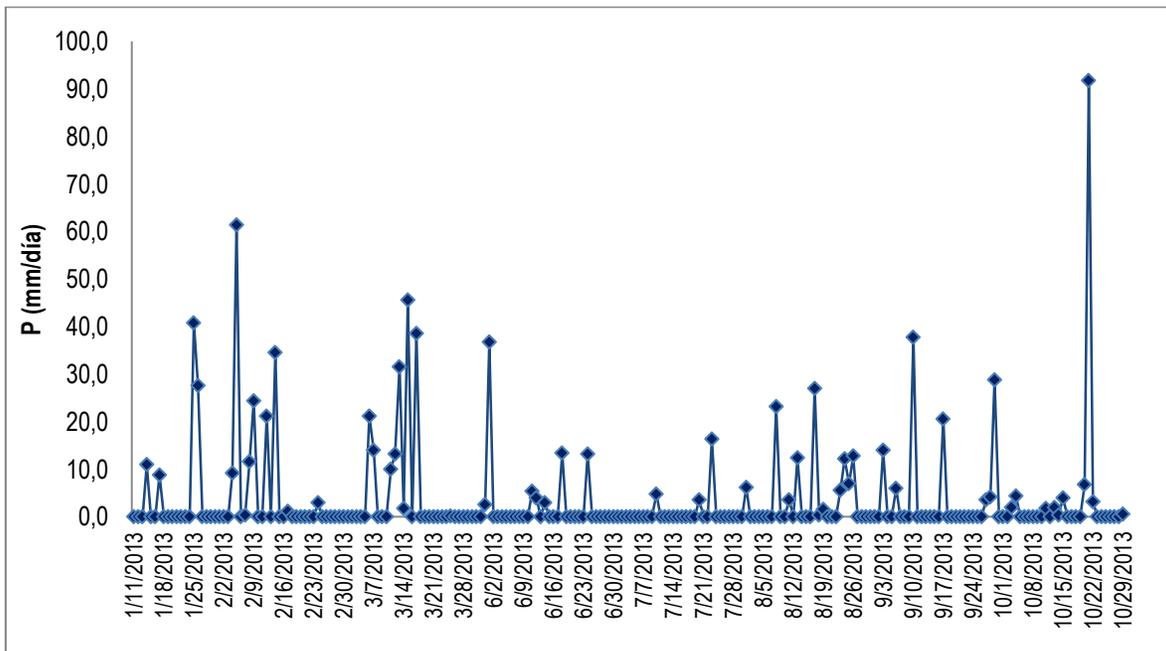


Figura 49. Precipitación pluviómetro instalado en la ZEOX vs fechas de descarga de datos

Dado que en este estudio sólo se contó con un registro de humedad de suelo tomado en la fase inicial y no se tomó la humedad en el momento de ocurrencia de un evento de precipitación, se aumenta la incertidumbre en la estimación de la lámina de escurrimiento. Para obtener una aproximación certera al comportamiento de la precipitación y por ende en la recarga de cada uno de los jardines, se asumió un tiempo de duración de lluvia generado de cuatro (4) horas tomado de las duraciones de todos los eventos de precipitación almacenados en el pluviómetro, encontrando que sólo el evento del día 21 de octubre de 2013 produjo escurrimiento superficial a una tasa de 3.75 mm/h, siendo 0.15 m<sup>3</sup> en términos de volumen (ver Figura 50), pero que puede ser una frecuencia de ocurrencia mayor debido a que los eventos de alta precipitación sucedidos anteriormente (2 de febrero y 15 de marzo) se encontraron muy cercano a la intensidad analizada.

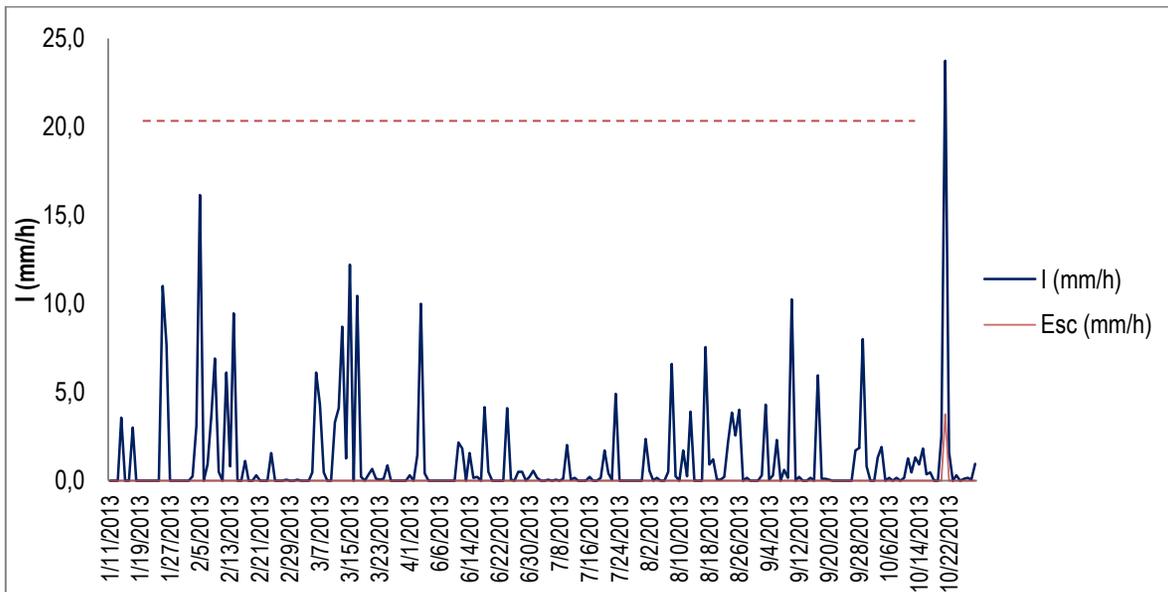


Figura 50. Escorrentía del jardín de lluvia vs la infiltración

El análisis realizado hasta el momento permitió deducir que existe una lámina de recarga que es casi total a la lámina precipitada (sin superar una intensidad de lluvia de 4 horas), coincidiendo con los estudios realizados por Tornos (2005) en los que el área del jardín puede infiltrar 25 veces su tamaño (ver Figura 51).

En general, los jardines mejoran la infiltración del agua permitiendo la infiltración de un área de 100m<sup>2</sup> a través de 4m<sup>2</sup>, coincidiendo con lo reportado por Davis, 2001; Dietz y Clausen, (2005), Hunt et al. (2006), Li y Davis (2009), Tornos (2005), entre otros. De lo anterior, y teniendo en cuenta que los datos analizados corresponden a 12 meses y teniendo en cuenta también la variabilidad en el clima, es recomendable trabajar con los jardines de 1 metro de profundidad con el fin de evitar la construcción de infraestructuras de rebose o escurrimientos que podrían ocasionar problemáticas de erosión o arrastre de sedimentos hacia otras zonas.

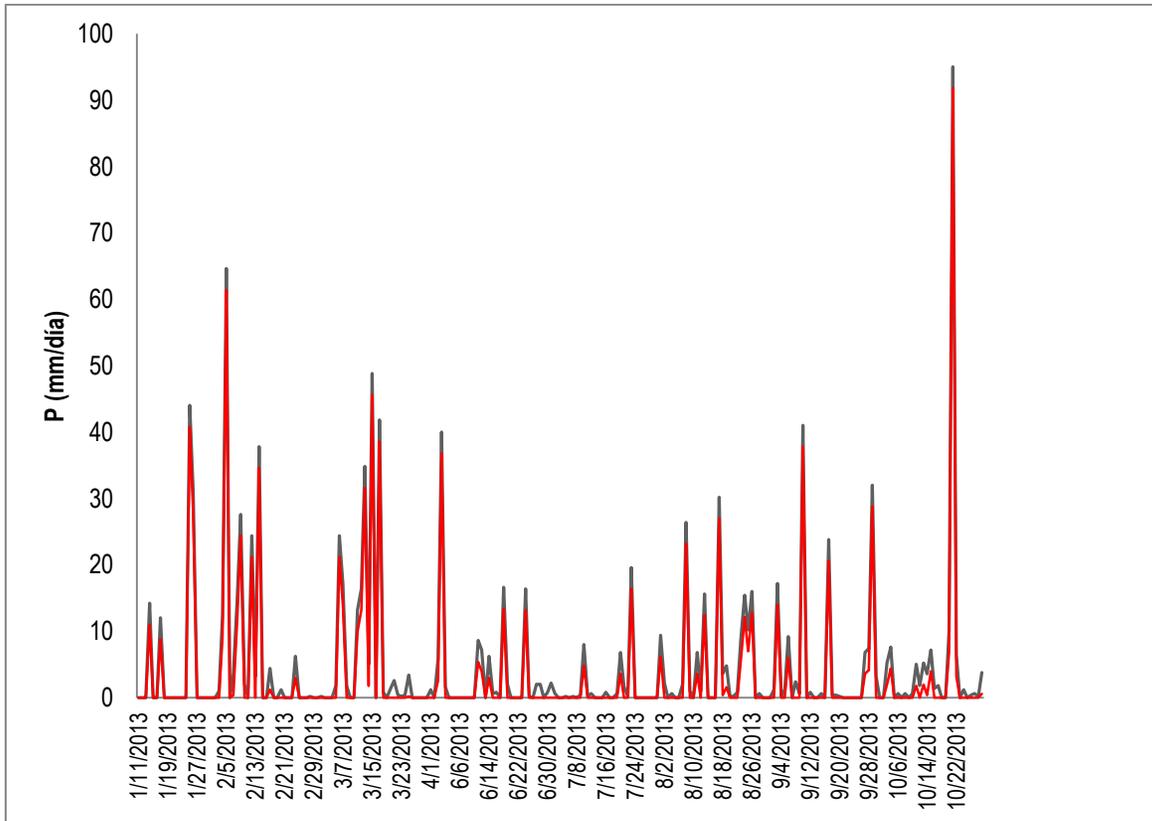


Figura 51. Precipitación vs recarga en los jardines de lluvia

### 6.2.5. Calidad del agua infiltrada

Debido a las condiciones de clima en las que se encontraba la zona de estudio, las cuales diferían de las de la zona urbana de la ciudad, la toma de muestras de calidad se tornó dificultosa, por lo que solo fue tomada una (1) muestra.

Se tomó la muestra a la entrada del jardín de lluvia, es decir después de que el agua lluvia ha escurrido por el techo y la segunda muestra fue tomada en el fondo de cada uno de los jardines, después de que el agua ha transitado por cada uno de los estratos que componen el jardín, para poder estimar si cumplen los requisitos de infiltración de las aguas subterráneas, que en este caso, serían las mismas de la entrada o una mejora de ellas.

En las figuras 52, 53 y 54 se muestra la consolidación de los resultados obtenidos en el laboratorio (Anexo 4) donde se puede observar que cada uno de los jardines de lluvia, mantiene la calidad del agua proveniente del techo o mejora la calidad en muchos de ellos.

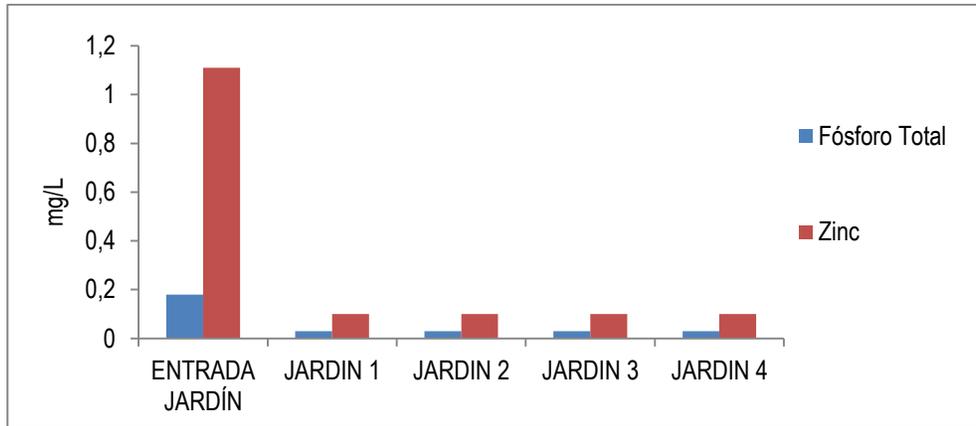


Figura 52. Resultados calidad fósforo total y zinc

En cuanto a fósforo y zinc, se obtienen resultados que coinciden con la literatura, (Hsieh y Davis, 2005) en la que se reporta que por sedimentación en las primeras capas del jardín es posible remover este tipo de contaminantes.

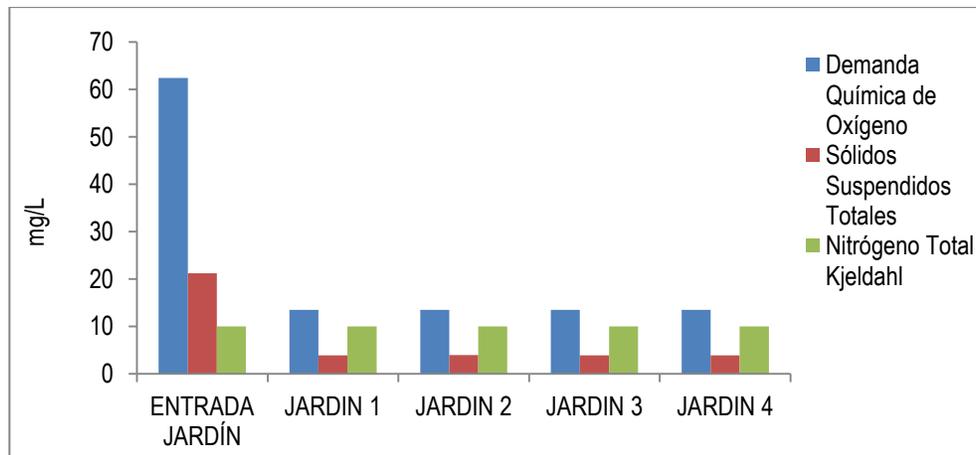


Figura 53. Resultados calidad DQO, sólidos, nitrógeno

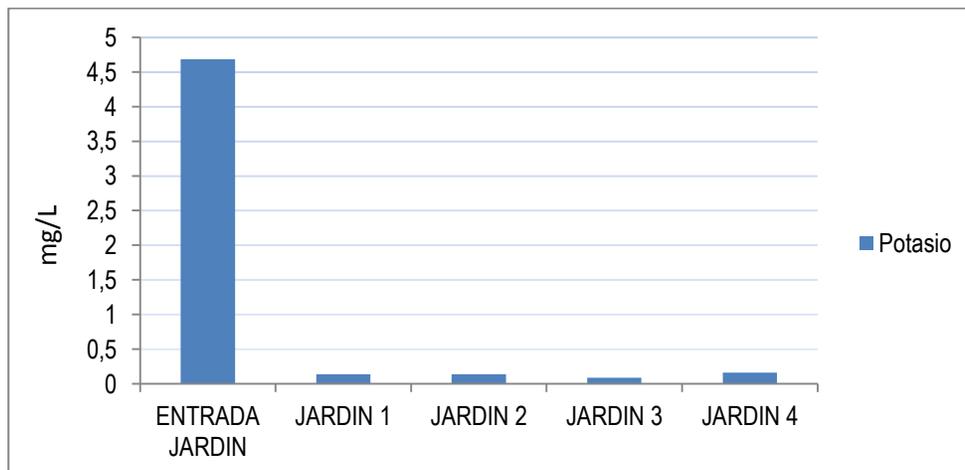


Figura 54. Resultados calidad potasio

La remoción de sólidos, DQO, potasio y nitrógeno, también coinciden con las conclusiones de varios estudios Ho et al. (1992), Kim et al. (2003) y Amado et al. (2012) en los que se presenta remoción de los contaminantes, exceptuando el nitrógeno, debido a que el medio filtrante escogido fue arena, sumado al tipo de suelo de la zona que presenta alta infiltración, por lo que no es posible la formación de una zona de saturación que permita la generación de condiciones anaeróbicas que faciliten los procesos biológicos y el intercambio de iones.

