

# **MODELO DE RECARGA POTENCIAL DEL SISTEMA ACUIFERO DE SANTA MARTA Y SUS ALREDEDORES**



**HUGO ERNESTO  
IGUARAN  
HERNANDEZ**



# **Modelo de Recarga Potencial del Sistema Acuífero de Santa Marta y sus Alrededores**

**Hugo Ernesto Iguarán Hernández**

**Universidad Magdalena**

Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Civil  
Santa Marta, Colombia  
Año 2022



# **Modelo de Recarga Potencial del Sistema Acuífero de Santa Marta y sus Alrededores**

**Hugo Ernesto Iguarán Hernández**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Civil**

Director (a):

M.Sc. Adriana del Socorro Pabón Noguera

Codirector (a):

Esp. Víctor Manuel Perdomo Melo

Línea de Investigación:

Hidrogeología

Grupo de Investigación:

Grupo Integrado de Investigación en Ingeniería Civil - GIIC

Universidad del Magdalena

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Santa Marta, Colombia

Año 2022

# Nota de aceptación:

Aprobado por el Consejo de Programa en  
cumplimiento de los requisitos exigidos por la  
Universidad del Magdalena para optar al título de  
Ingeniero Civil.

---

**Jurado**

---

**Jurado**

Santa Marta, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del \_\_\_\_



## DEDICATORIA

*Este trabajo va a dedicado a mis padres, hermanos, amigos y mascotas; han sido un apoyo incondicional para mi vida y desarrollo como persona.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y la vida por permitir culminar este proyecto de la mejor forma.

A mi familia por su constancia, apoyo y amor. Gracias a ellos he logrado alcanzar muchos de mis objetivos.

A los directores de este proyecto: Adriana del Socorro Pabón Noguera y Víctor Manuel Perdomo Melo, por su buena disposición, tiempo y conocimientos brindados para terminar este trabajo.

A mi compañero de investigación y amigo: Andrés Francisco Escobar Villar, por aportar conocimiento, motivación, persistencia y compromiso.

A todas las personas que me ayudaron a lo largo de mi carrera: profesores, directores, monitores y compañeros.

## Resumen

Este estudio tiene como propósito determinar la recarga potencial al sistema acuífero de Santa Marta y sus alrededores. Para su desarrollo se utilizó la Metodología de Schosinsky N., que consiste en realizar un balance hídrico de suelos, teniendo en cuenta variables como: precipitación, evapotranspiración, humedad disponible, textura del suelo, pendiente, cobertura vegetal, escorrentía, etc. Los resultados obtenidos condujeron a la generación de mapas que permitieron identificar las zonas de recarga natural del acuífero. Este proyecto nace con el fin de aportar información para la construcción de un Modelo Hidrogeológico Conceptual, que logre predecir el comportamiento de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de Santa Marta.

***Palabras clave:*** acuífero, mapa, recarga potencial, balance hídrico, hidrogeología.

## Abstract

The purpose of this study is to determine the potential recharge to the aquifer system of Santa Marta and its surroundings. For its development, the Schosinsky N. Methodology was used, which consists of carrying out a soil water balance, taking into account variables such as: precipitation, evapotranspiration, available moisture, soil texture, slope, vegetation cover, runoff, etc. The results obtained led to the generation of maps that made it possible to identify the natural recharge zones of the aquifer. This project was born in order to provide information for the construction of a Conceptual Hydrogeological Model, which manages to predict the behavior of the groundwater of the Santa Marta Aquifer System.

**Keywords:** aquifer, map, potential recharge, water balance, hydrogeology.

## Contenido

	pp.
<b>Introducción .....</b>	<b>14</b>
<b>Área de Estudio.....</b>	<b>15</b>
<b>Georreferenciación .....</b>	<b>17</b>
<b>Planteamiento del Problema .....</b>	<b>18</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>19</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>20</b>
<b>General .....</b>	<b>20</b>
<b>Específicos .....</b>	<b>20</b>
<b>Fundamentación Teórica.....</b>	<b>21</b>
<b>Marco Teórico Conceptual .....</b>	<b>21</b>
Aguas Subterráneas.....	21
Porosidad .....	21
Porosidad Primaria y Secundaria .....	21
Acuífero .....	21
Acuífugo .....	21
Pozo .....	21
Balance Hídrico .....	22
Recarga Artificial.....	22
Infiltración .....	22
Modelo Geológico .....	22
Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	22
Cuña Salina .....	22
Sobreexplotación de los Acuíferos .....	23
Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS) .....	24
<b>Estado del Arte .....</b>	<b>24</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>26</b>

<b>Componente del Mapa Geológico e Hidrogeológico .....</b>	<b>26</b>
<b>Componente de la Recarga Potencial.....</b>	<b>26</b>
<b>Modelo Geológico .....</b>	<b>28</b>
<b>Geología del Área de Estudio.....</b>	<b>28</b>
<b>Estratigrafía .....</b>	<b>29</b>
Cretácico .....	29
Esquistos de San Lorenzo, Conjunto Inferior (MZsl1) .....	29
Esquistos de Gaira (Kg) .....	30
Esquistos de Concha (Kc) .....	30
Eoceno .....	30
Batolito de Santa Marta (Esmb-cd).....	30
Cuaternario .....	30
Aluviones Recientes (Qal) .....	30
Abanicos y Gravas (Qg).....	31
<b>Geología Estructural .....</b>	<b>31</b>
La Falla de Florín.....	31
La Falla de Taganga.....	31
La Falla Jordán .....	32
La Falla El Carmen .....	32
<b>Hidrogeología.....</b>	<b>34</b>
Localización Hidrogeológica .....	34
Formaciones.....	35
Acuífugo Batolito de Santa Marta. ....	36
Acuífugo Esquisto de Gaira. ....	36
Acuífugo Esquisto de Concha. ....	36
Acuífero de Depósitos Aluviales. ....	36
Acuífero de Depósitos Coluviales.....	36
<b>Balance Hídrico de Suelos .....</b>	<b>38</b>
<b>Precipitación (P) .....</b>	<b>38</b>
<b>Fración que Infiltra por Efecto de la Pendiente (Kp).....</b>	<b>40</b>
<b>Fración que Infiltra Debido a la Textura del Suelo (Kfc) .....</b>	<b>41</b>
<b>Fración que Infiltra por Cobertura Vegetal (Kv).....</b>	<b>42</b>

<b>La Fracción de Lluvia Interceptada por el Follaje (Cfo).</b> .....	<b>43</b>
<b>Retención (Ret)</b> .....	<b>44</b>
<b>Coeficiente de Infiltración (Ci)</b> .....	<b>47</b>
<b>Infiltración Pluvial Mensual (Pi)</b> .....	<b>49</b>
<b>Escorrentía Superficial (ESC)</b> .....	<b>51</b>
<b>Evapotranspiración Potencial (ETP)</b> .....	<b>54</b>
<b>Capacidad de Campo (CC)</b> .....	<b>56</b>
<b>Punto de Marchitez (Pm)</b> .....	<b>57</b>
<b>Humedad inicial (HSi)</b> .....	<b>57</b>
<b>Coeficiente de Humedad (C1)</b> .....	<b>59</b>
<b>Evapotranspiración Potencial Real (Etr1)</b> .....	<b>61</b>
<b>Coeficiente de Humedad (C2)</b> .....	<b>62</b>
<b>Evapotranspiración Real Tentativa Promedio (ETPR)</b> .....	<b>64</b>
<b>Humedad Disponible (HD)</b> .....	<b>66</b>
<b>Evapotranspiración Real Promedio (ETR)</b> .....	<b>67</b>
<b>Humedad Final (HSf)</b> .....	<b>70</b>
<b>Déficit de Capacidad de Campo (DCC)</b> .....	<b>73</b>
<b>Necesidad de Riego (NR)</b> .....	<b>75</b>
<b>Recarga Potencial del Acuífero (Rp)</b> .....	<b>78</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>85</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>87</b>



## Listado de Figuras

	<b>pp.</b>
<b>Figura 1</b> .....	15
<b>Figura 2</b> .....	23
<b>Figura 3</b> .....	28
<b>Figura 4</b> .....	33
<b>Figura 5</b> .....	33
<b>Figura 6</b> .....	35
<b>Figura 7</b> .....	37
<b>Figura 8</b> .....	38
<b>Figura 9</b> .....	41
<b>Figura 10</b> .....	42
<b>Figura 11</b> .....	43
<b>Figura 12</b> .....	44
<b>Figura 13</b> .....	45
<b>Figura 14</b> .....	46
<b>Figura 15</b> .....	48
<b>Figura 16</b> .....	49
<b>Figura 17</b> .....	51
<b>Figura 18</b> .....	52
<b>Figura 19</b> .....	53
<b>Figura 20</b> .....	54
<b>Figura 21</b> .....	56
<b>Figura 22</b> .....	57
<b>Figura 23</b> .....	58
<b>Figura 24</b> .....	60
<b>Figura 25</b> .....	61
<b>Figura 26</b> .....	63
<b>Figura 27</b> .....	64
<b>Figura 28</b> .....	65
<b>Figura 29</b> .....	66
<b>Figura 30</b> .....	68
<b>Figura 31</b> .....	69
<b>Figura 32</b> .....	70
<b>Figura 33</b> .....	71
<b>Figura 34</b> .....	72

<b>Figura 35</b> .....	73
<b>Figura 36</b> .....	75
<b>Figura 37</b> .....	76
<b>Figura 38</b> .....	78
<b>Figura 39</b> .....	79
<b>Figura 40</b> .....	81
<b>Figura 41</b> .....	82
<b>Figura 42</b> .....	83

**Listado de Tablas****pp.**

<b>Tabla 1</b> .....	17
<b>Tabla 2</b> .....	34
<b>Tabla 3</b> .....	84

**Listado de Apéndices**

	<b>pp.</b>
<b>Apéndice A</b> .....	91
<b>Apendice B</b> .....	97

## **Introducción**

Este trabajo nace con el fin de aportar información relacionada al sistema acuífero de Santa Marta, perteneciente a la ciudad del mismo nombre, departamento del Magdalena. El acueducto de la ciudad se abastece de dos formas: con agua superficial y subterránea.

Se realizará un modelo geológico que permita identificar las formaciones que interfieren en dicho sistema a partir de información secundaria.

En la hidrogeología del estudio se destacan los depósitos cuaternarios, que, debido a sus características, constituyen las zonas más relevantes desde el punto de vista Hidrogeológico, en el área, ya que tienen la capacidad de almacenar, y permitir el paso del agua en su estructura. La cantidad de agua que ingresa, puede ser estimada, mediante la realización de un balance hídrico, hallando la recarga potencial al acuífero.

Durante el desarrollo de este estudio se aplicó la metodología de Schosinsky N. (2006), aplicando operaciones de matemáticas básicas entre archivos ráster, estimando el volumen de recarga anual.

A partir del estudio realizado se obtuvieron mapas mensuales con las propiedades evaluadas, luego de estimarlos factores que influyen en la recarga potencial del acuífero, consiguiendo como producto un mapa de recarga potencial anual, ilustrando las áreas con mayor potencial de recarga.

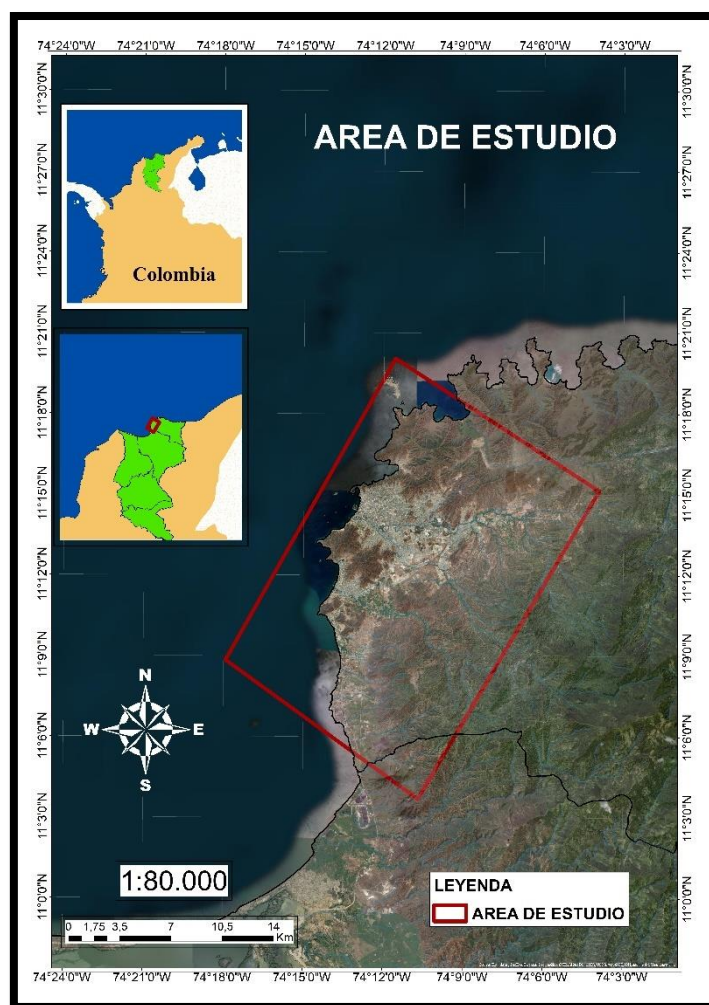
## Área de Estudio

El polígono del área de estudio se encuentra en la ciudad de Santa Marta, departamento del Magdalena (ver

Figura 1). Se elige el área luego de analizar la geología, concluyendo que la franja donde se encuentra el cuaternario es la principal razón, además se extiende un poco más para ver las relaciones existentes entre las rocas con mayores y menores probabilidades de recarga directa.

### Figura 1

*Ubicación del Área de Estudio.*





*Nota.* La figura representa la ubicación del área de estudio, mostrando la ciudad, departamento y país al cual pertenece.

El Distrito Turístico, Cultural e Histórico de Santa Marta, es la capital del departamento del Magdalena y se encuentra ubicada al norte de Colombia. Según el portal web oficial de la Alcaldía Distrital de Santa Marta; [santamarta.gov.co](http://santamarta.gov.co) (2021), menciona que su municipio tiene una extensión de 2.393,35 Km<sup>2</sup>. Limita con los municipios de Ciénaga y Aracataca al sur, al norte y oeste con el mar caribe, y con los departamentos de La Guajira y Cesar al oriente. Las coordenadas geográficas son: 11° 14' 50" de latitud norte y 74° 12' 06" de latitud oeste.

### Georreferenciación

EL sistema de proyección cartográfico utilizado en este proyecto es el CTM 12. El IGAC<sup>1</sup> (2020), reglamenta su uso como el nuevo origen de proyección, para todo tipo de personas que generen material cartográfico con fines oficiales. En la Tabla 1 se especifica los parámetros de la proyección manejada.

**Tabla 1**

*Parámetros de proyección.*

Parámetro	Valor
Proyección	Transversa de Mercator
Elipsoide	GRS80
Origen: Latitud	4° N
Origen: Longitud	73°W
Falso Este	5.000.000
Falso Norte	2.000.000
Unidades	Metros
Factor de escala	0.9992

*Nota.* La información de la tabla pertenece al IGAC (2020).

<sup>1</sup> IGAC: Siglas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se manejará esta denominación a partir de esta página.

### **Planteamiento del Problema**

Santa Marta es un distrito que es abastecido en su mayoría por las aguas superficiales, llegando a tener cierta dependencia a los ríos Manzanares, Piedras y Gaira. Estos cuerpos hídricos han disminuido gradualmente su caudal promedio, además de verse fuertemente afectado en época de estiaje.