Finalmente, se puede concluir que los cuatro (4) jardines de lluvia remueven en alguna medida la contaminación, excepto en el caso del nitrógeno, sin embargo, tampoco lo incrementa, por lo que la alternativa cumple con el requisito de calidad y puede ser implementada.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El aumento de la población y la necesaria implementación de nueva infraestructura, desencadenó en una problemática relacionada con las aguas subterráneas que se recargan por precipitación directa sobre el suelo. En el municipio de Pereira, la zona de expansión occidental coincide con el área de recarga del acuífero de Pereira, lo que ha suscitado el interés por la realización del presente estudio, con el fin de buscar una alternativa que mitigue la problemática de impermeabilización del suelo y retraso o inhibición de la recarga.

Con la implementación de las densidades proyectadas, se disminuiría la recarga del acuífero, tomando como referente el peor escenario de una infiltración lenta entre 1 y 20 mm/h. de esta forma, el CN cambia de 80 a 89 disminuyendo la lámina de agua que va al acuífero y aumentando la escorrentía superficial.

Según el balance hídrico de la zona se tienen un comportamiento bimodal con dos períodos secos (junio, julio, agosto y diciembre, enero y febrero) y dos períodos húmedos (marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre), en los cuales, y debido a la recarga por precipitación directa sobre el suelo, se espera sea mayor en los meses húmedos y menor en los secos. Los fenómenos climáticos NIÑO y NIÑA alteran las condiciones de precipitación y evapotranspiración, disminuyendo y aumentando la recarga en la misma medida en que lo hace la lluvia. Por lo anterior, es necesaria la inclusión de estos eventos atípicos en la realización de cualquier modelo de recarga de agua.

En la zona, los meses de febrero y agosto cuentan con comportamientos de precipitación atípicos o demasiado alejados del comportamiento promedio de la precipitación durante la ocurrencia de períodos de sequía prolongados, mientras que los meses de julio y diciembre no son tan alterados en fenómeno NIÑO. Para períodos niña, todos los meses exceptuando abril, la precipitación es mayor al promedio modal. De lo anterior se tiene, que la mayor recarga se da en períodos húmedos no siendo durante el fenómeno de la NIÑA la mayor recarga, pues en algunos casos se supera la capacidad de infiltración del suelo.

Debido al tamaño de la zona de estudio, la pendiente y el tipo de suelo de arcilloso a franco-arcilloso, la infiltración y por ende la recarga no varían de manera importante por lo que los jardines de lluvia pueden ser implementados en toda la zona. Usando como medio filtrante arena y grava, y una infiltración básica de 20mm/h, se logra infiltrar el total de la lluvia precipitada con una intensidad de lluvia de 4 horas (por ser la máxima presentada durante el período de estudio), exceptuando días

en los que la precipitación alcanza más de 90mm. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que a la hora de construir jardines de lluvia se deben implementar relaciones de área de la zona impermeable respecto al jardín, menores que las usadas en este estudio piloto (suelo franco-arcilloso) pues entre más arcilloso sea el suelo, menor infiltración tendrá.

Los jardines de lluvia son tecnologías cuya tendencia se encuentra en aumento debido a la flexibilidad para la implementación, pues son de tamaños considerables y modernizan las estructuras urbanas actuales y futuras por el valor estético que añaden. Su aporte a la gestión integral de recursos hídricos radica en el manejo de las aguas pluviales (las cuales no tienen reconocimiento en el país) infiltrando y recargando aguas subterráneas, en una zona donde la escasez no se da por cantidad sino por calidad del recurso, y por la impermeabilización de los suelos que a su vez es ocasionada por el aumento de la población y la necesidad de urbanizar nuevas áreas.

Esta ecotecnología, mantiene las condiciones de calidad necesarias para la infiltración a los acuíferos, con remoción de contaminantes como fósforo, zinc, sólidos suspendidos totales, potasio y DQO. Sin embargo, nuevos estudios deben hacerse a largo plazo en los que se realicen más pruebas de calidad y en las que se tengan en cuenta factores como la obstrucción que pueden sufrir los jardines con el paso del tiempo.

Es necesario enfocar los estudios en el país, al análisis de la vegetación, morfología de las raíces y remoción de diversos contaminantes como hidrocarburos, grasas y aceites, pesticidas, herbicidas y nitrógeno, con el fin de mejorar los procesos en los jardines y aportar al mejoramiento de las aguas tanto superficiales como subterráneas, en zonas con vocación agrícola y de prestación de servicios.

Los jardines de lluvia bifásicos podrían ser una opción en zonas donde se pretenda mejorar la calidad del agua infiltrada, ya que estos permiten la creación de una zona anaeróbica en la que se pueden presentar mayores procesos biológicos.

Respondiendo la pregunta de investigación, los jardines de lluvia si son una alternativa adecuada para mitigar los impactos de la pavimentación en la zona de recarga, pues infiltran el agua de un área 25 veces mayor, además mejoran la calidad de la misma, la cual se puede ver alterada por los elementos de urbanización incorporados.

En cuanto a las hipótesis planteadas, no existen diferencias entre las configuraciones de jardines de lluvia implementados pues arrojaron exactamente los mismos resultados en cuanto a cantidad y calidad.

El experimento más que comparar entre un jardín y otro, sirvió para deducir que la suma de los cuatro (4) jardines aportó al objetivo de recarga y calidad del agua.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Pereira secretaria de planeación, 2006. Segunda revisión del plan de ordenamiento territorial de Pereira.

Amado L, Albuquerque A y Espirito Santo A. Influence of stormwater infiltration on the treatment capacity of a LECA-based horizontal subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering* 39: pp. 16–23

Andrew R, Anderson. 2011. Hydrologic E valuation of Established Rain Gardens in Lincoln, Nebraska Using a Storm Runoff Simulator University of Nebraska. *Environmental Engineering Theses and Graduate*. University of Nebraska-Lincoln.

Asano y Cotruvo, 2004. Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research* 38: pp 1941–1951.

Asleson B, Nestingen R, Gulliver J, Hozalski R y Nieber J. 2009. Performance assessment of rain gardens. *Journal of the American Water Resources Association*. 45: 1019-1031pp.

Aparicio, F. 1982. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editorial Limusa. México D.F. p 302.

Balek J. 1998. Groundwater recharge concepts. En: *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. Boston. Ed. Reidel.

Bannerman R, Owens D, Dodds B, y Hornewer N. 1993. Sources of pollutants in Wisconsin stormwater. *Water Science Technology* v. 28, ( 3–5): 241–259pp.

Bardales W.. ND. Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales en las cuencas de Guatemala.

Blecken Y, Zinger A, Deletic T, Fletcher M y Viklander. 2009. Impact of a submerged zone and a carbon source on heavy metal removal in stormwater biofilters. *Ecological Engineering*., 35 (5): 769–778pp.

Carrera J, Gaskin J. 2008. “Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico”. *Journal of Hydrology* 353: 228– 246pp.

Chao B, Wu Y, Li Y. 2008. Impact of artificial reservoir water impoundment. *Global sea level Science*. 320: 212-214pp.

Cho K, Song K, Cho J, Kim T, Ahn K. 2009. Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events. *Chemosphere*, 76: 690–696pp.

Chow, V.T. 1991. *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill. Bogotá.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, 2007. Plan de manejo integrado del agua subterránea en Pereira y Dosquebradas.

Craig N. 2007. Exploring biotic and social aspects of rain gardens in Dane County, Wisconsin: Madison, Wis., University of Wisconsin, Masters of Science thesis.

Custodio G.1997. Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: Custodio E.; Llamas M.R.; Samper J. (ed). La evaluación de la recarga de los acuíferos en la planificación hidrológica. Asociación Internacional de hidrogeólogos. Grupo español. Las palmas de Gran Canaria, 19-39.

Dillon P, Pavelic P, Sibenbaler X, Gerges N y Clark R. 1999. Development of New Water Resources by Aquifer Storage and Recovery Using Stormwater Runoff. *Int. Water Irrig. Rev.* 19: 2-5pp.

Davis A, Shokouhian M, Sharma H, Minami C. 2001. Laboratory study of biological retention for urban stormwater management. *Water Environmental Resources* 73: 5-14pp.

Davis A. 2005. Green engineering principles promote low-impact development. *Environmental Science and Technology* 39 (16): 338A-344App.

Davis A. 2006. Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal. *Water Environment Research* 78: 284-293pp.

Davis A. 2008. Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *Journal of Hydrologic Engineering* 13 (2): 90-95pp.

Davis A, Hunt W, Traver R y Clar M. 2009. Bioretention technology: overview of current practice and future needs. *Environmental Engineering*, 135: 109-117pp.

DiBlasi J, Li H, Davis A y Ghosh U. 2009. Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility. *Environmental Science and Technology*, 43. 494-502pp.

Dietz M. 2007. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution* 186: 351-363pp.

Dietz M y Clausen J. 2006. Saturation to improve pollutants retention in a rain garden. *Environ. Sci. Technol.* 40: 1335-1340

Dietz M y Clausen J. 2005. A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment. *Water, Air, and Soil Pollution* 167: 123-138pp.

Domínguez C y Uribe E. 2005. Evolución del servicio de acueducto y alcantarillado durante la última década. Edición electrónica. Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico - CEDE, Universidad de los Andes. Colombia.

Endreny T y Collins V. 2009. Implications of bioretention basin spatial arrangements on stormwater recharge and groundwater mounding. *Ecological Engineering*. 35: 670-677pp.

Fernández E. 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia) Ecosistemas XIV (3) Asociación española de ecología terrestre.

Fernandez E. 2009. Aprovechamiento de aguas pluviales. Universidad Politécnica de Cataluña. Facultad de Arquitectura. Barcelona.

Food and Agricultural Organization of the United Nations –FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Guía técnica Numero 56 riego y drenaje Roma.

Graf N.D. La escasez de Agua en el mundo y la importancia del Acuífero Guaraní para Sudamérica: Relación abundancia- escasez. Centro Argentino de Estudios Internacionales. Programa Recursos Naturales y Desarrollo.

Grewal P, Dick W, McCoy E, y Yang H. 2011. Biphasic bioretention system.

Guevara E. 1994. Hidrología: Una introducción a la ciencia hidrológica aplicada. Universidad de Carabobo. Venezuela.

Gurovich L. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. Instituto interamericano de Cooperación para la agricultura – IICA -. San José, Costa Rica. p433.

Hatt B, Deletic A y Fletcher T. 2007. Stormwater reuse: designing biofiltration systems for reliable treatment. *Water Science and Technology* 55 (4): 201-209pp.

Henderson C, Greenway M y Phillips I. 2007. Removal of dissolved nitrogen, phosphorous and carbon from stormwater by biofiltration mesocosms. *Water Science and Technology* 55 (4): 183-191pp.

Hoff H. 2009. Global water resources and their management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 1: 141-147pp.

House L, Waschbusch R y Hughes P. 1993. Water quality of an urban wet detention pond in Madison Wisconsin, 1987-88: U.S. Geological Survey.

Hunt W, Jarrett A, Smith J y Sharkey L. 2006. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina. *Irrigation and Drainage Engineering* 132(6):600-608.

Hsieh and Davis, 2005

Hsieh C y Davis A. 2005. Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff. *Water Science Technolgy*, 51: 177-181pp.

Instituto Colombiano De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM -. 2011. Estudio nacional del agua (ENA).

Jaramillo M y Aristizábal H. 2006. Aplicación metodológica para la estimación de la recarga potencial por precipitación en la zona centro del departamento del Valle del Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (5):39-43.

Jetten M. 2001. New pathways for ammonia conversion in soil and aquatic systems. *Plant and Soil* 230: 9-19pp.

Jiménez, H. 1992. *Hidrología Básica I*. Ed. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Kapagiannidis A, Zafiriadis I y Aivasidis A. 2012. Effect of basic operating parameters on biological phosphorus removal in a continuous-flow anaerobic-anoxic activated sludge system *Bioprocess. Biosyst. Eng.*, 35: 371-382pp.

Kazemi G. 2010. Impacts of urbanization on the groundwater resources in Shahrood, Northeastern Iran: Comparison with other Iranian and Asian cities. *Physics and Chemistry of the Earth*. 10p.

Kim H, Seagren E y Davis A. 2003. Engineered bioretention for removal of nitrate from stormwater runoff. *Water Environment Research* 75: 355-367pp.

Kipkie C, James W. 2000. Feasibility of a Permeable Pavement Option in SWMM for Long-Term Continuous Modeling. *Applied Modeling of Urban Water Systems*.

Kostiakov A. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration, *Transactions Congress International Society for Soil Science*, 6th, Moscow.

Kussow W. 1995. Soil disturbance effects on nutrient losses from Kentucky bluegrass turf. *University of Wisconsin, Wisconsin Turfgrass Research Reports*, XIII: 129-133pp.

Lasso J. 2008. Una aproximación integral al sistema de distribución de aguas residual proveniente del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residual de Cali (PTAR-C) para el sector cañero en el Valle del Cauca, Colombia. *Memorias VIII CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA (CLIA 2008)*. Managua, Nicaragua.

- Lerner D. 2012. Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology Journal*, No. 10: 143-152pp.
- Li H y Davis A. 2009. Water quality improvements through reductions of pollutant loads using bioretention. *Environmental Engineering* 135 (8): 567-576pp.
- Lin A, Spengler S y Babcock R. 1999. Use of Boron Isotope Ratio as a Tracer for Reclaimed Wastewater in a Directly Recharged Aquifer. *Proc. Water Environ. New Orleans, LA*.
- Marlin M, Ensign S y Wheeler T. 2002. Pollutant removal efficacy of three wet detention ponds. *Environmental Quality* 31 (2): 654-660pp.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT-. 2004. Resolución 865 de 2004. Metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales. Bogotá D.C.
- Monroy O. 2008. La digestión anaerobia como parte medular de la sustentabilidad. Ponencia presentada ante el XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales: La sustentabilidad en las grandes ciudades.
- Monsalve G. 1995. *Hidrología de la Ingeniería*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá.
- Monsalve G, 1999. *Hidrología en la ingeniería*, 2da edición. Editorial escuela Colombiana de ingeniería, Bogotá Colombia. pág. 25.
- Munevar A y Marino M. 1999. Modeling Analysis of Ground Water Recharge Potential on Alluvial Fans Using Limited Data. *Ground Water*. 37: 5-649.
- Muthanna T, Thorolfsson S y Viklander M. 2006. Winter hydrology in a cold climate rain garden, in American Society of Agricultural and Biological Engineers. Annual International Meeting, Portland.
- Muthanna T, Viklander M, Blecken G y Thorolfsson S. 2007. Snowmelt pollutant removal in bioretention areas. *Water Research*, 41: 4061-4072pp.
- Nortional Oceanic and Amospheric Administration -NOAA-. 2012. El Niño/Southern Oscillation (ENSO): Historical El Niño/La Niña episodes (1950 - present). [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears).
- Ouyang Y, Luo S y Cui H. 2011. Estimation of nitrogen dynamics in a vertical-flow constructed wetland. *Ecological Engineering* 37: 453-459
- Passeport E, Hunt W, Line D, Smith R y Brown R. 2009. Field study of the ability of two grassed bioretention cells to reduce storm-water runoff pollution. *Irrigation and Drainage Engineering* 135 (4): 505-510pp.

Perry T y Nawaz R. 2008. An investigation into the extent and impacts of hard surfacing of domestic gardens in an area of Leeds, United Kingdom. *Landscape and Urban Planning*. 86: 1-13pp.

Pettersson T. 1998. Water quality improvement in a small stormwater detention pond. *Water Science and Technology* 38 (10): 115–122pp.