Debido a lo anterior y de forma alterna a la captación de agua superficial, se realiza la captación de aguas subterráneas, mediante la utilización de pozos profundos, que extraen el preciado líquido almacenado en el acuífero de la zona.

El sistema acuífero de Santa Marta posee las características idóneas y por ello es explotado, pero no se cuenta con mucha información sobre este (en referencia a la documentación pública), que detalle el comportamiento ante su uso, donde se evitaría que llegase a ser sobreexplotado. Las consecuencias de esto irían desde la pérdida de productividad de los pozos hasta la intrusión de la cuña marina.

Es por ello que esta problemática necesita elementos de juicio que aporten información sobre el sistema acuífero de Santa Marta, con el fin determinar la cantidad de agua extraída y la que naturalmente es recargada. Para así de esta forma realizar un uso sostenido y sostenible, evaluando la vulnerabilidad a la explotación otorgando elementos de juicio en un buen manejo del acuífero.

### **Justificación**

En épocas de sequía el distrito de Santa Marta se ve afectado por la escasez de agua, donde el bajo caudal de los ríos que lo abastecen, ha propiciado que se desvíe el foco de atención hacia la explotación de otras fuentes hídricas, que puedan satisfacer su demanda. Por ello, los entes responsables han intentado satisfacer esta necesidad mediante la explotación impetuosa de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero de Santa Marta.

Se ha venido despertando el interés y la preocupación de las diferentes entidades encargadas del uso del agua en Santa Marta, además del interés de la misma comunidad por preservar y mantener el preciado recurso, donde se espera la planificación de estrategias que aseguren el uso sostenible del sistema acuífero en cuestión.

En aras de aportar información, la investigación pretende ilustrar aspectos y características del acuífero en relación a las formaciones geológicas y la importancia de cada una, en cuanto a la recarga potencial, que Se propone hallarla mediante el balance hídrico usando la metodología propuesta por Schosinsky N. (2006). La cual se modifica adaptándose mediante el uso de operaciones entre archivos ráster.

Es por ello, que la finalidad de este trabajo es brindar una mayor información sobre el recurso hídrico subterráneo del área de estudio especificada anteriormente. Debido a que es una problemática reciente, es imperativo ampliar el conocimiento sobre el agua subterránea de la zona para su buena gestión.

## **Objetivos**

### **General**

Realizar el cálculo de la recarga potencial del sistema acuífero de Santa Marta y sus alrededores.

### **Específicos**

- Generar un mapa geológico e hidrogeológico mediante información secundaria para identificar los tipos de litología y la capacidad de almacenamiento de agua de cada formación respectivamente.
- Calcular la recarga potencial del acuífero mediante un balance hídrico de suelos, teniendo en cuenta los factores que influyen en la infiltración, usando la metodología de Schosinsky N. (2006).
- Presentar las zonas de recarga natural del sistema acuífero de Santa Marta por medio de la producción de un material cartográfico.

## **Fundamentación Teórica**

### **Marco Teórico Conceptual**

#### ***Aguas Subterráneas***

MGAP<sup>2</sup> (2012), la definen como el agua que se sitúa por debajo del nivel freático ocupando los vacíos del suelo y de las rocas como: poros, rupturas, grietas, fisuras o cuevas; conformando los acuíferos.

#### ***Porosidad***

Se define como relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la roca.

#### ***Porosidad Primaria y Secundaria***

“Se denomina porosidad primaria a la que resulta al originarse la formación geológica; porosidad secundaria será cualquier abertura que se produzca posteriormente” (Sánchez, 2017, 414 pp.).

#### ***Acuífero***

Son formaciones geológicas, que, por su alta porosidad, permiten el movimiento de agua. Tiene la capacidad de conducir y almacenar agua, permitiendo que esta sea extraída. Algunas formaciones características son: arenas, gravas y calizas.

#### ***Acuífugo***

Es una formación geológica que se caracteriza por no poder almacenar ni transmitir agua. Se destacan los gneises, mármoles y granitos.

#### ***Pozo***

Es una obra de perforación directa al subsuelo con el fin de obtener agua subterránea de un acuífero (MGAP, 2012).

---

<sup>2</sup> MGAP: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay.



### ***Balance Hídrico***

Según Rebollo (s.f.), es la estimación del volumen de agua de un sistema hidrogeológico que corresponde a su recarga, el cual fluye por su zona de saturación, y la cantidad de agua que supone su descarga al exterior.

### ***Recarga Artificial***

“Es un método de gestión hídrica que permite introducir agua en los acuíferos subterráneos” (Díaz et al., 2020, p. 14).

### ***Infiltración***

“Es el agua de precipitación que, en su descenso por el suelo, ocupa parcial o totalmente los poros o fisuras del suelo y rocas”. (MGAP, 2012, p. 14).

### ***Modelo Geológico***

De acuerdo a Pirela y Ramírez (2017) es una representación idealizada bidimensional o tridimensional que compendia otros tres modelos: el estructural, el sedimentario-estratigráfico y el litológico, lo cuales constituyen las características y propiedades de un yacimiento como la heterogeneidad.

### ***Modelo Hidrogeológico Conceptual***

Para Perdomo y Rojas (2017), el modelo hidrogeológico conceptual es un esquema simplificado, lógico, a nivel cualitativo y cuantitativo, que describe las propiedades, condiciones, procesos y potencialidades de la roca acuífero, intentando predecir su comportamiento para así determinar la cantidad de recurso hídrico que es susceptible a infiltración, al mismo tiempo se pueden anticipar y explicar posibles impactos ambientales sobre el hidrosistema.

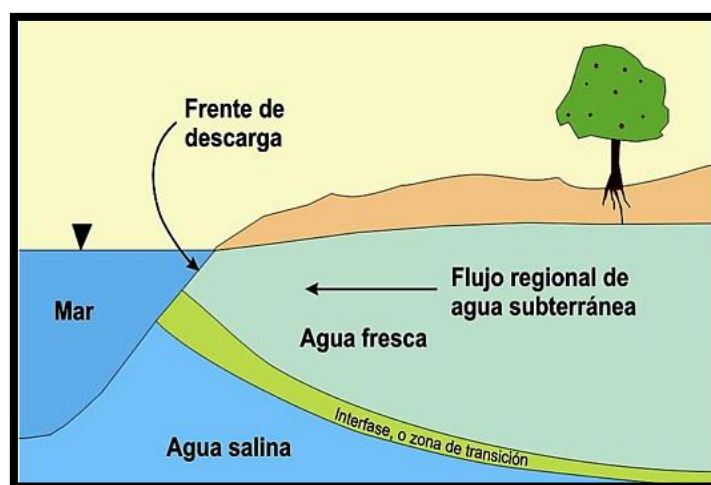
### ***Cuña Salina***

Para Díaz et al. (2020), tal como lo ilustra la Figura 2:

Es el proceso por el cual los acuíferos costeros entran en contacto con el agua de los mares. La cuña salina surge cuando el agua dulce entra en contacto con el agua salada del mar y la primera fluye sobre la segunda debido a la diferencia de densidades. Es decir, el agua salada, que es más densa o pesada, penetra por debajo de la dulce y la desplaza por causa del desplazamiento de la morfología del cauce de un río, del caudal circulante, del nivel del mar, de los vientos persistentes, etc. (pp. 14; 26)

## Figura 2

*Intrusión de la cuña salina.*



*Nota.* Información contenida en Lugo y García (1996) [como se citó en Intrusión Salina, Recursos de Agua de Puerto Rico, (s.f.)]. URL (<http://www.recursosaguapuertorico.com/Intrusion-Salina.html>).

## ***Sobreexplotación de los Acuíferos***

Se presenta si la cantidad de agua que es recargada (natural o artificial) es menor a la extraída. Según Pulido (s.f.) las consecuencias de la sobreexplotación de un acuífero son: Descenso de los niveles piezométricos, compactación inducida del terreno, compartimentación

del acuífero, aumento de los costos de explotación, deterioro de la calidad del agua, abandono de pozos y modificaciones inducidas en el régimen de los ríos.

### ***Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)***

“Son aquellos elementos participantes en el drenaje de las ciudades que, además de reducir el caudal producido por la lluvia, disminuyen los contaminantes arrastrados por la escorrentía”. (“Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible”, s.f., párr. 1)

### **Estado del Arte**

Después de la búsqueda de información relacionada con los objetivos de este estudio, se extrajo la documentación más importante para la realización de este proyecto, las cuales son:

- Tschanz et al. (1969) publicaron el documento “Geology of the Sierra Nevada de santa Marta”, con el fin de hacer un análisis geológico detallado de la zona mencionada.
- El contrato de prestación de servicios numero 025-06, desarrollado para realizar la geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33, 34 y 40 generó el documento “Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta” perteneciente al SGC publicado en el año 2007.
- Schosinsk N. (2006), realizo una metodología y un modelo con el fin de hallar la recarga potencial al acuífero mediante un balance de suelos, llamado “Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos”.
- Perdomo y Rojas (2017) en su trabajo de grado para obtener el título de Especialista en Recursos Hídricos, llamado “Modelo Hidrogeológico Conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá”, realizan un balance hídrico de su zona de interés.

- CORPAMAG<sup>3</sup> (2019) publicó el documento “Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501)” este es un instrumento de planificación, en donde se hace una planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca.
- Puerto y Nieto (2018), realizaron un documento para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos, llamado “Modelo Hidrogeológico Conceptual Del Centro Poblado De Puerto Caldas, Municipio De Granada, Meta”, con el fin de conocer el comportamiento hidrogeológico en el área del Centro Poblado de Puerto Caldas.
- IDEAM<sup>4</sup> (2015) publicó el “Estudio Nacional del Agua” en su versión 2014, documento que profundiza en el conocimiento sobre el comportamiento del ciclo hidrológico en el territorio del país, de sus cuencas hidrográficas, cuerpos de agua y aguas subterránea.
- El SGC (2019) publicó el documento “Modelo Hidrogeológico Conceptual Valle Medio del Magdalena Planchas 108 y 119. Puerto Wilches, Barrancabermeja, Sabana de Torres y San Vicente de Chucurí”, cuyo objetivo era describir las características hidrogeológicas del acuífero de la zona de interés.

---

<sup>3</sup> CORPAMAG: Corporación Autónoma Regional del Magdalena. Se denominará así a partir de esta página.

<sup>4</sup> IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Esta denominación se utilizará en el documento.

## **Metodología**

Este trabajo se divide en dos componentes:

### **Componente del Mapa Geológico e Hidrogeológico**

Se divide en 4 subetapas:

1. Compilación, análisis y validación de información del portal web del Servicio Geológico Colombiano (SGC), del cual se obtendrán las planchas a una escala 1:100.000 con las memorias de cálculo con las formaciones geológicas correspondientes de área de estudio.
2. Hacer ajustes al mapa generado de la anterior etapa, en la aplicación de Google Earth, con el fin de que cada formación sea lo más fiel posible a la realidad y generar de esta forma un mapa geológico a escala 1:50.000.
3. Se realizará una descripción hidrogeológica de las formaciones, y se generará un mapa que ilustre esas características.
4. La presentación de resultados contiene los mapas geológico e hidrogeológico.

### **Componente de la Recarga Potencial**

Para su obtención se utiliza la metodología de Schosinsky N. (2006), se divide en 4 subetapas:

1. Se utilizará la Información de Escobar Villar (2022), del cual se obtendrán los parámetros de: kp, kv, kfc, Cfo, capacidad de campo, punto de marchitez, precipitaciones y evapotranspiración, correspondiente al área estudiada.
2. Para los caculos se utilizará el método utilizado por Perdomo y Rojas (2017), que consiste en el uso de una calculadora ráster, de esta forma llevar a cabo todas las operaciones necesarias, para cuantificar la recarga potencial del acuífero. Los cálculos realizados se manejarán con pixeles de 12,5 metros de precisión.

3. Los análisis de resultados, consisten en interpretar los mosaicos obtenidos de los cálculos a realizar, además, se generarán mapas anuales o independiente al tiempo, de los cuales se detallarán sus principales características.

4. La presentación de resultados, contendrá los mosaicos mensuales, mapas individuales, las zonas de recarga y sus valores clasificados por formación.



## Modelo Geológico

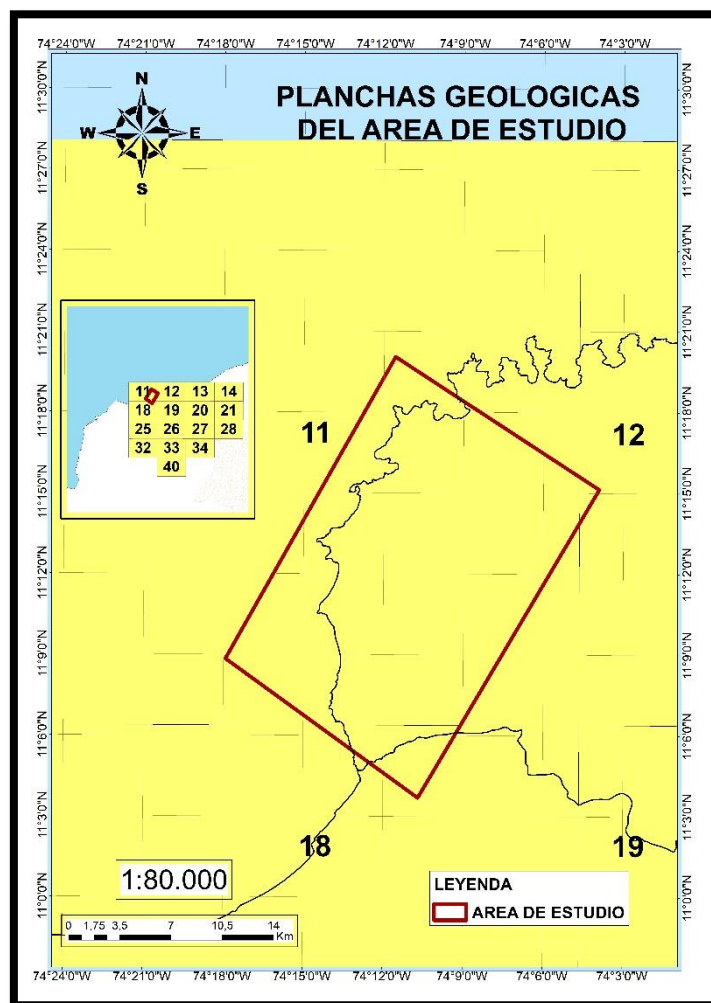
### Geología del Área de Estudio

Comprende en su mayoría la plancha 11, y en menor medida la 12 y 18 (ver Figura 3).

Distribuyendo así la información geológica de la zona.

### Figura 3

*Planchas geológicas del área de estudio.*



*Nota.* La imagen muestra el área estudio y su ocupación dentro de las planchas geológicas de una escala 1:100.000, extraídas del SGC<sup>5</sup>.

El área de estudio cuenta con la influencia de la SNSM<sup>6</sup> ubicada en el ala nororiental; debido a ello, dentro de la zona objeto de este análisis se encuentra una formación montañosa localizada sobre el nororiente de la ciudad que es conocida como el Batolito Santa Marta: constituida por rocas del Eoceno que datan de unos 48 m.a<sup>7</sup>.

Las veredas y corregimientos en los límites urbano-rural como: Bonda, paso del Mango, altos de villa Dania y parte del cerro de Girocasaca; sector donde se encuentran asentamientos de comunidades indígenas de la etnia Kogui. Hacia la parte norte están comunidad del área urbana de la ciudad como Pecadito, Taganga y Bahía Concha, estas últimas dos reciben su nombre debido a las playas que se encuentran al pie de ellas.