Population Reference Bureau. 2007.

Prince George's County. 2002. Bioretention Manual Department of Environmental Resources, Landover, MD, USA.

Rain Garden Network. 2005. Local solutions for local storm-water issues. Internet: <http://www.raingardennetwork.com/>

Reyes A. 2009. Hidroclimatología. La infiltración. Notas de clase. Universidad del Valle.

Roy-Poirier A, Champagne P y Filion Y. 2010. Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Environmental Engineering* 136 (9): 878-889pp.

Saayman I y Adams S. 2002. *"The use of garden boreholes in Cape Town, South Africa: lessons learnt from Perth, Western Australia"*. *Physics and Chemistry of the Earth* 27: 961–967.

Samper F. 1997. Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos del seminario celebrado en las palmas de gran canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Sánchez L. 2008. Recarga natural, inducida y artificial en la Cuenca de México (Definiciones y Ejemplos).

Schosinsky G. 2007. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

Selbig W, Geological Survey y Balster N. 2010. Evaluation of Turf-Grass and Prairie-Vegetated Rain Gardens in a Clay and Sand Soil, Madison, Wisconsin, Water Years 2004–08. Scientific Investigations Report. University of Wisconsin.

Shuster W, Gehring R y Gerken J. 2007. Prospects for enhanced groundwater recharge via infiltration of urban storm water runoff: A case study. *Journal of Soil and Water Conservation* 62(3):129-137.

Simmons D y Reynolds R. 1982. Effects of urbanization on baseflow of selected south-shore streams, Long Island, New York. *American Water Resources Association* 18 (5): 797–805pp.

Smith R y Hunt W. 2007. Pollutant removal in bioretention cells with grass cover, in Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring our natural habitat, 11 p.

Steinke K, Stier J, Kussow W y Thompson A. 2007. Prairie and turf buffer strips for controlling runoff from paved surfaces. *Environmental Quality* 36 (2): 426–439pp.

Srivastava N y Majumder C. 2008. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *J. Hazard. Mater.*, 151 (2008), pp. 1-8

Taniguchi M, Burnet W, Cable J, Turner J. 2002. Investigation of submarine groundwater discharge. Hydrological processes. 16: 2115-2129pp.

Tornes L. 2005. Effects of Rain Gardens on the Quality of Water in the Minneapolis–St. Paul Metropolitan Area of Minnesota. Scientific Investigations Report. Mounds View, Minnesota

Trowsdale S y Simcock R. 2011. Urban stormwater treatment using bioretention. *Journal of Hydrology* 397 (3-4): 167-174pp.

U.S. Environmental Protection Agency. 1983. Results of the Nationwide Urban Runoff Program vol. 1—final report: Washington D.C., Water Planning Division: National Technical Information Service

U.S. Environmental Protection Agency. 2004. Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 1 General Considerations.

Vélez M. ND. Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Posgrado en Aprovechamiento de recursos Hidráulicos Universidad Nacional –Medellín

Vélez M y Vélez J. 2002. Infiltración. Capítulo 8: Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica.

Walsh C. 2000. Urban impacts on the ecology of receiving waters: a frame work for assessment conservation and restoration. *Hydrobiologia*, 431: 107-114pp.

Winer R. 2000. National pollutant removal performance database for stormwater treatment practices Center for Watershed Protection. 2: 224 pp.

Winogradoff D y Coffman L. 2001. The Bioretention: Manual, Department of Environmental Resources. Programs and Planning Division. Prince Georges County.

Zuleta D. 2011. Estrategia de gestión ambiental del suelo, para una zona piloto dentro del área de influencia de recarga del acuífero de Pereira en el corregimiento de Tribunales. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia

Woods-Ballard B, Martin P, Jefferies C, Bray R y Shaffer P. 2007. The SUDS Manual. CIRIA (C697), London and Dundee.

## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Tablas de precipitación media general, medias para período NIÑO y NIÑA por estaciones

#### Estación el Bosque

|                |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media General  | MIN | 62    | 46    | 77    | 200   | 194   | 119   | 48    | 22    | 106   | 78    | 147   | 42    |
|                | MED | 177.3 | 161.3 | 262.2 | 300.7 | 296.6 | 192.6 | 159.3 | 178.6 | 241.1 | 346.8 | 335.7 | 192.4 |
|                | MAX | 368   | 368   | 371   | 485   | 441   | 299   | 313   | 399   | 525   | 621   | 540   | 350   |
| Media Períodos | MIN | 65    | 63    | 103   | 200   | 194   | 120   | 48    | 22    | 106   | 78    | 147   | 42    |
|                | MED | 176.1 | 132.4 | 259.7 | 275.3 | 272.0 | 163.3 | 133.4 | 122.4 | 204.0 | 337.9 | 287.8 | 172.6 |
|                | MAX | 261   | 276   | 371   | 398   | 345   | 222   | 313   | 195   | 398   | 498   | 423   | 350   |
| Media Períodos | MIN | 131   | 46    | 128   | 212   | 206   | 133   | 133   | 163   | 179   | 322   | 278   | 125   |
|                | MED | 219.7 | 192.5 | 273.0 | 310.3 | 261.5 | 213.8 | 200.7 | 279.5 | 242.2 | 424.6 | 310.8 | 211.0 |
|                | MAX | 368   | 368   | 370   | 485   | 341   | 299   | 262   | 399   | 318   | 621   | 363   | 272   |

Fuente: Elaboración GIAS

#### Estación El Hiroshima – La Bamba

|  |          | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|--|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | MED Gen  | 128.8 | 115.9 | 187.3 | 228.9 | 249.3 | 170.5 | 116.8 | 123.1 | 191.1 | 255.9 | 243.0 | 156.7 |
|  | MED Niño | 115.9 | 104.3 | 168.6 | 206.0 | 224.4 | 153.5 | 105.1 | 110.8 | 172.0 | 230.3 | 218.7 | 141.0 |
|  | MED Niña | 141.7 | 127.5 | 206.0 | 251.8 | 274.2 | 187.6 | 128.5 | 135.4 | 210.2 | 281.5 | 267.3 | 172.4 |

Fuente: Elaboración GIAS

#### Estación Combia

|                     |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|---------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media General       | MIN | 25    | 27    | 83    | 57    | 120   | 36    | 25    | 22    | 58    | 93    | 146   | 51    |
|                     | MED | 120.0 | 111.0 | 199.7 | 209.3 | 255.3 | 168.3 | 101.1 | 124.7 | 154.2 | 244.6 | 243.1 | 139.4 |
|                     | MAX | 264   | 260   | 540   | 369   | 517   | 389   | 222   | 295   | 256.6 | 382   | 430   | 239   |
| Media Períodos Niño | MIN | 26    | 27    | 120   | 57    | 159   | 66    | 41    | 22    | 81    | 93    | 193   | 51    |
|                     | MED | 101.7 | 81.5  | 185.9 | 183.4 | 230.9 | 156.8 | 97.0  | 82.4  | 145.9 | 240.7 | 236.9 | 121.0 |
|                     | MAX | 184   | 155   | 262   | 258   | 330   | 246   | 222   | 148   | 219   | 382   | 303   | 197   |
| Media Períodos Niña | MIN | 29    | 52    | 90    | 89    | 120   | 95    | 25    | 85    | 58    | 215   | 153   | 117   |
|                     | MED | 168.7 | 132.2 | 239.5 | 197.2 | 238.0 | 202.1 | 118.6 | 176.0 | 172.7 | 250.2 | 245.5 | 147.8 |
|                     | MAX | 264   | 260   | 540   | 354   | 376   | 389   | 182   | 294   | 256.6 | 282   | 430   | 183   |

Fuente: Elaboración GIAS

#### Estación La Catalina

|                     |     | ENE   | FEB   | MAR      | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|---------------------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media General       | MIN | 21.8  | 29.8  | 88.8     | 54.2  | 130.5 | 90.4  | 69.8  | 24.6  | 69    | 45.5  | 87.9  | 109.8 |
|                     | MED | 90.7  | 124.3 | 198.0    | 191.8 | 246.0 | 183.6 | 119.4 | 106.0 | 178.7 | 202.5 | 273.0 | 179.9 |
|                     | MAX | 204.9 | 227.4 | 421.2    | 302.3 | 378.1 | 283.6 | 208.1 | 205.5 | 327.6 | 320.4 | 446.2 | 299.7 |
| Media Períodos Niño | MIN | 21.8  | 60.7  | 108      | 120.8 | 217   | 90.4  | 72.6  | 68.1  | 69.1  | 94.7  | 217.5 | 110.6 |
|                     | MED | 91.8  | 96.5  | 168.4    | 189.4 | 235.5 | 178.7 | 110.7 | 87.5  | 160.7 | 183.3 | 258.3 | 149.1 |
|                     | MAX | 204.9 | 132.7 | 229.8667 | 295.5 | 270.4 | 256.0 | 189.6 | 127   | 241   | 310.7 | 350.5 | 185.7 |

|                           |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media<br>Periodos<br>Niña | MIN | 53.6  | 29.8  | 88.8  | 162.7 | 130.5 | 127.7 | 69.8  | 93    | 125.1 | 164.4 | 195.7 | 109.8 |
|                           | MED | 94.6  | 134.5 | 169.0 | 225.5 | 205.1 | 192.6 | 147.3 | 147.9 | 208.5 | 236.4 | 301.6 | 167.9 |
|                           | MAX | 127.8 | 227.4 | 231.3 | 302.3 | 282.5 | 283.6 | 208.1 | 205.5 | 318.6 | 281.4 | 433.4 | 233.6 |

Fuente: Elaboración GIAS

Estación Planta de Tratamiento

|                           |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media<br>General          | MIN | 22.0  | 2.5   | 81.7  | 137.4 | 149.1 | 107.8 | 21.5  | 10.0  | 102.0 | 38.3  | 31.9  | 84.7  |
|                           | MED | 166.1 | 163.7 | 231.5 | 283.7 | 285.4 | 203.6 | 122.1 | 159.2 | 202.2 | 295.7 | 303.5 | 194.5 |
|                           | MAX | 353.0 | 447.6 | 491.3 | 477.5 | 497.8 | 414.0 | 242.5 | 320.3 | 360.4 | 475.6 | 445.7 | 335.2 |
| Media<br>Periodos<br>Niño | MIN | 69.8  | 32    | 109.8 | 233.7 | 150   | 109.2 | 26    | 10    | 109   | 133.9 | 179   | 84.7  |
|                           | MED | 174.0 | 122.5 | 219.2 | 263.5 | 271.5 | 200.3 | 87.6  | 122.2 | 196.7 | 252.7 | 288.6 | 186.1 |
|                           | MAX | 353   | 237.9 | 339.5 | 296   | 422.4 | 325.3 | 173   | 210   | 300.9 | 344   | 408.2 | 321   |
| Media<br>Periodos<br>Niña | MIN | 59.2  | 67.2  | 94.9  | 137.4 | 242.9 | 117.1 | 31    | 79.3  | 102   | 38.3  | 31.9  | 97.4  |
|                           | MED | 192.0 | 240.5 | 268.3 | 244.4 | 296.3 | 214.1 | 139.7 | 190.0 | 197.1 | 302.1 | 302.2 | 185.9 |
|                           | MAX | 308.3 | 447.6 | 491.3 | 373.6 | 367.9 | 414   | 242.5 | 272.8 | 291.9 | 400.1 | 390.5 | 278   |

Fuente: Elaboración GIAS

Estación San Isidro

|                           |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV    | DIC    |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Media<br>General          | MIN | 77    | 12    | 74    | 159   | 80    | 75    | 49    | 19    | 76    | 134   | 134    | 52     |
|                           | MED | 121.2 | 146.0 | 195.0 | 243.5 | 193.5 | 162.5 | 141.3 | 116.8 | 143.8 | 213.4 | 246.9  | 183.6  |
|                           | MAX | 187   | 268   | 419   | 413   | 339   | 276   | 306   | 202   | 270   | 285   | 362    | 305    |
| Media<br>Periodos<br>Niño | MIN | 5     | 12    | 58    | 87    | 92    | 21    | 3     | 15    | 58    | 68    | 106    | 51     |
|                           | MED | 81.5  | 101.5 | 176.6 | 180.0 | 181.4 | 137.4 | 128.6 | 87.5  | 126.7 | 188.0 | 217.1  | 114.9  |
|                           | MAX | 174   | 238   | 419   | 268   | 323   | 276   | 271   | 171   | 275   | 411   | 303    | 245    |
| Media<br>Periodos<br>Niña | MIN | 46    | 100   | 138   | 48    | 125   | 132   | 77    | 12    | 112   | 136   | 195    | 65     |
|                           | MED | 96    | 181.4 | 177.6 | 188   | 261.6 | 163.4 | 160.4 | 121.6 | 186.2 | 209.5 | 277.75 | 213.75 |
|                           | MAX | 137   | 330   | 233   | 231   | 350   | 197   | 306   | 202   | 282   | 245   | 362    | 305    |

Fuente: Elaboración GIAS

Estación Maracay

|                           |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media<br>General          | MIN | 22    | 18    | 55    | 64    | 30.8  | 18.5  | 10    | 20    | 70    | 57    | 151   | 59    |
|                           | MED | 113.5 | 142.9 | 192.4 | 239.8 | 204.3 | 145.8 | 135.9 | 113.2 | 163.3 | 209.4 | 247.9 | 168.7 |
|                           | MAX | 227   | 339   | 368.6 | 423   | 387   | 257   | 304   | 245   | 303   | 375   | 356   | 325   |
| Media<br>Periodos<br>Niño | MIN | 28    | 18    | 55    | 64    | 30.8  | 18.5  | 54    | 20    | 70    | 57    | 151   | 59    |
|                           | MED | 106.4 | 141.1 | 183.2 | 203.5 | 201.3 | 143.3 | 126.2 | 105.4 | 161.5 | 192.0 | 240.4 | 144.9 |
|                           | MAX | 193   | 339   | 283   | 368   | 387   | 240   | 227   | 176   | 295   | 375   | 344   | 325   |
| Media<br>Periodos<br>Niña | MIN | 22    | 108   | 126   | 144   | 117   | 73    | 10    | 32    | 81    | 161   | 161   | 73    |
|                           | MED | 123.8 | 151.5 | 187.7 | 298.0 | 204.5 | 146.3 | 127.2 | 120.7 | 160.7 | 225.7 | 253.3 | 192.5 |

|  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | MAX | 227 | 200 | 230 | 423 | 334 | 217 | 304 | 188 | 230 | 287 | 353 | 294 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Fuente: Elaboración GIAS

Estación Aeropuerto Matecaña

|                     |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|---------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media General       | MIN | 3.7   | 11.6  | 57.8  | 69.5  | 54.9  | 53    | 11.4  | 4.7   | 22    | 96.1  | 155.5 | 22.2  |
|                     | MED | 123.9 | 133.1 | 195.2 | 243.0 | 248.3 | 183.0 | 126.0 | 125.2 | 176.9 | 272.7 | 284.2 | 185.4 |
|                     | MAX | 394.8 | 389.5 | 431.5 | 508.6 | 483.8 | 391.9 | 319.4 | 293.6 | 380.6 | 496.3 | 525.8 | 418   |
| Media Períodos Niño | MIN | 3.7   | 19.9  | 80.8  | 128.3 | 64.4  | 69.7  | 11.4  | 4.7   | 72.5  | 133.3 | 155.5 | 71.3  |
|                     | MED | 112.0 | 105.1 | 191.3 | 233.1 | 229.1 | 177.7 | 116.2 | 110.5 | 175.3 | 263.3 | 248.7 | 159.3 |
|                     | MAX | 394.8 | 232.1 | 355.6 | 391.5 | 379.2 | 317.8 | 241.5 | 233   | 245   | 421   | 407.1 | 351   |
| Media Períodos Niña | MIN | 23.7  | 26.7  | 96.7  | 69.5  | 111.4 | 53    | 17    | 23.1  | 36.6  | 206   | 174.2 | 94    |
|                     | MED | 121.5 | 172.4 | 204.7 | 215.9 | 255.8 | 204.6 | 156.6 | 139.7 | 178.8 | 292.1 | 310.5 | 220.6 |
|                     | MAX | 278.8 | 357.4 | 359.9 | 420.7 | 459.2 | 391.9 | 319.4 | 252.3 | 380.6 | 454.6 | 525.8 | 418   |