### **Estratigrafía**

Este trabajo utiliza las convenciones oficiales publicadas por el SGC (2007) de donde se extrajo toda la información geológica. Las planchas utilizadas fueron las 11, 12 y 18. Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio clasificadas por su edad son:

#### ***Cretácico***

***Esquistos de San Lorenzo, Conjunto Inferior (MZsl1).*** Nombrado de esta forma por Tschanz et al. (1969). Son un conjunto de rocas metamórficas principalmente esquistos grafitosos, esquistos cuarzo micáceos y cuarcitas. Afloran en el flanco noroccidental de la SNSM.

---

<sup>5</sup> SGC: Son las siglas del Servicio Geológico Colombiano. Esta abreviatura se mantendrá a partir de esta página.

<sup>6</sup> SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta. Se denominará en el resto del documento.

<sup>7</sup> ma: Millones de años

***Esquistos de Gaira (Kg).*** Definido originalmente por Tschanz et al. (1969), son las rocas de metamorfismo de grado bajo a medio, en facies esquisto verde y facies anfibolita, que se localizan al noroeste del Batolito de Santa Marta. El protolito corresponde a sedimentos Paleozoicos o Mesozoicos que sufrieron metamorfismo regional durante el intervalo Cretácico – Paleoceno.

***Esquistos de Concha (Kc).*** Unidad nombrada originalmente por MacDonald et al. (1971) para describir las rocas metamórficas que afloran a lo largo de la costa desde Rodadero hasta Punta Florín. Consisten principalmente en esquistos talcosos, en menor proporción filitas cloríticas y anfibolitas de actinolita. Son las rocas metamórficas en facies esquisto verde, son consideradas como la unidad más joven en la secuencia de los Esquistos de Santa Marta.

### ***Eoceno***

***Batolito de Santa Marta (Esmb-cd).*** Es un granitoide formado en condiciones de presión y temperatura muy elevadas, la riqueza de enclaves máficos, asegura la existencia de magmas máficos desde el inicio y durante la evolución del magma félsico. Es denominada originalmente por Tschanz et al. (1969), como un cuerpo de extensión considerable de rocas ígneas intrusivas de composición tonalítica e intruye a las rocas metamórficas del Cretácico - Paleoceno, Esquisto de Gaira, Esquisto de San Lorenzo y Esquisto de Concha.

### ***Cuaternario***

***Aluviones Recientes (Qal).*** Contienen gravas hasta bloques de rocas metamórficas, ígneas plutónicas y volcánicas, en menor proporción sedimentarias, registrando la erosión de todas las unidades geológicas de la SNSM. Se caracterizan por ser depósitos de topografía suave y baja no consolidados, de arenas, gravas y guijarros en matriz lodosa, amarillo ocre, mal

seleccionados, con cantos ígneos con plagioclasa, mica, cuarzo y fragmentos de rocas del batolito central.

***Abanicos y Gravas (Qg).*** Están conformados principalmente por gravas redondeadas a sub-redondeadas y bloques de hasta 1 metro de diámetro, provenientes de rocas como granulitas, neises, dioritas, tonalitas y gabros en matriz arenosa y por depósitos caóticos mal seleccionados producto de flujos súbitos de materiales por inestabilidad de taludes topográficos.

### **Geología Estructural**

El SGC clasifico el área correspondiente a la SNSM en 6 regiones estructurales, teniendo en cuenta la distribución de ciertos patrones observados.

El área de este estudio se encuentra en la Región Estructural I. Los rasgos del patrón estructural de esta región son trazos rectilíneos a muy suavemente curvados de excelente expresión morfológica, ya que generan estrechos valles o depresiones y alineamiento de rasgos topográficos. Se prolongan por decenas hasta centenares de kilómetros. Las fallas presentes en el área de estudio son:

#### ***La Falla de Florín***

Es una falla inversa con bajo a moderado ángulo de inclinación a cabalgamientos, se extiende por aproximadamente 16 km en la plancha 11, desde un poco al sureste de la Bahía de Taganga en su extremo suroccidental, continuando su trayectoria noreste hacia la plancha 12, hasta Punta Florín. Transporta rocas de la unidad “Esquistos de Gaira” (Kg) sobre rocas de los “Esquistos de Concha” (Kc) y sus dos extremos terminan en superficie contra la línea de costa.

#### ***La Falla de Taganga***

Al igual que la Falla anterior, es una falla inversa con bajo a moderado ángulo de inclinación a cabalgamientos, es el elemento tectónico aflorante más reciente del sistema de

fallas de esta región. Esta falla superpone sobre sí mismas, rocas de la unidad “Esquistos de Concha” (Kc), en una longitud de 22 km en la plancha 11.

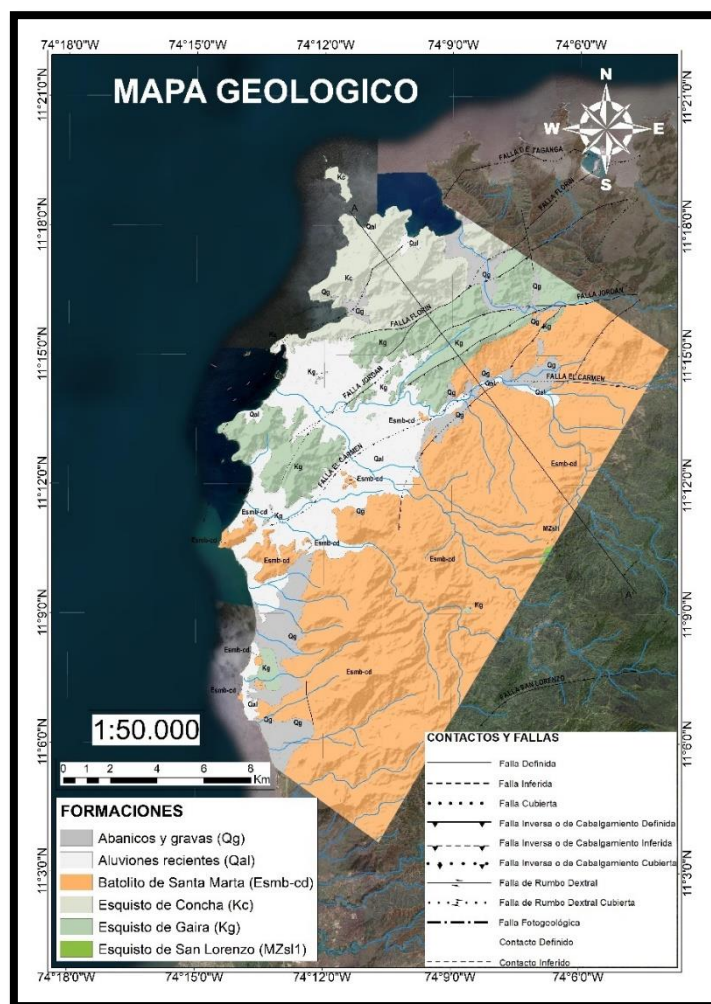
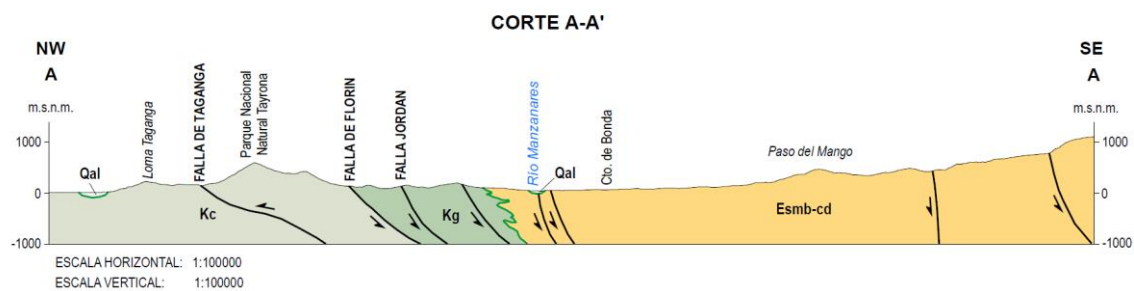
### ***La Falla Jordán***

Esta falla se extiende por 20 Km, a lo largo de la Quebrada El Jordán y el Río Piedras, en las planchas 11 y 12. Termina al occidente, constituida por lo menos por cinco fallas inversas subparalelas. Esta falla termina en desembocadura del Río Piedras, donde transporta rocas de la unidad Esquisto de Gaira, sobre el Batolito de Santa Marta.

### ***La Falla El Carmen***

Se extiende por 20 km de longitud aproximadamente. Transporta rocas del Batolito de Santa Marta contra los Esquistos de Gaira. Formada por dos fallas inversas, una se extiende por 11 Km (hasta inmediaciones de Gaira); la otra tiene un dibujo un arco de aproximadamente 15 km de longitud. De la parte intermedia se desprende un sistema de fallas inversas que transportan rocas de los Esquistos de Gaira sobre el Batolito de Santa Marta.

En la Figura 4 se puede observar el mapa geológico correspondiente al área de estudio, obtenido de la información filtrada y analizada anteriormente. En él se logra apreciar las formaciones y estructuras geológicas del área de estudio. En la Figura 5, se observa el corte transversal A-A' derivado de la Figura 4, detallando los contactos entre las formaciones y sus altitudes.

**Figura 4***Mapa Geológico.***Figura 5***Corte Transversal A-A'.*

*Nota.* Imagen extraída del SGC (2007).

## **Hidrogeología**

### ***Localización Hidrogeológica***

De acuerdo con el IDEAM (2015), en el área de estudio se encuentra el sistema acuífero de Santa Marta (ver Figura 6), el cual pertenece al área hidrográfica denominada Magdalena Cauca, que a su vez hace parte de la zona hidrográfica del Bajo Magdalena, dicha zona está contenida en la provincia hidrogeológica del Sinú - San Jacinto, tal como se observa en la Tabla 2. El sistema acuífero de Santa Marta, comprende los acuíferos de Gaira, Tamacá y Santa Marta. Es recargado naturalmente por las precipitaciones y las corrientes superficiales: río Gaira, Quebrada Tamacá y Río Manzanares; respectivamente.

**Tabla 2**

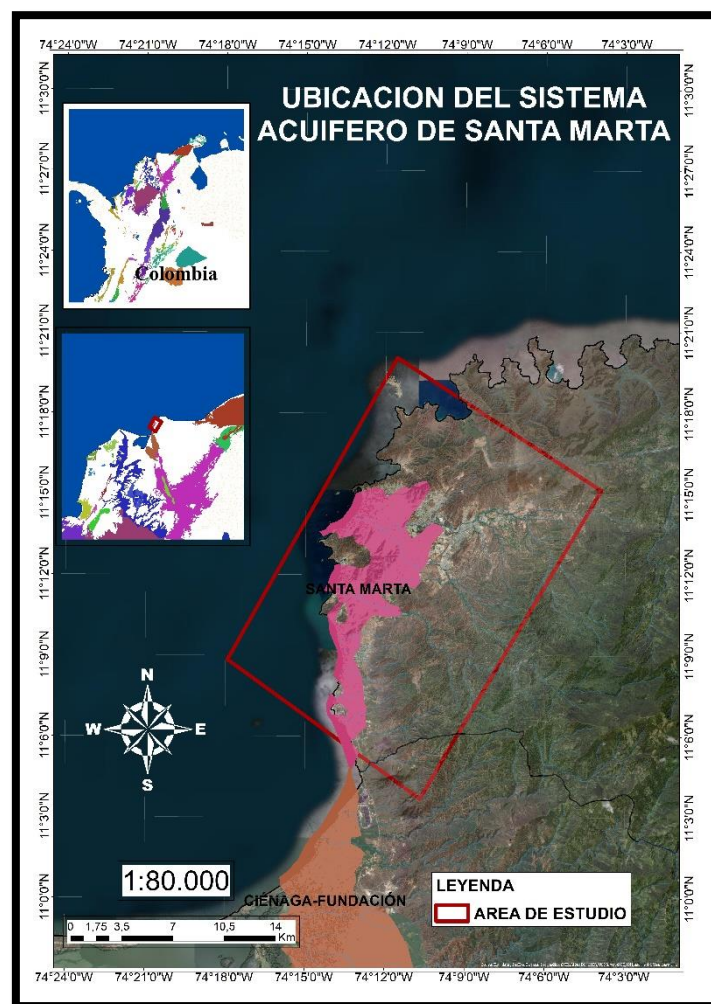
*Distribución del sistema acuífero por área hidrográfica y provincia hidrogeológica.*

<b>Provincia hidrogeológica</b>	<b>Código</b>	<b>Sistema acuífero</b>	<b>Unidades hidrogeológicas</b>	<b>Tipo de acuíferos</b>	<b>Área superficial (km<sup>2</sup>)</b>
PC1 Sinú San Jacinto	SAC1.11	Santa Marta	Acuífero Santa Marta, Acuífero Gayra y Acuífero Tamacá	Libres a semiconfinados	59

*Nota.* La información fue extraída del IDEAM (2015).

**Figura 6**

*Ubicación del sistema acuífero de Santa Marta.*



*Nota.* En la figura se muestra el sistema acuifero de Santa Marta contenido en area de estudio, junto a una seccion del acuifero Cienaga-Fundacion. Adicionalmente, y en menor detalle, se ven los acuíferos de Colombia, informacion extraida de IDEAM (2015).

### ***Formaciones***

Las características hidrogeológicas de las formaciones antes descritas basadas en el documento POMCA del Rio Piedras, Rio Manzanares y otros directos al caribe de CORPAMAG (2019) son:



***Acuífugo Batolito de Santa Marta.*** Destaca por presentar una muy baja porosidad secundaria al contener fracturas y diaclasas angostas, de poca longitud y rellenas generalmente con material milonitizado con agua de buena a mala calidad. Es impermeable.

***Acuífugo Esquisto de Gaira.*** Son esquistos densos con marcada foliación, presentando fracturas y diaclasas angostas, de poca extensión y rellenas con material milonitizado, originando una roca prácticamente impermeable.

***Acuífugo Esquisto de Concha.*** Las fracturas y diaclasas son angostas y poco profundas, lo cual no permite un almacenamiento de agua subterránea importante, razón por la cual esta unidad se le clasifica como Acuífugo, es decir, no almacena ni transmite el agua subterránea.

***Acuífero de Depósitos Aluviales.*** Hidrogeológicamente este acuífero se considera de tipo multicapa, continuo y de extensión regional con desarrollo de una porosidad primaria; la parte superior se comporta como libre y es explotada generalmente por aljibes mientras que la capa inferior se comporta como confinada y actualmente es explotada por numerosos pozos profundos. Posee una alta productividad.

***Acuífero de Depósitos Coluviales.*** Son acuíferos generalmente confinados, discontinuos de extensión local de mediana a baja productividad conformados de material granular de tamaño variable y material fino como matriz, con agua de buena calidad.