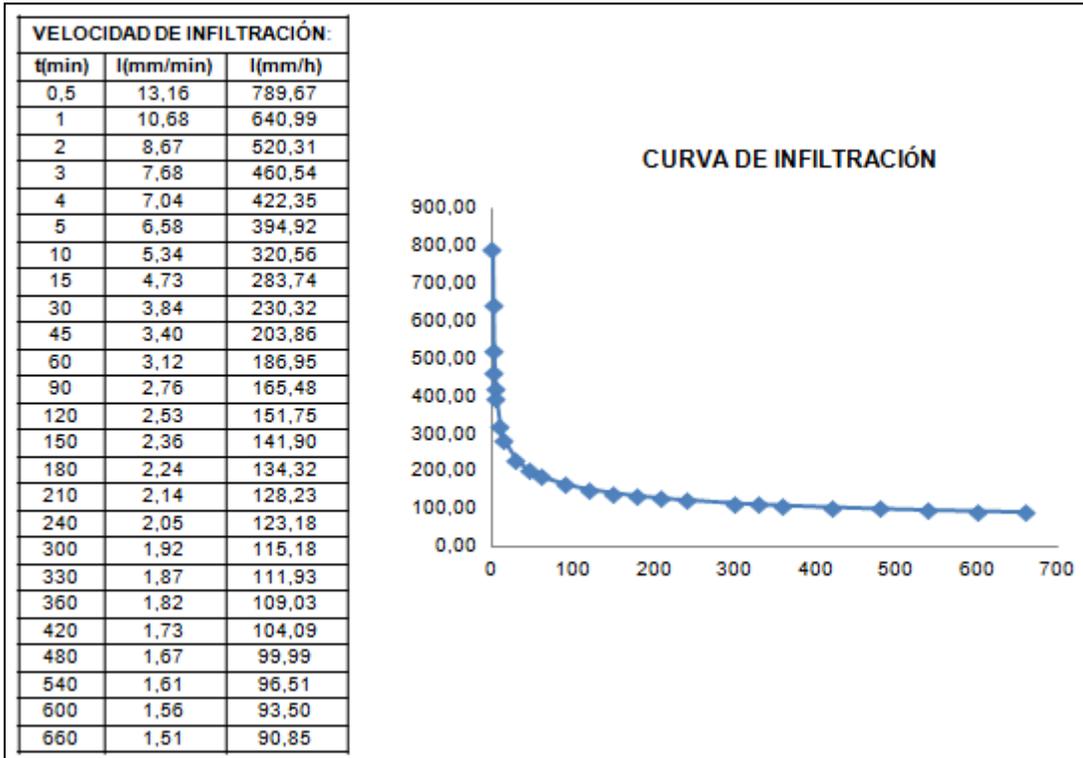
Fuente: Elaboración GIAS

Estación El Cedral

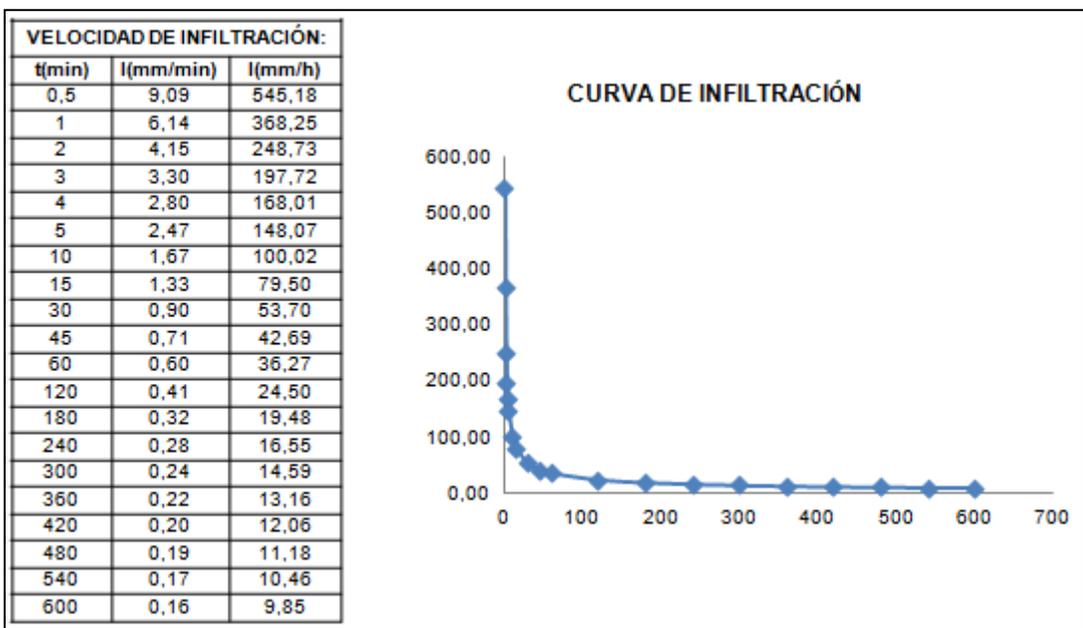
|                     |     | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|---------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media General       | MIN | 25    | 27    | 83    | 57    | 120   | 36    | 25    | 22    | 58    | 93    | 146   | 51    |
|                     | MED | 120.0 | 111.0 | 199.7 | 209.3 | 255.3 | 168.3 | 101.1 | 124.7 | 154.2 | 244.6 | 243.1 | 139.4 |
|                     | MAX | 264   | 260   | 540   | 369   | 517   | 389   | 222   | 295   | 256.6 | 382   | 430   | 239   |
| Media Períodos Niño | MIN | 26    | 27    | 120   | 57    | 159   | 66    | 41    | 22    | 81    | 93    | 193   | 51    |
|                     | MED | 101.7 | 81.5  | 185.9 | 183.4 | 230.9 | 156.8 | 97.0  | 82.4  | 145.9 | 240.7 | 236.9 | 121.0 |
|                     | MAX | 184   | 155   | 262   | 258   | 330   | 246   | 222   | 148   | 219   | 382   | 303   | 197   |
| Media Períodos Niña | MIN | 29    | 52    | 90    | 89    | 120   | 95    | 25    | 85    | 58    | 215   | 153   | 117   |
|                     | MED | 168.7 | 132.2 | 239.5 | 197.2 | 238.0 | 202.1 | 118.6 | 176.0 | 172.7 | 250.2 | 245.5 | 147.8 |
|                     | MAX | 264   | 260   | 540   | 354   | 376   | 389   | 182   | 294   | 256.6 | 282   | 430   | 183   |

Fuente: Elaboración GIAS

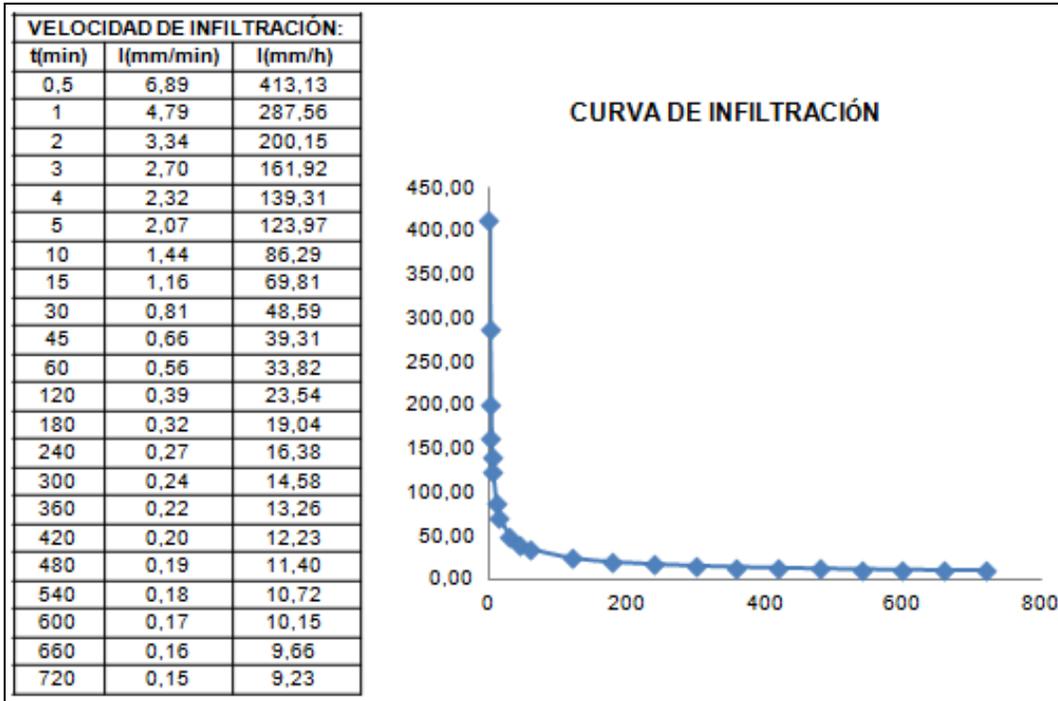
**Anexo 2.** Curvas de infiltración para cada uso del suelo.