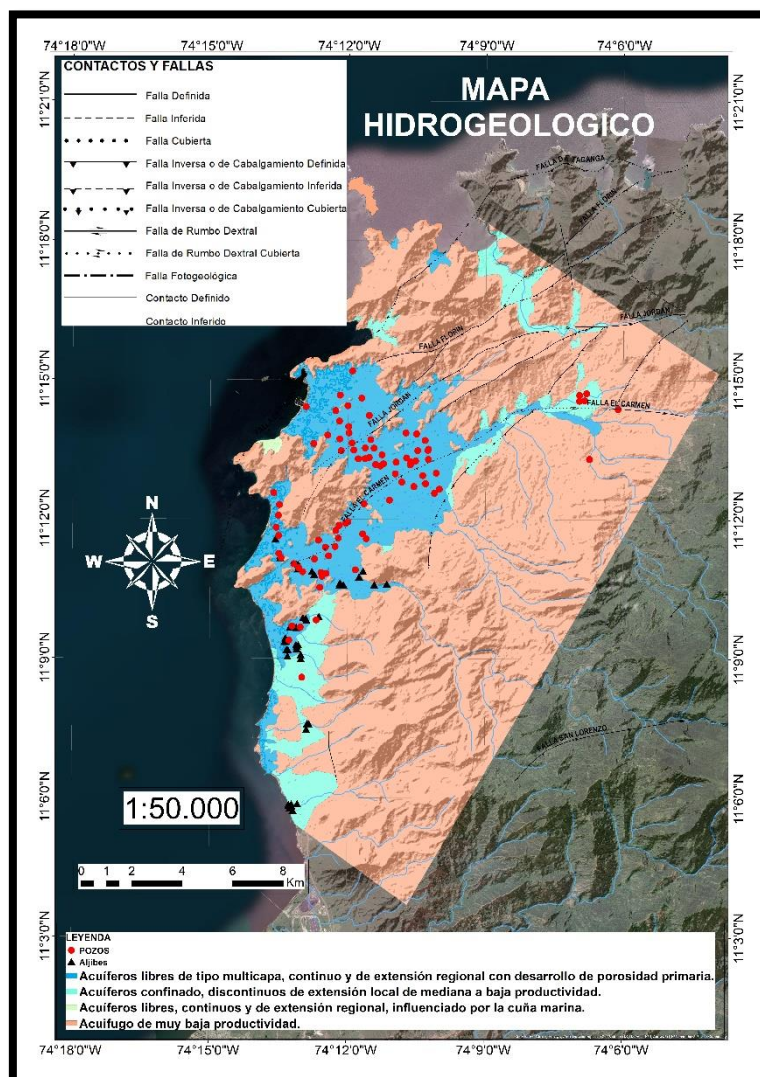
***Acuífero de Depósitos de Playa.*** Es un acuífero libre, de extensión regional, continuo y de baja productividad, posee un contenido de sal de moderado a alto, debido a la cercanía con la costa.

En la Figura 7 se presenta el mapa hidrogeológico, resultante de la interpretación de las características hidrogeológicas de las rocas formaciones presentes en el área de estudio., además,

en él se encuentran los pozos y aljibes de la zona de estudio obtenidos de CORPAMAG (2019), enlistados en el Apéndice A y Apéndice B.

**Figura 7**

*Mapa Geológico.*



*Nota.* Este mapa tiene las convenciones oficiales del IDEAM.

## Balance Hídrico de Suelos

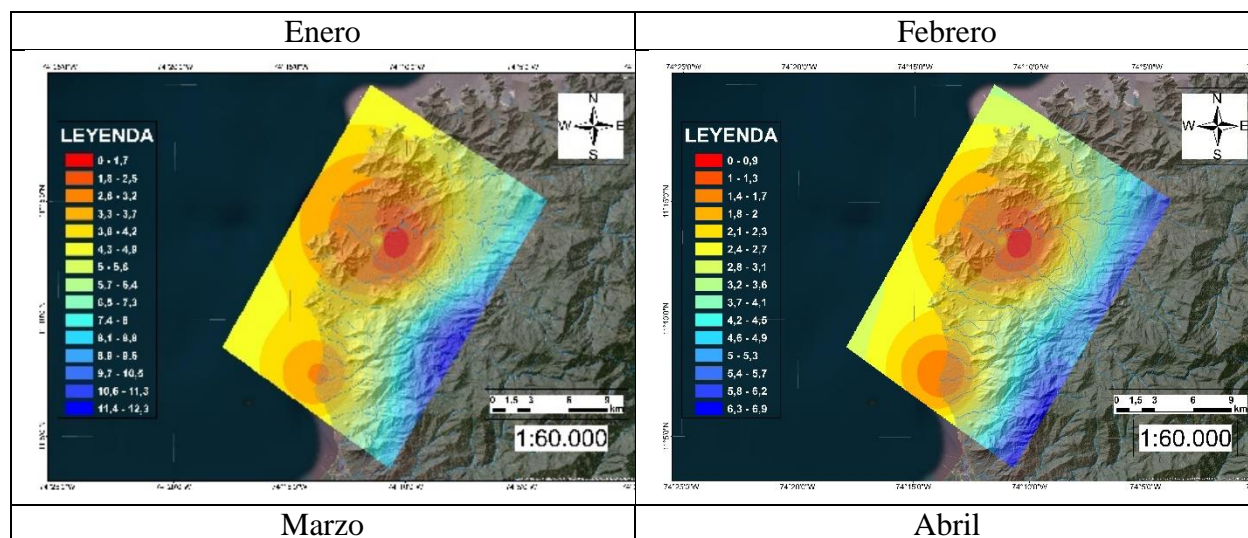
“La necesidad de conocer el potencial de aguas subterráneas para ser explotadas mediante pozos, conlleva a estimar la recarga de los acuíferos en proyectos de evaluación de las aguas subterráneas, ...” (Schosinsky N., 2006, p. 14).

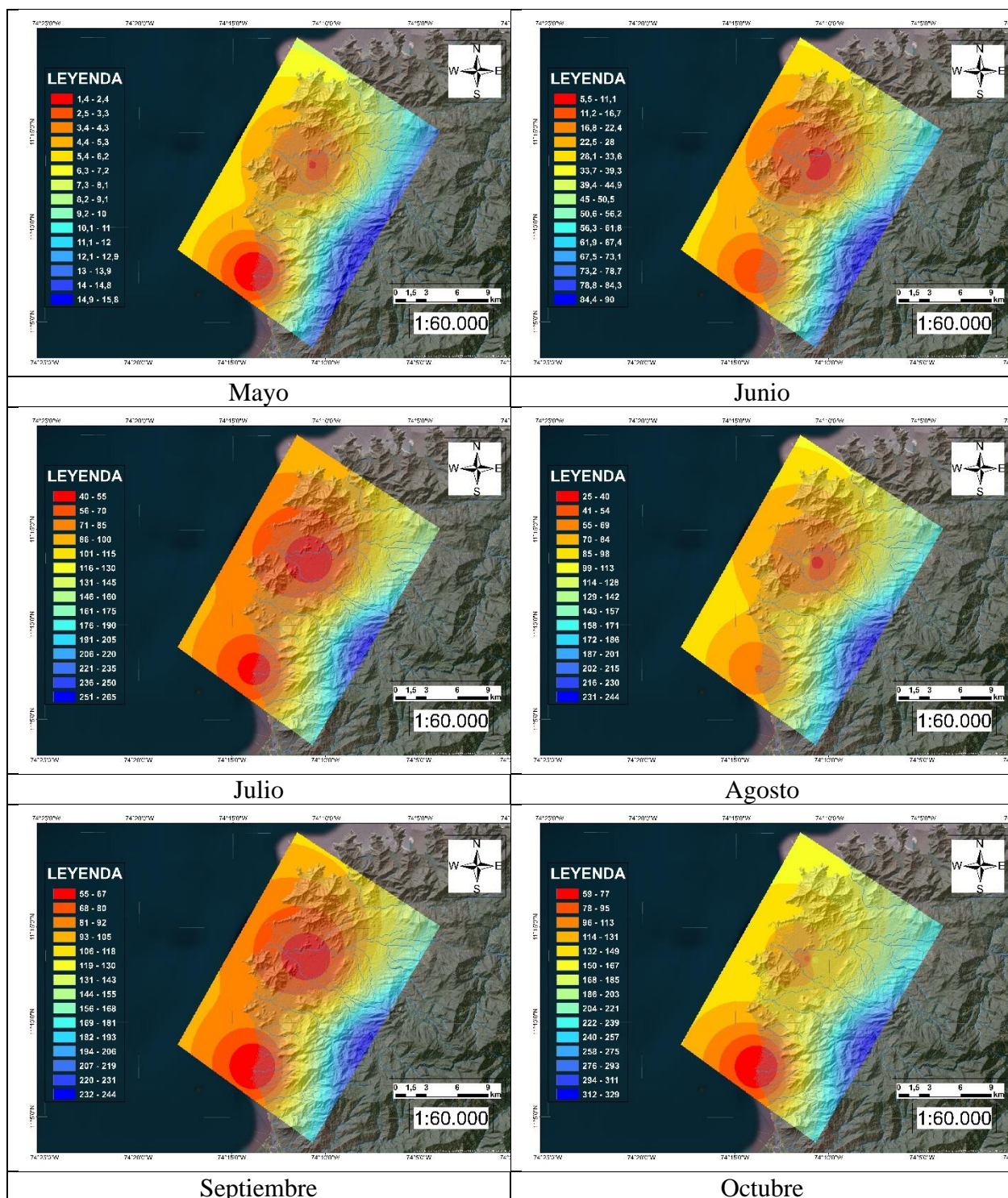
### Precipitación (P)