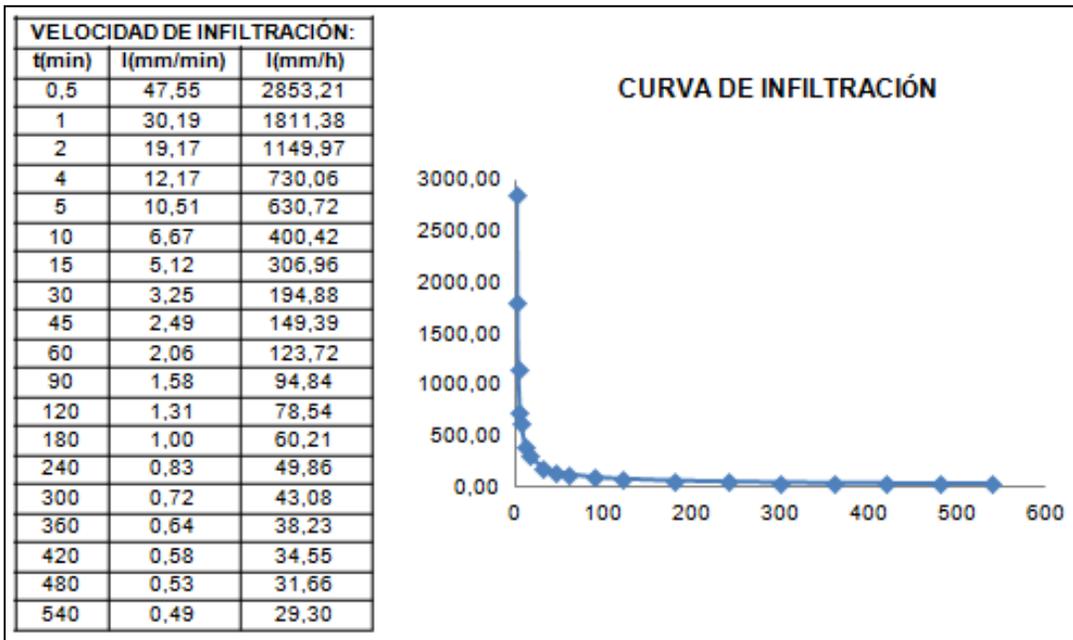
Curva de Infiltración punto 1 Guadua



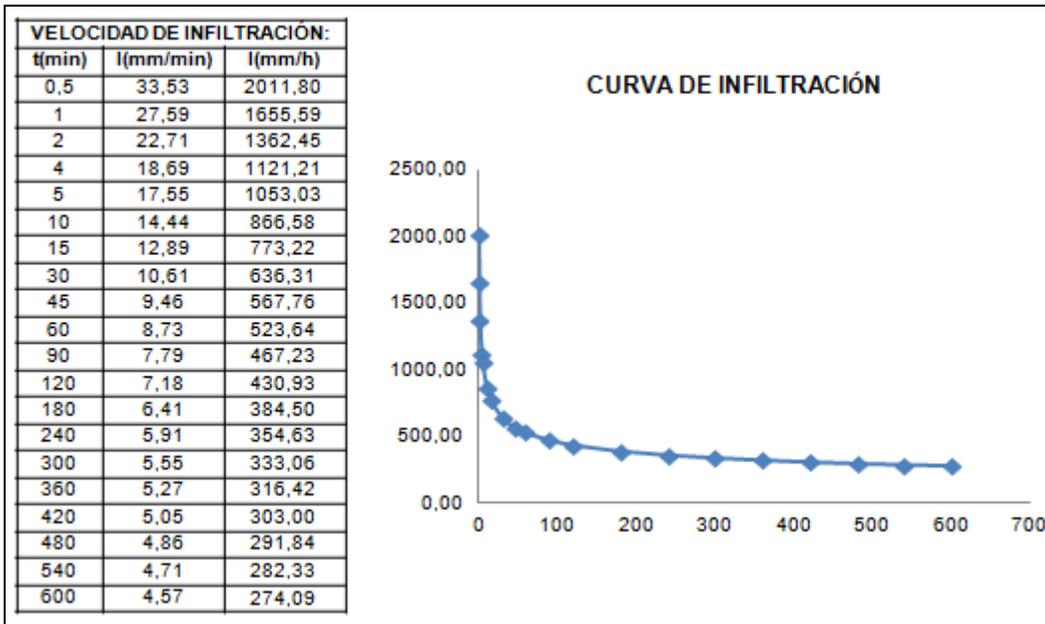
Curva de Infiltración punto 2 Guadua



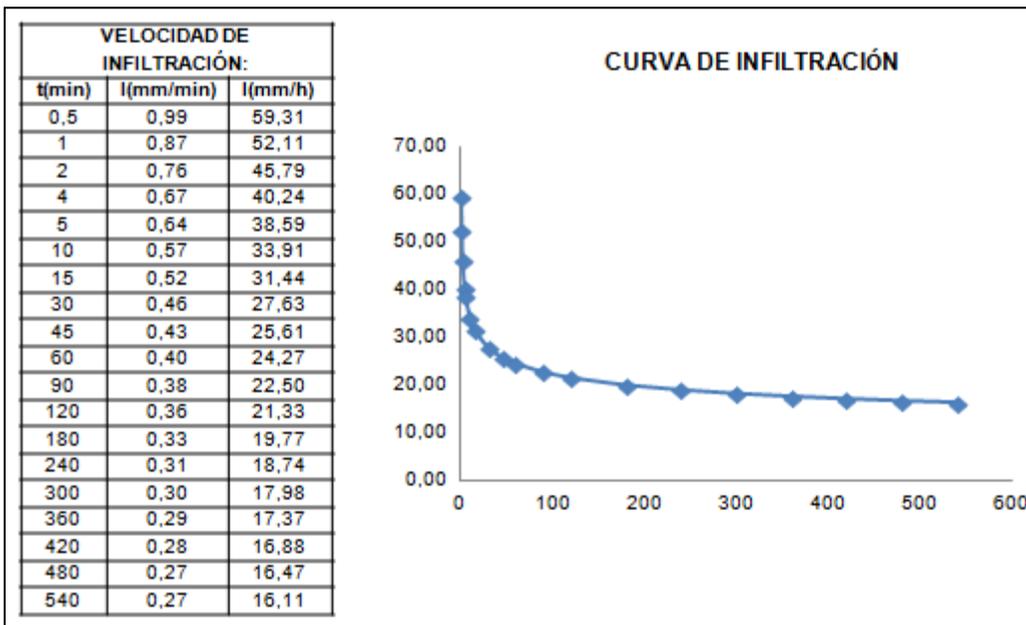
Curva de Infiltración punto 3 Guadua



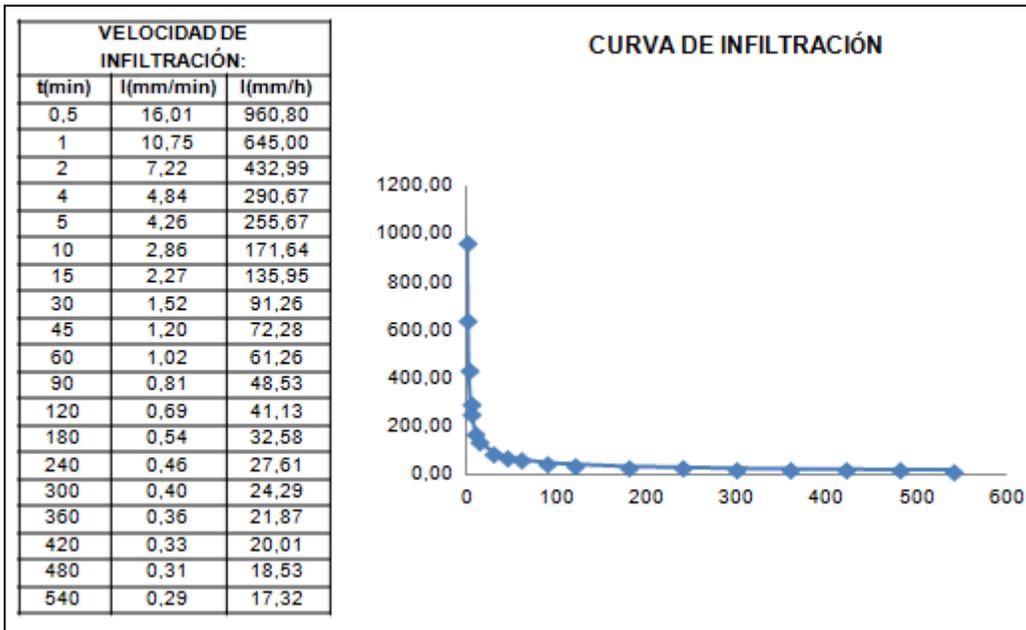
Curva de Infiltración punto 1 Yuca



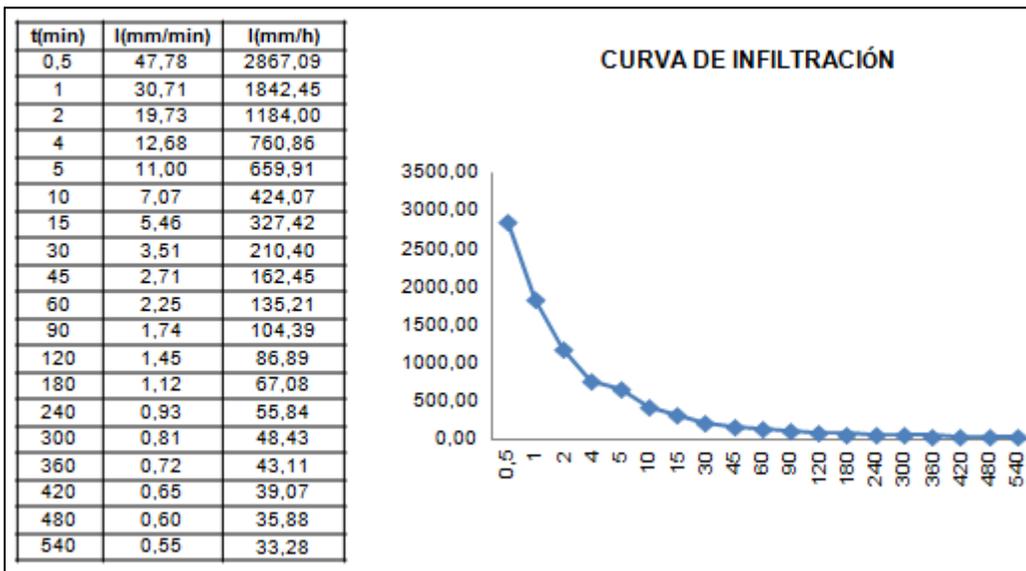
Curva de Infiltración punto 2 Yuca



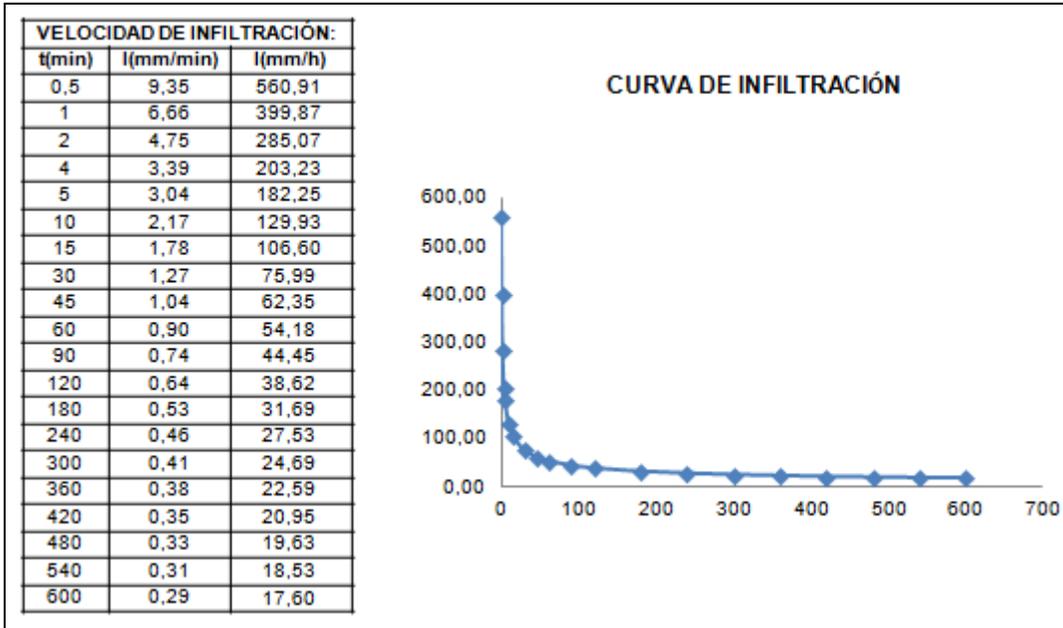
Curva de Infiltración punto 3 Yuca



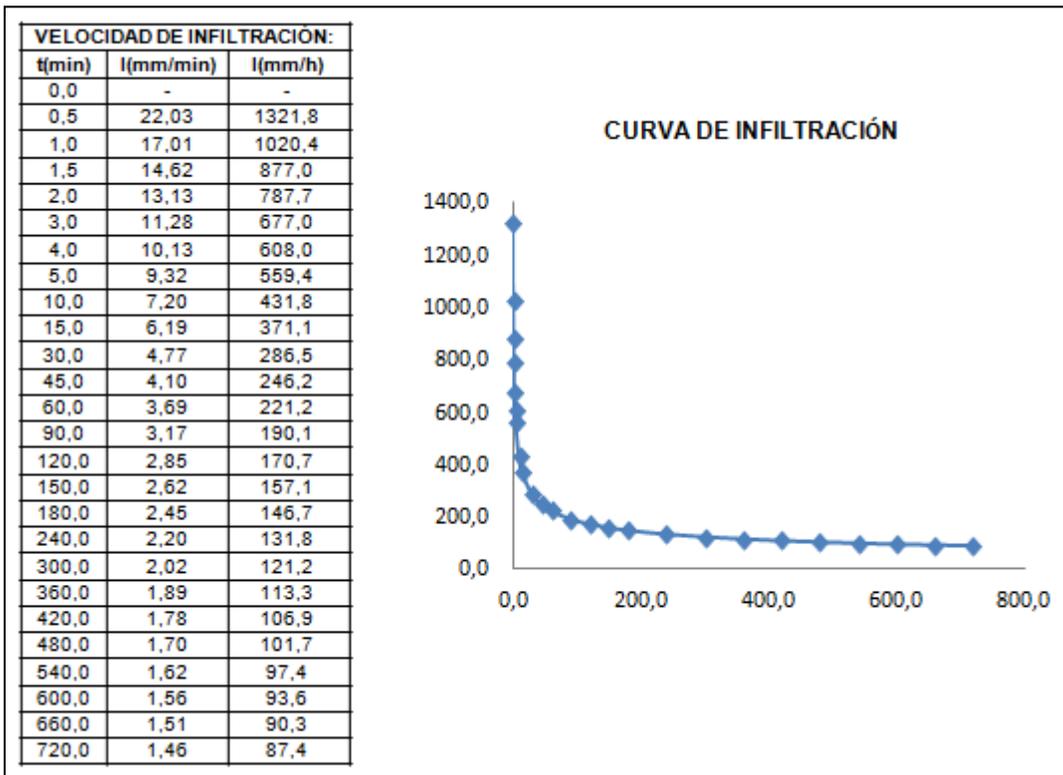
Curva de Infiltración punto 1 Pasto Manejado



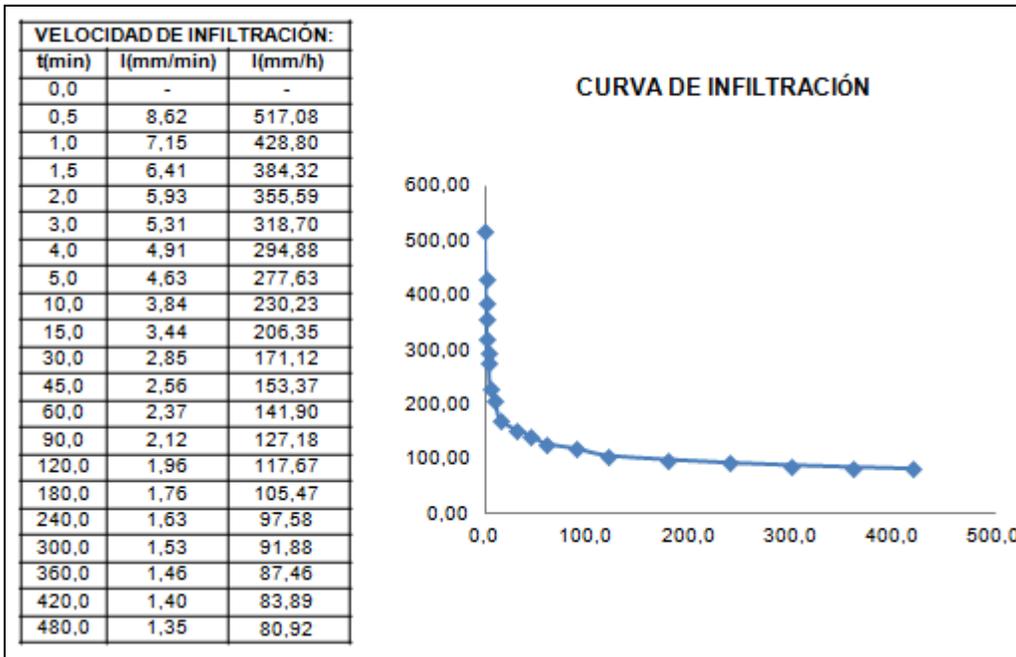
Curva de Infiltración punto 2 Pasto Manejado



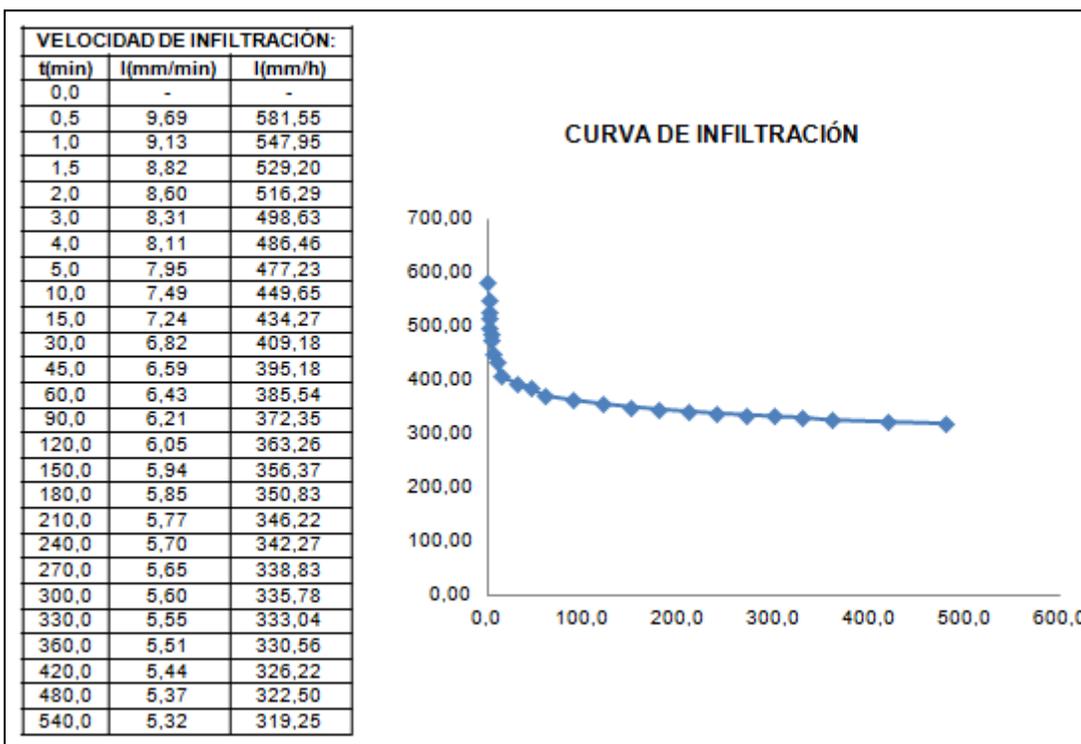
Curva de Infiltración punto 3 Pasto Manejado



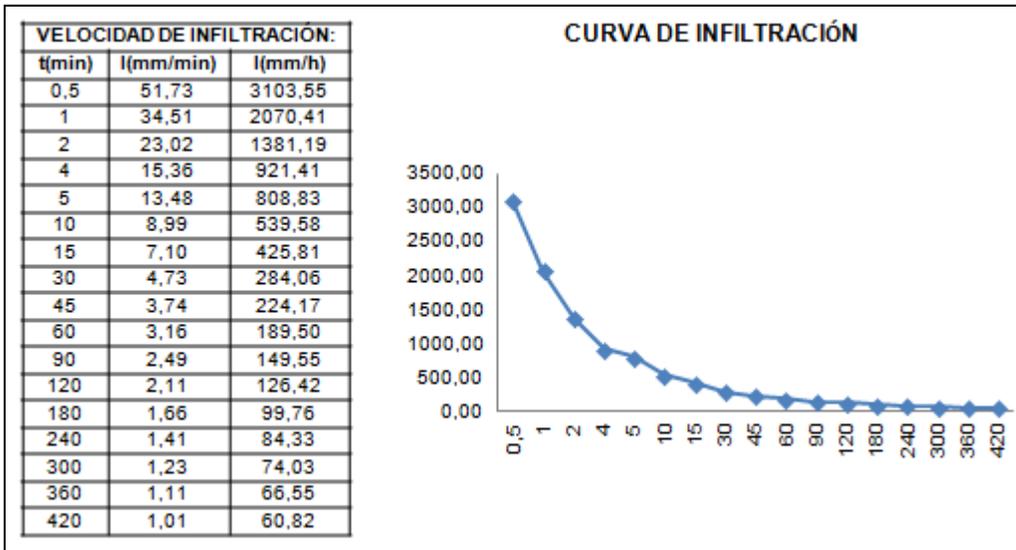
Curva de Infiltración punto 1 Café



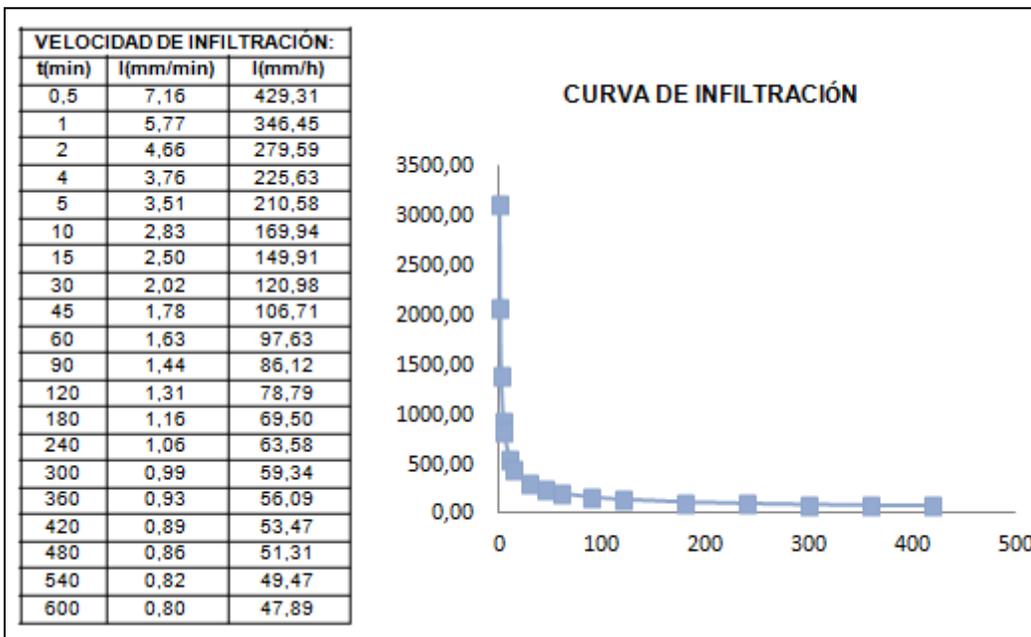
Curva de Infiltración punto 2 Café



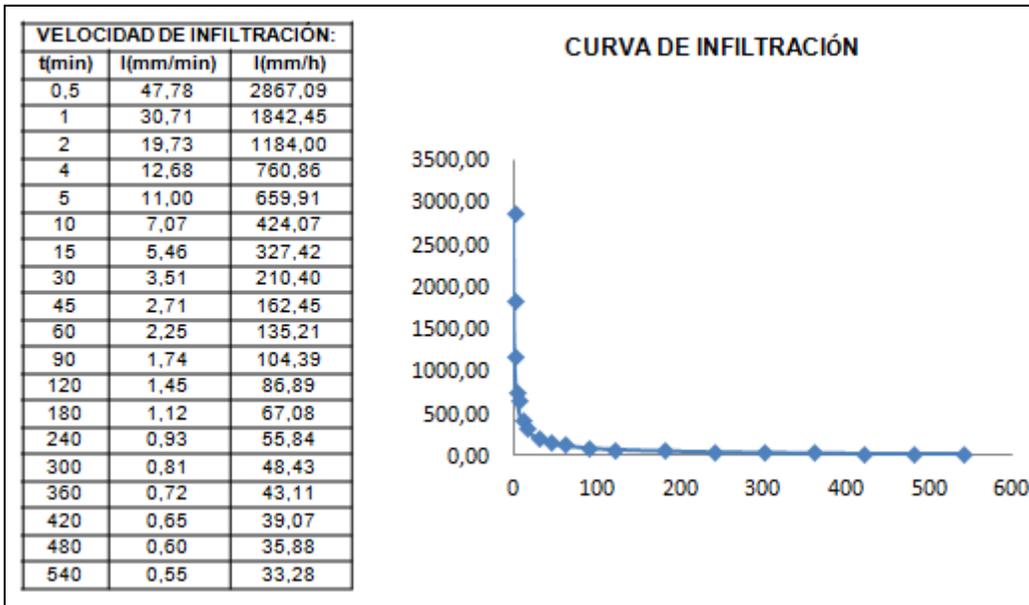
Curva de Infiltración punto 3 Café



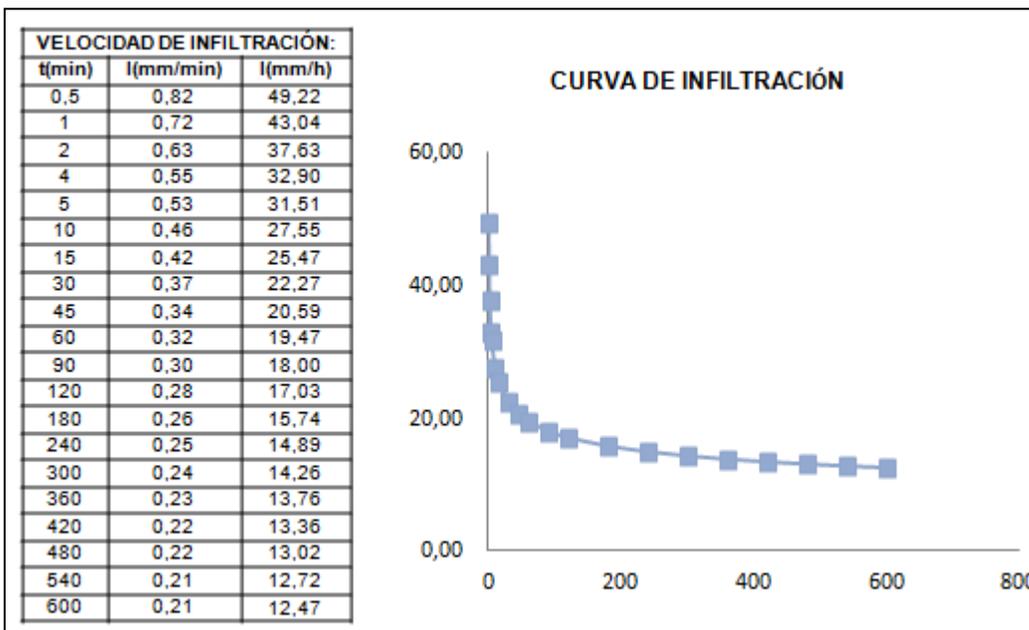
Curva de Infiltración punto 1 Cítricos



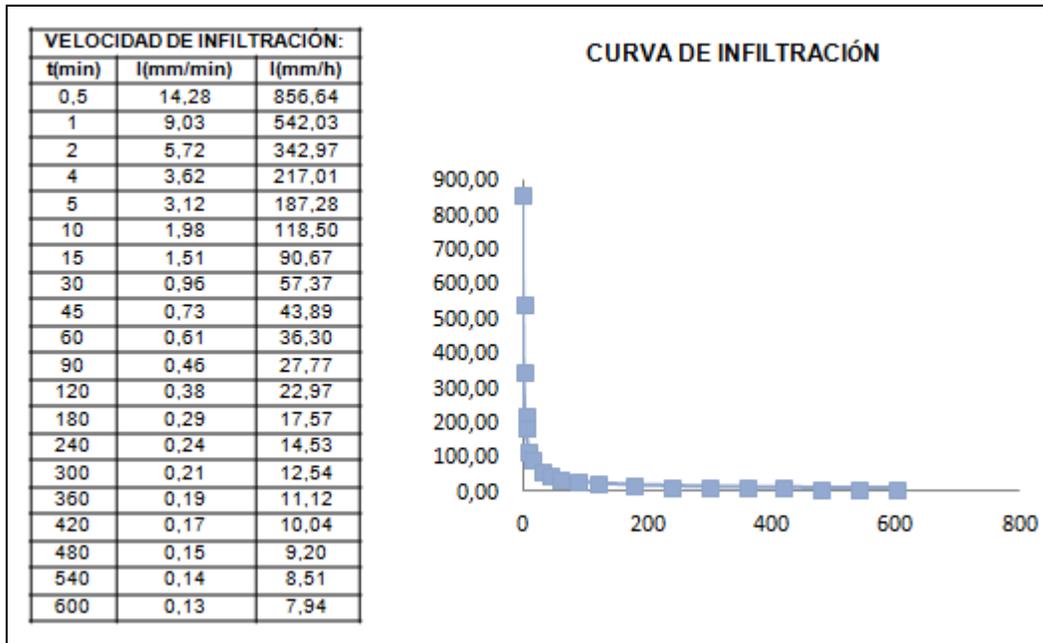
Curva de Infiltración punto 2 Cítricos



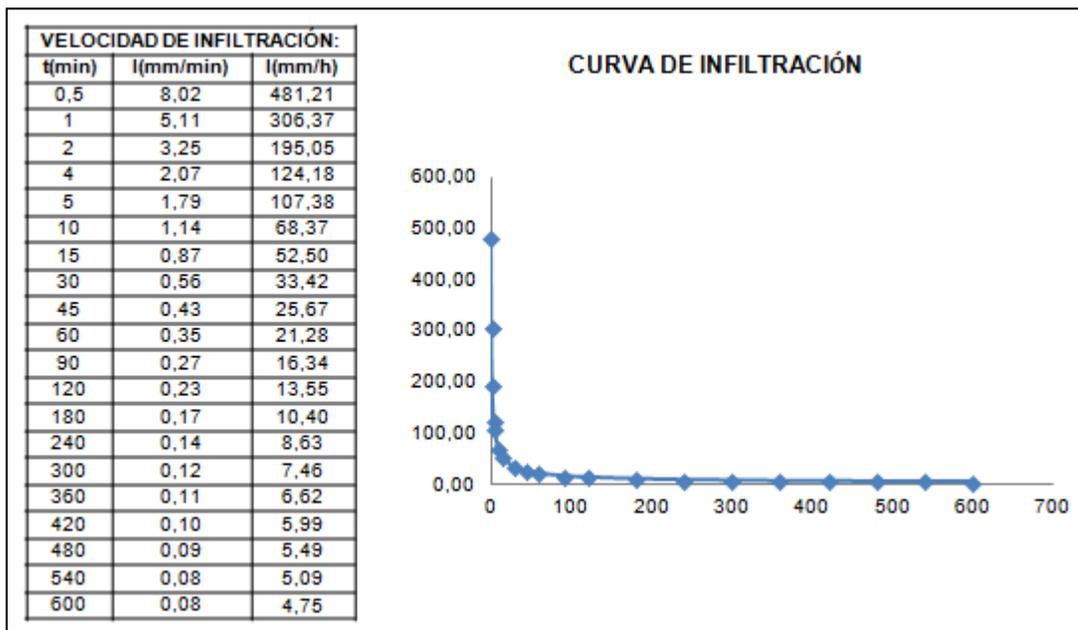
Curva de Infiltración punto 3 Cítrico



Curva de Infiltración punto 1 Piña



Curva de Infiltración punto 2 Piña



Curva de Infiltración punto 3 Piña

### CÁLCULO DE INFILTRACIÓN POTENCIAL POR USO DEL SUELO

Para realizar el cálculo de la infiltración potencial, se tomaron los datos obtenidos anteriormente hasta llegar a un valor de lámina de infiltración, para diferentes profundidades de suelo.

Después de analizar las variables en el laboratorio de relaciones de peso, se obtuvo el porcentaje de humedad para cada tipo de suelo y profundidad, que relacionado con la densidad aparente y la profundidad, nos dan la Humedad volumétrica:

$$H_{\text{volumétrica}} = \left( \frac{\% \text{ de humedad}}{100} \times \text{densidad aparente} \right) \times (\text{Profundidad})$$

Como se utilizaron tres (3) anillos, se realizó un promedio para cada profundidad de la capacidad de campo volumétrica.

Con la diferencia de la capacidad de campo volumétrica y la Humedad volumétrica se obtuvo la porción de agua que faltaría para alcanzar la capacidad de campo:

$$cc \text{ volumétrica} - H \text{ volumétrica} = \text{Lámina}$$

Después de obtener la lámina definimos ya la lámina que se espera se infiltre en cada una de las profundidades tomando varios eventos de lluvia, según la estación sinóptica principal del aeropuerto Matecaña (tomada por ser la más cercana a la zona de estudio y con datos más completos de 25 años) en 24 horas. Teniendo en cuenta también la evapotranspiración y la capacidad de campo volumétrica se obtiene la lámina infiltrada esperada en milímetros:

$$\text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} + cc \text{ volumétrica} = \text{Lámina infiltrada esperada}$$

Ya para conocer el tiempo en horas en que tardara cada una de esas láminas en infiltrarse, se toma la lámina esperada para infiltración y se divide con infiltración básica (mm/h):

$$\text{Tiempo de iniltración} = \frac{\text{lámina esperada}}{lb}$$

A continuación, se relacionan en una tabla, las láminas esperadas a infiltrar, dependiendo de cada uso del suelo y el tiempo que tardaría, para diferentes lluvias. En el anexo 2, se encuentran las tablas con los cálculos completos para cada uso.

Infiltración cultivo de Piña

| PIÑA                                  |          |            |          |            |          |            |
|---------------------------------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm) / Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|                                       | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                 | 186,4    | 3,7        | 231,3    | 4,6        | 232,4    | 4,6        |
| 110,0                                 | 172,7    | 3,5        | 217,6    | 4,4        | 218,7    | 4,4        |
| 103,4                                 | 166,1    | 3,3        | 211,0    | 4,2        | 212,1    | 4,2        |
| 103,3                                 | 166,0    | 3,3        | 210,9    | 4,2        | 212,0    | 4,2        |
| 101,3                                 | 164,0    | 3,3        | 208,9    | 4,2        | 210,0    | 4,2        |
| 100,7                                 | 163,4    | 3,3        | 208,3    | 4,2        | 209,4    | 4,2        |
| 100,4                                 | 163,1    | 3,3        | 208,0    | 4,2        | 209,1    | 4,2        |
| 95,0                                  | 157,7    | 3,2        | 202,6    | 4,1        | 203,7    | 4,1        |
| 93,0                                  | 155,7    | 3,1        | 200,6    | 4,0        | 201,7    | 4,0        |
| 92,4                                  | 155,1    | 3,1        | 200,0    | 4,0        | 201,1    | 4,0        |
| 91,0                                  | 153,7    | 3,1        | 198,6    | 4,0        | 199,7    | 4,0        |
| 90,0                                  | 152,7    | 3,1        | 197,6    | 4,0        | 198,7    | 4,0        |

Para el evento de menor precipitación presentada en la zona, se tendría una infiltración de 198,7 mm en 4 horas, en zonas con cultivo de piña (se tiene en cuenta el uso del suelo para calcular la evapotranspiración del cultivo y los requerimientos netos de irrigación), y a la máxima profundidad evaluada, en este caso 30cm. Así para cada uso.

Infiltración cultivo de Guadua

| GUADUA                                 |          |            |          |            |          |            |
|--|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm)<br>Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|  | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                  | 183,7    | 3,7        | 208,3    | 4,2        | 236,3    | 4,7        |
| 110,0                                  | 170,0    | 3,4        | 194,6    | 3,9        | 222,6    | 4,5        |
| 103,4                                  | 163,4    | 3,3        | 188,0    | 3,8        | 216,0    | 4,3        |
| 103,3                                  | 163,3    | 3,3        | 187,9    | 3,8        | 215,9    | 4,3        |
| 101,3                                  | 161,3    | 3,2        | 185,9    | 3,7        | 213,9    | 4,3        |
| 100,7                                  | 160,7    | 3,2        | 185,3    | 3,7        | 213,3    | 4,3        |
| 100,4                                  | 160,4    | 3,2        | 185,0    | 3,7        | 213,0    | 4,3        |
| 95,0                                   | 155,0    | 3,1        | 179,6    | 3,6        | 207,6    | 4,2        |
| 93,0                                   | 153,0    | 3,1        | 177,6    | 3,6        | 205,6    | 4,1        |
| 92,4                                   | 152,4    | 3,0        | 177,0    | 3,5        | 205,0    | 4,1        |
| 91,0                                   | 151,0    | 3,0        | 175,6    | 3,5        | 203,6    | 4,1        |
| 90,0                                   | 150,0    | 3,0        | 174,6    | 3,5        | 202,6    | 4,1        |

Infiltración cultivo de Café

| CAFÉ                                   |          |            |          |            |          |            |
|--|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm)<br>Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|  | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                  | 188,5    | 3,8        | 215,0    | 4,3        | 239,9    | 4,8        |
| 110,0                                  | 174,8    | 3,5        | 201,3    | 4,0        | 226,2    | 4,5        |
| 103,4                                  | 168,2    | 3,4        | 194,7    | 3,9        | 219,6    | 4,4        |
| 103,3                                  | 168,1    | 3,4        | 194,6    | 3,9        | 219,5    | 4,4        |
| 101,3                                  | 166,1    | 3,3        | 192,6    | 3,9        | 217,5    | 4,3        |
| 100,7                                  | 165,5    | 3,3        | 192,0    | 3,8        | 216,9    | 4,3        |
| 100,4                                  | 165,2    | 3,3        | 191,7    | 3,8        | 216,6    | 4,3        |
| 95,0                                   | 159,8    | 3,2        | 186,3    | 3,7        | 211,2    | 4,2        |
| 93,0                                   | 157,8    | 3,2        | 184,3    | 3,7        | 209,2    | 4,2        |
| 92,4                                   | 157,2    | 3,1        | 183,7    | 3,7        | 208,6    | 4,2        |
| 91,0                                   | 155,8    | 3,1        | 182,3    | 3,6        | 207,2    | 4,1        |
| 90,0                                   | 154,8    | 3,1        | 181,3    | 3,6        | 206,2    | 4,1        |

Infiltración cultivo de Cítricos

| CÍTRICOS                               |          |            |          |            |          |            |
|--|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm)<br>Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|  | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                  | 193,5    | 3,9        | 225,9    | 4,5        | 246,8    | 4,9        |
| 110,0                                  | 179,8    | 3,6        | 212,2    | 4,2        | 233,1    | 4,7        |
| 103,4                                  | 173,2    | 3,5        | 205,6    | 4,1        | 226,5    | 4,5        |
| 103,3                                  | 173,1    | 3,5        | 205,5    | 4,1        | 226,4    | 4,5        |
| 101,3                                  | 171,1    | 3,4        | 203,5    | 4,1        | 224,4    | 4,5        |
| 100,7                                  | 170,5    | 3,4        | 202,9    | 4,1        | 223,8    | 4,5        |
| 100,4                                  | 170,2    | 3,4        | 202,6    | 4,1        | 223,5    | 4,5        |
| 95,0                                   | 164,8    | 3,3        | 197,2    | 3,9        | 218,1    | 4,4        |
| 93,0                                   | 162,8    | 3,3        | 195,2    | 3,9        | 216,1    | 4,3        |
| 92,4                                   | 162,2    | 3,2        | 194,6    | 3,9        | 215,5    | 4,3        |
| 91,0                                   | 160,8    | 3,2        | 193,2    | 3,9        | 214,1    | 4,3        |
| 90,0                                   | 159,8    | 3,2        | 192,2    | 3,8        | 213,1    | 4,3        |

Infiltración Pasto Manejado

| PASTO MANEJADO                         |          |            |          |            |          |            |
|--|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm)<br>Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|  | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                  | 185,2    | 3,7        | 217,3    | 4,3        | 237,6    | 4,8        |
| 110,0                                  | 171,5    | 3,4        | 203,6    | 4,1        | 223,9    | 4,5        |
| 103,4                                  | 164,9    | 3,3        | 197,0    | 3,9        | 217,3    | 4,3        |
| 103,3                                  | 164,8    | 3,3        | 196,9    | 3,9        | 217,2    | 4,3        |
| 101,3                                  | 162,8    | 3,3        | 194,9    | 3,9        | 215,2    | 4,3        |
| 100,7                                  | 162,2    | 3,2        | 194,3    | 3,9        | 214,6    | 4,3        |
| 100,4                                  | 161,9    | 3,2        | 194,0    | 3,9        | 214,3    | 4,3        |
| 95,0                                   | 156,5    | 3,1        | 188,6    | 3,8        | 208,9    | 4,2        |
| 93,0                                   | 154,5    | 3,1        | 186,6    | 3,7        | 206,9    | 4,1        |
| 92,4                                   | 153,9    | 3,1        | 186,0    | 3,7        | 206,3    | 4,1        |
| 91,0                                   | 152,5    | 3,1        | 184,6    | 3,7        | 204,9    | 4,1        |
| 90,0                                   | 151,5    | 3,0        | 183,6    | 3,7        | 203,9    | 4,1        |

Infiltración cultivo de Yuca

| YUCA                                   |          |            |          |            |          |            |
|--|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm)<br>Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|  | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                  | 185,9    | 3,7        | 211,8    | 4,2        | 224,2    | 4,5        |
| 110,0                                  | 172,2    | 3,4        | 198,1    | 4,0        | 210,5    | 4,2        |
| 103,4                                  | 165,6    | 3,3        | 191,5    | 3,8        | 203,9    | 4,1        |
| 103,3                                  | 165,5    | 3,3        | 191,4    | 3,8        | 203,8    | 4,1        |
| 101,3                                  | 163,5    | 3,3        | 189,4    | 3,8        | 201,8    | 4,0        |
| 100,7                                  | 162,9    | 3,3        | 188,8    | 3,8        | 201,2    | 4,0        |
| 100,4                                  | 162,6    | 3,3        | 188,5    | 3,8        | 200,9    | 4,0        |
| 95,0                                   | 157,2    | 3,1        | 183,1    | 3,7        | 195,5    | 3,9        |
| 93,0                                   | 155,2    | 3,1        | 181,1    | 3,6        | 193,5    | 3,9        |
| 92,4                                   | 154,6    | 3,1        | 180,5    | 3,6        | 192,9    | 3,9        |
| 91,0                                   | 153,2    | 3,1        | 179,1    | 3,6        | 191,5    | 3,8        |
| 90,0                                   | 152,2    | 3,0        | 178,1    | 3,6        | 190,5    | 3,8        |

Infiltración cultivo de Caña

| CAÑA                                   |          |            |          |            |          |            |
|--|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| Precipitación (mm)<br>Profundidad (cm) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) | Lám (mm) | Tiempo (h) |
|  | 10       |            | 15       |            | 30       |            |
| 123,7                                  | 188,0    | 3,8        | 213,4    | 4,3        | 237,8    | 4,8        |
| 110,0                                  | 174,3    | 3,5        | 199,7    | 4,0        | 224,1    | 4,5        |
| 103,4                                  | 167,7    | 3,4        | 193,1    | 3,9        | 217,5    | 4,3        |
| 103,3                                  | 167,6    | 3,4        | 193,0    | 3,9        | 217,4    | 4,3        |
| 101,3                                  | 165,6    | 3,3        | 191,0    | 3,8        | 215,4    | 4,3        |
| 100,7                                  | 165,0    | 3,3        | 190,4    | 3,8        | 214,8    | 4,3        |
| 100,4                                  | 164,7    | 3,3        | 190,1    | 3,8        | 214,5    | 4,3        |
| 95,0                                   | 159,3    | 3,2        | 184,7    | 3,7        | 209,1    | 4,2        |
| 93,0                                   | 157,3    | 3,1        | 182,7    | 3,7        | 207,1    | 4,1        |
| 92,4                                   | 156,7    | 3,1        | 182,1    | 3,6        | 206,5    | 4,1        |
| 91,0                                   | 155,3    | 3,1        | 180,7    | 3,6        | 205,1    | 4,1        |
| 90,0                                   | 154,3    | 3,1        | 179,7    | 3,6        | 204,1    | 4,1        |

Anexo 3. Propiedades físicas de los suelos

PORCENTAJE DE HUMEDAD

| USO DEL SUELO: PIÑA                      |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
|--|-------------|-----------|-----------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-------------------|-------------|-----------|-----------|
| INFILTROMETRO 1                          |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                        | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |
| 5-10                                     | 233         | 200       | 17        | 5-10              | 265         | 232       | 14        | 5-10              | 235         | 205       | 15        |
| 10-15                                    | 211         | 176       | 20        | 10-15             | 219         | 185       | 18        | 10-15             | 207         | 180       | 15        |
| 15-30                                    | 221         | 188       | 18        | 15-30             | 255         | 221       | 15        | 15-30             | 228         | 194       | 18        |
| Humedad inicial                          | 231         | 198       | 17        | Humedad inicial   | 236         | 203       | 16        | Humedad inicial   | 196         | 171       | 15        |
| USO DEL SUELO: GUADUA                    |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| INFILTROMETRO 1                          |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                        | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |
| 5-10                                     | 178         | 154       | 97        | 5-10              | 202         | 184       | 10        | 5-10              | 208         | 168       | 24        |
| 10-15                                    | 211         | 172       | 105       | 10-15             | 232         | 199       | 17        | 10-15             | 225         | 189       | 19        |
| 15-30                                    | 203         | 174       | 98        | 15-30             | 220         | 186       | 18        | 15-30             | 236         | 186       | 27        |
| Humedad Inicial                          | 225         | 194       | 16        | Humedad Inicial   | 189         | 162       | 17        | Humedad Inicial   | 242         | 193       | 25        |
| USO DEL SUELO: CAFÉ                      |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| INFILTROMETRO 1                          |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                        | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |
| 5-10                                     | 204         | 170       | 20        | 5-10              | 217         | 184       | 18        | 5-10              | 226         | 190       | 19        |
| 10-15                                    | 223         | 187       | 19        | 10-15             | 210         | 177       | 19        | 10-15             | 255         | 213       | 20        |
| 15-30                                    | 211         | 177       | 19        | 15-30             | 215         | 179       | 20        | 15-30             | 228         | 186       | 23        |
| Humedad Inicial                          | 246         | 208       | 18        | Humedad Inicial   | 244         | 214       | 14        | Humedad Inicial   | 198         | 168       | 18        |
| USO DEL SUELO: CITRICOS                  |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| INFILTROMETRO 1                          |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                        | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |

| 5-10  | 238         | 208       | 14        | 5-10              | 227         | 194       | 17        | 5-10              | 243         | 204       | 19        |
|---|-------------|-----------|-----------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-------------------|-------------|-----------|-----------|
| 10-15   | 230         | 198       | 16        | 10-15             | 230         | 200       | 15        | 10-15             | 247         | 212       | 17        |
| 15-30   | 227         | 193       | 18        | 15-30             | 186         | 162       | 15        | 15-30             | 218         | 191       | 14        |
| Humedad Inicial                                 | 250         | 218       | 15        | Humedad Inicial   | 232         | 212       | 9         | Humedad Inicial   | 232         | 203       | 14        |
| <b>USO DEL SUELO: PASTO MANEJADO</b>            |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| INFILTROMETRO 1                                 |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| <b>DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA</b> |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                               | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |
| 5-10  | 196         | 170       | 15        | 5-10              | 209         | 190       | 10        | 5-10              | 216         | 197       | 10        |
| 10-15   | 215         | 193       | 11        | 10-15             | 207         | 190       | 9         | 10-15             | 202         | 183       | 10        |
| 15-30   | 205         | 178       | 15        | 15-30             | 218         | 204       | 7         | 15-30             | 208         | 191       | 9         |
| Humedad Inicial                                 | 219         | 177       | 24        | Humedad Inicial   | 229         | 207       | 11        | Humedad Inicial   | 198         | 178       | 11        |
|   |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| <b>USO DEL SUELO: YUCA</b>                      |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| INFILTROMETRO 1                                 |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| <b>DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA</b> |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                               | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |
| 5-10  | 178         | 156       | 14        | 5-10              | 226         | 181       | 25        | 5-10              | 203         | 189       | 7         |
| 10-15   | 186         | 157       | 18        | 10-15             | 216         | 170       | 27        | 10-15             | 222         | 175       | 27        |
| 15-30   | 179         | 162       | 10        | 15-30             | 228         | 198       | 15        | 15-30             | 227         | 191       | 19        |
| Humedad Inicial                                 | 198         | 181       | 9         | Humedad Inicial   | 246         | 200       | 23        | Humedad Inicial   | 214         | 167       | 28        |
|   |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| <b>USO DEL SUELO: CAÑA</b>                      |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| INFILTROMETRO 1                                 |             |           |           | INFILTROMETRO 2   |             |           |           | INFILTROMETRO 3   |             |           |           |
| <b>DATOS PORCENTAJE DE HUMEDAD GRAVIMETRICA</b> |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |
| Profundidad en cm                               | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad | Profundidad en cm | Peso Húmedo | Peso Seco | % Humedad |
| 5-10  | 178         | 150       | 19        | 5-10              | 209         | 200       | 5         | 5-10              | 198         | 185       | 7         |
| 10-15   | 198         | 171       | 16        | 10-15             | 206         | 196       | 5         | 10-15             | 215         | 200       | 8         |
| 15-30   | 201         | 187       | 7         | 15-30             | 218         | 210       | 4         | 15-30             | 223         | 206       | 8         |
| Humedad Inicial                                 | 203         | 187       | 9         | Humedad Inicial   | 221         | 207       | 7         | Humedad Inicial   | 211         | 192       | 10        |
|   |             |           |           |                   |             |           |           |                   |             |           |           |

### DENSIDAD APARENTE

| USO DEL SUELO: PIÑA           |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| INFILTROMETRO 1               |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
| Densidad Aparente             |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| Profundidad en cm             | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                           | 198       | 2,02                    | 0-5               | 203       | 2,07                    | 0-5               | 171       | 1,74                    |
| 5-10                          | 200       | 2,04                    | 5-10              | 232       | 2,36                    | 5-10              | 205       | 2,09                    |
| 10-15                         | 176       | 1,79                    | 10-15             | 185       | 1,88                    | 10-15             | 180       | 1,83                    |
| 15-30                         | 188       | 1,91                    | 15-30             | 221       | 2,25                    | 15-30             | 194       | 1,98                    |
| USO DEL SUELO: GUADUA         |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| INFILTROMETRO 1               |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
| Densidad Aparente             |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| Profundidad en cm             | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                           | 194       | 1,98                    | 0-5               | 162       | 1,65                    | 0-5               | 193       | 1,97                    |
| 5-10                          | 154       | 1,57                    | 5-10              | 184       | 1,87                    | 5-10              | 168       | 1,71                    |
| 10-15                         | 172       | 1,75                    | 10-15             | 199       | 2,03                    | 10-15             | 189       | 1,92                    |
| 15-30                         | 174       | 1,77                    | 15-30             | 186       | 1,89                    | 15-30             | 186       | 1,89                    |
| USO DEL SUELO: CAFÉ           |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| INFILTROMETRO 1               |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
| Densidad Aparente             |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| Profundidad en cm             | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                           | 208       | 2,12                    | 0-5               | 214       | 2,18                    | 0-5               | 168       | 1,71                    |
| 5-10                          | 170       | 1,73                    | 5-10              | 184       | 1,87                    | 5-10              | 190       | 1,93                    |
| 10-15                         | 187       | 1,90                    | 10-15             | 177       | 1,80                    | 10-15             | 213       | 2,17                    |
| 15-30                         | 177       | 1,80                    | 15-30             | 179       | 1,82                    | 15-30             | 186       | 1,89                    |
| USO DEL SUELO: CÍTRICOS       |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| INFILTROMETRO 1               |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
| Densidad Aparente             |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| Profundidad en cm             | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                           | 218       | 2,22                    | 0-5               | 212       | 2,16                    | 0-5               | 203       | 2,07                    |
| 5-10                          | 208       | 2,12                    | 5-10              | 194       | 1,98                    | 5-10              | 204       | 2,08                    |
| 10-15                         | 198       | 2,02                    | 10-15             | 200       | 2,04                    | 10-15             | 212       | 2,16                    |
| 15-30                         | 193       | 1,97                    | 15-30             | 162       | 1,65                    | 15-30             | 191       | 1,95                    |
| USO DEL SUELO: PASTO MANEJADO |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| INFILTROMETRO 1               |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
| Densidad Aparente             |           |                         | Densidad Aparente |           |                         | Densidad Aparente |           |                         |
| Profundidad en cm             | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                           | 177       | 1,80                    | 0-5               | 207       | 2,11                    | 0-5               | 178       | 1,81                    |
| 5-10                          | 170       | 1,73                    | 5-10              | 190       | 1,93                    | 5-10              | 197       | 2,01                    |
| 10-15                         | 193       | 1,97                    | 10-15             | 190       | 1,93                    | 10-15             | 183       | 1,86                    |
| 15-30                         | 178       | 1,81                    | 15-30             | 204       | 2,08                    | 15-30             | 191       | 1,95                    |
| USO DEL SUELO: YUCA           |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |

| INFILTROMETRO 1     |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
|---------------------|-----------|-------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|
| Densidad Aparente   |           |                         | Densidad Aparente |           |                         | Densidad Aparente |           |                         |
| Profundidad en cm   | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                 | 181       | 1,84                    | 0-5               | 200       | 2,04                    | 0-5               | 187       | 1,90                    |
| 5-10                | 156       | 1,59                    | 5-10              | 181       | 1,84                    | 5-10              | 189       | 1,92                    |
| 10-15               | 157       | 1,60                    | 10-15             | 170       | 1,73                    | 10-15             | 175       | 1,78                    |
| 15-30               | 162       | 1,65                    | 15-30             | 198       | 2,02                    | 15-30             | 191       | 1,95                    |
| USO DEL SUELO: CAÑA |           |                         |                   |           |                         |                   |           |                         |
| INFILTROMETRO 1     |           |                         | INFILTROMETRO 2   |           |                         | INFILTROMETRO 3   |           |                         |
| Densidad Aparente   |           |                         | Densidad Aparente |           |                         | Densidad Aparente |           |                         |
| Profundidad en cm   | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | Profundidad en cm | Peso Seco | Da (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0-5                 | 187       | 1,90                    | 0-5               | 207       | 2,11                    | 0-5               | 192       | 1,96                    |
| 5-10                | 150       | 1,53                    | 5-10              | 200       | 2,04                    | 5-10              | 185       | 1,88                    |
| 10-15               | 171       | 1,74                    | 10-15             | 196       | 2,00                    | 10-15             | 200       | 2,04                    |
| 15-30               | 187       | 1,90                    | 15-30             | 210       | 2,14                    | 15-30             | 206       | 2,10                    |

### POROSIDAD

| USO DEL SUELO: PIÑA   |                         |               |                   |                         |               |                 |                         |               |
|-----------------------|-------------------------|---------------|-------------------|-------------------------|---------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| INFILTROMETRO 1       |                         |               | INFILTROMETRO 2   |                         |               | INFILTROMETRO 3 |                         |               |
| Porosidad Total       |                         |               |                   |                         |               |                 |                         |               |
| Prof en cm            | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total | Profundidad en cm | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total | Prof en cm      | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total |
| 0-5                   | 0,61                    | 76,94         | 0-5               | 0,46                    | 82,71         | 0-5             | 0,53                    | 80,02         |
| 5-10                  | 0,69                    | 73,87         | 5-10              | 0,58                    | 78,10         | 5-10            | 0,62                    | 76,56         |
| 10-15                 | 0,65                    | 75,41         | 10-15             | 0,60                    | 77,33         | 10-15           | 0,53                    | 80,02         |
| 15-30                 | 0,67                    | 74,64         | 15-30             | 0,71                    | 73,10         | 15-30           | 0,55                    | 79,25         |
| USO DEL SUELO: GUADUA |                         |               |                   |                         |               |                 |                         |               |
| INFILTROMETRO 1       |                         |               | INFILTROMETRO 2   |                         |               | INFILTROMETRO 3 |                         |               |
| Porosidad Total       |                         |               |                   |                         |               |                 |                         |               |
| Prof en cm            | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total | Profundidad en cm | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total | Prof en cm      | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total |
| 0-5                   | 0,59                    | 77,71         | 0-5               | 0,58                    | 78,10         | 0-5             | 0,59                    | 77,71         |
| 5-10                  | 0,60                    | 77,33         | 5-10              | 0,66                    | 75,02         | 5-10            | 0,75                    | 71,56         |
| 10-15                 | 0,59                    | 77,71         | 10-15             | 0,57                    | 78,48         | 10-15           | 0,75                    | 71,56         |
| 15-30                 | 0,65                    | 75,41         | 15-30             | 0,62                    | 76,56         | 15-30           | 0,69                    | 73,87         |
| USO DEL SUELO: CAFÉ   |                         |               |                   |                         |               |                 |                         |               |
| INFILTROMETRO 1       |                         |               | INFILTROMETRO 2   |                         |               | INFILTROMETRO 3 |                         |               |
| Porosidad Total       |                         |               |                   |                         |               |                 |                         |               |
| Prof en cm            | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total | Profundidad en cm | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total | Prof en cm      | Da (g/cm <sup>3</sup> ) | % Poros Total |
| 0-5                   | 0,48                    | 81,94         | 0-5               | 0,51                    | 80,79         | 0-5             | 0,54                    | 79,63         |
| 5-10                  | 0,60                    | 77,33         | 5-10              | 0,71                    | 73,10         | 5-10            | 0,56                    | 78,86         |

|                                      |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| 10-15                                | 0,56                         | 78,86                | 10-15                    | 0,61                         | 76,94                | 10-15             | 0,58                         | 78,10                |
| 15-30                                | 0,53                         | 80,02                | 15-30                    | 0,50                         | 81,17                | 15-30             | 0,57                         | 78,48                |
| <b>USO DEL SUELO: CÍTRICOS</b>       |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| INFILTROMETRO 1                      |                              |                      | INFILTROMETRO 2          |                              |                      | INFILTROMETRO 3   |                              |                      |
| <b>Porosidad Total</b>               |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| <b>Prof en cm</b>                    | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Profundidad en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Prof en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> |
| 0-5                                  | 0,51                         | 80,79                | 0-5                      | 0,49                         | 81,55                | 0-5               | 0,51                         | 80,79                |
| 5-10                                 | 0,58                         | 78,10                | 5-10                     | 0,45                         | 83,09                | 5-10              | 0,55                         | 79,25                |
| 10-15                                | 0,45                         | 83,09                | 10-15                    | 0,51                         | 80,79                | 10-15             | 0,60                         | 77,33                |
| 15-30                                | 0,40                         | 85,01                | 15-30                    | 0,58                         | 78,10                | 15-30             | 0,59                         | 77,71                |
| <b>USO DEL SUELO: PASTO MANEJADO</b> |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| INFILTROMETRO 1                      |                              |                      | INFILTROMETRO 2          |                              |                      | INFILTROMETRO 3   |                              |                      |
| <b>Porosidad Total</b>               |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| <b>Prof en cm</b>                    | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Profundidad en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Prof en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> |
| 0-5                                  | 0,56                         | 78,86                | 0-5                      | 0,61                         | 76,94                | 0-5               | 0,54                         | 79,63                |
| 5-10                                 | 0,54                         | 79,63                | 5-10                     | 0,55                         | 79,25                | 5-10              | 0,59                         | 77,71                |
| 10-15                                | 0,55                         | 79,25                | 10-15                    | 0,58                         | 78,10                | 10-15             | 0,59                         | 77,71                |
| 15-30                                | 0,55                         | 79,25                | 15-30                    | 0,51                         | 80,79                | 15-30             | 0,65                         | 75,41                |
| <b>USO DEL SUELO: YUCA</b>           |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| INFILTROMETRO 1                      |                              |                      | INFILTROMETRO 2          |                              |                      | INFILTROMETRO 3   |                              |                      |
| <b>Porosidad Total</b>               |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| <b>Prof en cm</b>                    | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Profundidad en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Prof en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> |
| 0-5                                  | 0,53                         | 80,02                | 0-5                      | 0,45                         | 83,09                | 0-5               | 0,65                         | 75,41                |
| 5-10                                 | 0,51                         | 80,79                | 5-10                     | 0,57                         | 78,48                | 5-10              | 0,63                         | 76,17                |
| 10-15                                | 0,57                         | 78,48                | 10-15                    | 0,56                         | 78,86                | 10-15             | 0,61                         | 76,94                |
| 15-30                                | 0,66                         | 75,02                | 15-30                    | 0,63                         | 76,17                | 15-30             | 0,62                         | 76,56                |
| <b>USO DEL SUELO: CAÑA</b>           |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| INFILTROMETRO 1                      |                              |                      | INFILTROMETRO 2          |                              |                      | INFILTROMETRO 3   |                              |                      |
| <b>Porosidad Total</b>               |                              |                      |                          |                              |                      |                   |                              |                      |
| <b>Prof en cm</b>                    | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Profundidad en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> | <b>Prof en cm</b> | <b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>% Poros Total</b> |
| 0-5                                  | 0,51                         | 80,79                | 0-5                      | 0,71                         | 73,10                | 0-5               | 0,67                         | 74,64                |
| 5-10                                 | 0,56                         | 78,86                | 5-10                     | 0,57                         | 78,48                | 5-10              | 0,55                         | 79,25                |
| 10-15                                | 0,49                         | 81,55                | 10-15                    | 0,55                         | 79,25                | 10-15             | 0,60                         | 77,33                |
| 15-30                                | 0,47                         | 82,32                | 15-30                    | 0,54                         | 79,63                | 15-30             | 0,59                         | 77,71                |

### CAPACIDAD DE CAMPO

| <b>CAFÉ</b>           |                    |                  |                   |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| <b>PUNTO</b>          | <b>PROFUNDIDAD</b> | <b>PESO SECO</b> | <b>PESO FINAL</b> |
| 1                     | 10-15              | 187              | 191               |
| 2                     | 15-30              | 179              | 213               |
| 3                     | 10-15              | 213              | 214               |
| <b>CÍTRICOS</b>       |                    |                  |                   |
| 1                     | 10-15              | 198              | 214               |
| 2                     | % HI               | 212              | 246               |
| 3                     | 10-15              | 212              | 211               |
| <b>PIÑA</b>           |                    |                  |                   |
| 1                     | 5-10               | 200              | 203               |
| 2                     | %HI                | 203              | 226               |
| 3                     | 5-10               | 205              | 195               |
| <b>CAÑA</b>           |                    |                  |                   |
| 1                     | 5-10               | 150              | 167               |
| 2                     | %HI                | 221              | 229               |
| 3                     | 10-15              | 200              | 206               |
| <b>PASTO MANEJADO</b> |                    |                  |                   |
| 1                     | %HI                | 177              | 202               |
| 2                     | %HI                | 207              | 238               |
| 3                     | 5-10               | 197              | 204               |
| <b>GUADUA</b>         |                    |                  |                   |
| 1                     | %HI                | 194              | 214               |
| 2                     | 10-15              | 199              | 216               |
| 3                     | 5-10               | 168              | 209               |
| <b>YUCA</b>           |                    |                  |                   |
| 1                     | 10-15              | 157              | 193               |
| 2                     | 15-20              | 198              | 216               |
| 3                     | %HI                | 167              | 184               |

#### Anexo 4. Resultados pruebas de calidad Jardines de Lluvia

Resultado pruebas de calidad afluente jardines de lluvia

| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA   |                             |                         |               |           |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Afluente de jardines de lluvia |                             |                         |               |           |
| RESULTADOS                     |                             |                         |               |           |
| Código                         | Ensayo                      | Unidades                | Incertidumbre | Resultado |
| 14                             | Demanda Química de Oxígeno  | mg O <sub>2</sub> /L    | 7.05          | 62.4      |
| 21                             | Fósforo Total               | mg P-PO <sub>4</sub> /L | 0.01          | 0.18      |
| 26                             | Nitrógeno Total Kjeldahl    | mg N/L                  | 0.50          | <10.0     |
| 35                             | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L                    | 0.19          | 21.2      |
| 61                             | Potasio                     | mg/L                    | NE            | 4.68      |
| 64                             | Zinc                        | mg/L                    | NE            | 1.11      |

Resultado pruebas de calidad efluente jardín de lluvia 1

| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA   |                             |                         |               |           |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Afluente de jardines de lluvia |                             |                         |               |           |
| RESULTADOS                     |                             |                         |               |           |
| Código                         | Ensayo                      | Unidades                | Incertidumbre | Resultado |
| 14                             | Demanda Química de Oxígeno  | mg O <sub>2</sub> /L    | 1.53          | <13.5     |
| 21                             | Fósforo Total               | mg P-PO <sub>4</sub> /L | 0.00          | <0.03     |
| 26                             | Nitrógeno Total Kjeldahl    | mg N/L                  | 0.50          | <10.0     |
| 35                             | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L                    | 0.04          | <3.90     |
| 61                             | Potasio                     | mg/L                    | NE            | 0.14      |
| 64                             | Zinc                        | mg/L                    | NE            | <0.10     |

Resultado pruebas de calidad efluente jardín de lluvia 2

| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA   |                             |                         |               |           |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Afluente de jardines de lluvia |                             |                         |               |           |
| RESULTADOS                     |                             |                         |               |           |
| Código                         | Ensayo                      | Unidades                | Incertidumbre | Resultado |
| 14                             | Demanda Química de Oxígeno  | mg O <sub>2</sub> /L    | 1.53          | <13.5     |
| 21                             | Fósforo Total               | mg P-PO <sub>4</sub> /L | 0.00          | <0.03     |
| 26                             | Nitrógeno Total Kjeldahl    | mg N/L                  | 0.50          | <10.0     |
| 35                             | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L                    | 0.04          | <4.0      |
| 61                             | Potasio                     | mg/L                    | NE            | 0.14      |
| 64                             | Zinc                        | mg/L                    | NE            | <0.10     |

Resultado pruebas de calidad efluente jardín de lluvia 3

| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA   |                             |                         |               |           |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Afluente de jardines de lluvia |                             |                         |               |           |
| RESULTADOS                     |                             |                         |               |           |
| Código                         | Ensayo                      | Unidades                | Incertidumbre | Resultado |
| 14                             | Demanda Química de Oxígeno  | mg O <sub>2</sub> /L    | 1.53          | <13.5     |
| 21                             | Fósforo Total               | mg P-PO <sub>4</sub> /L | 0.00          | <0.03     |
| 26                             | Nitrógeno Total Kjeldahl    | mg N/L                  | 0.50          | <10.0     |
| 35                             | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L                    | 0.04          | <3.9      |
| 61                             | Potasio                     | mg/L                    | NE            | 0.09      |

|    |      |      |    |       |
|----|------|------|----|-------|
| 64 | Zinc | mg/L | NE | <0.10 |
|----|------|------|----|-------|

Resultado pruebas de calidad efluente jardín de lluvia 4

| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA   |                             |                         |               |           |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|-----------|
| Afluente de jardines de lluvia |                             |                         |               |           |
| RESULTADOS                     |                             |                         |               |           |
| Código                         | Ensayo                      | Unidades                | Incertidumbre | Resultado |
| 14                             | Demanda Química de Oxígeno  | mg O <sub>2</sub> /L    | 1.53          | <13.5     |
| 21                             | Fósforo Total               | mg P-PO <sub>4</sub> /L | 0.00          | <0.03     |
| 26                             | Nitrógeno Total Kjeldahl    | mg N/L                  | 0.50          | <10.0     |
| 35                             | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L                    | 0.04          | <3.9      |
| 61                             | Potasio                     | mg/L                    | NE            | 0.16      |
| 64                             | Zinc                        | mg/L                    | NE            | <0.10     |