En la Figura 8 se observan las isoyetas que espacializan las precipitaciones mensuales dentro del área de estudio, estas se obtuvieron a partir de la interpolación IDW. Los ráster mostradas en el mosaico hacen parte fundamental del cálculo de la recarga potencial, ya que con ello se construye el patrón de comportamiento de la distribución de lluvia anual. Tenemos que octubre es el mes con mayores precipitaciones y febrero es el más seco.

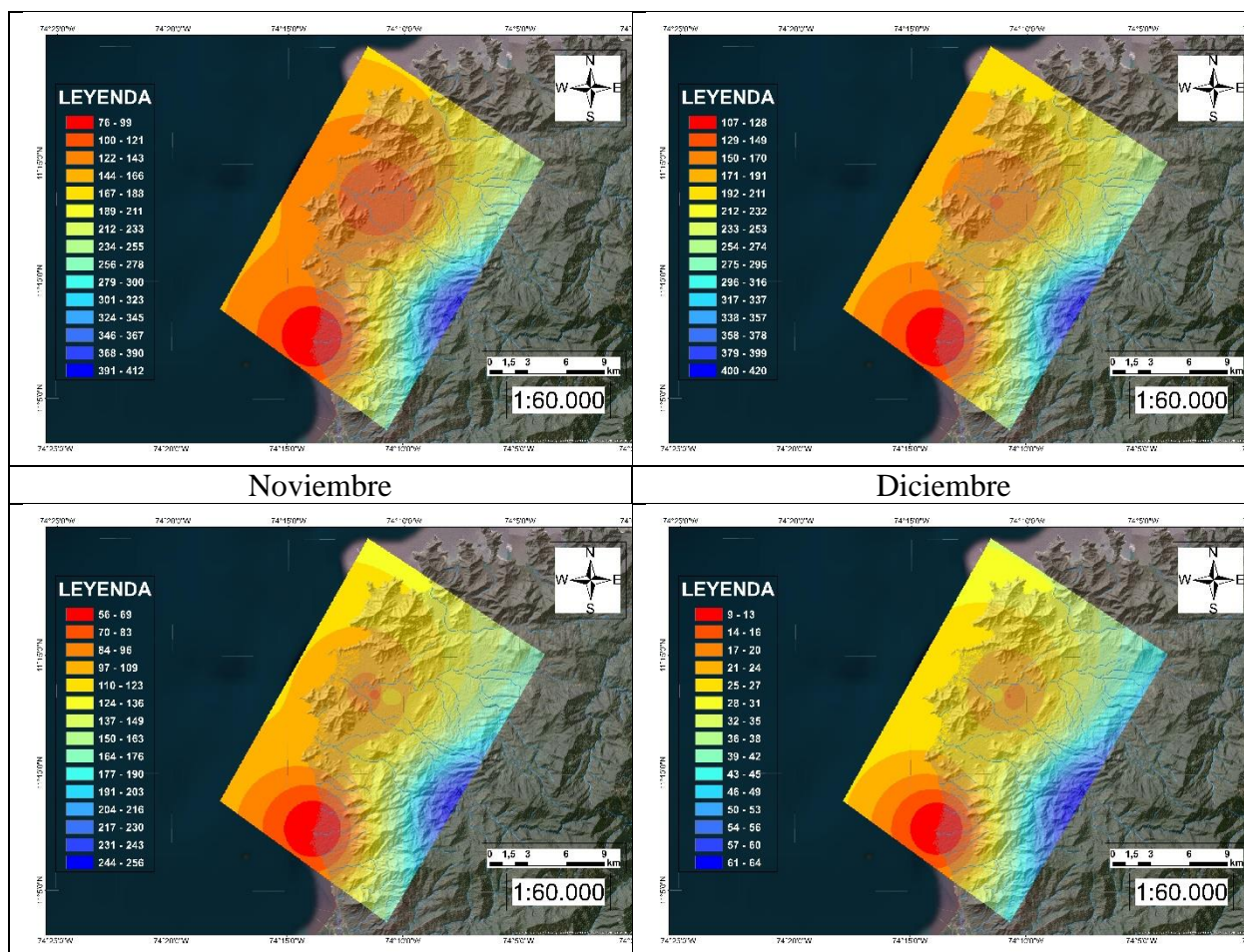
### Figura 8

Mosaico de precipitaciones en mm/mes.









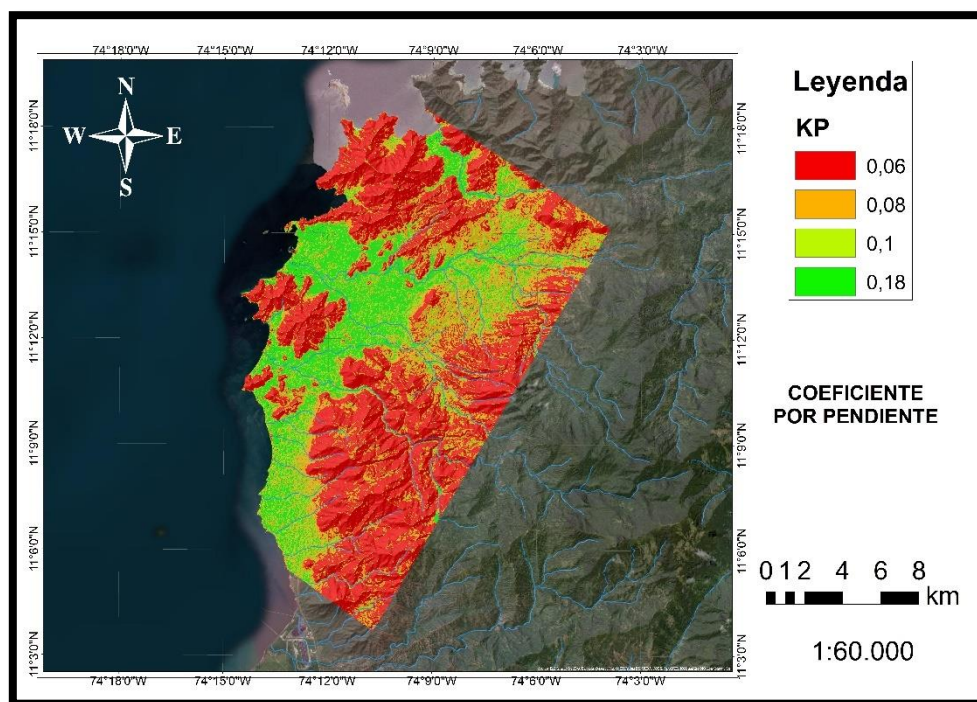
*Nota:* Este mosaico fue extraído de Escobar villar (2022).

### Fracción que Infiltra por Efecto de la Pendiente (Kp)

Este coeficiente nos permite visualizar el aporte de la pendiente a la infiltración de cada zona del área de estudio (ver Figura 9). Este fue obtenido mediante procesamiento de un modelo digital de elevaciones (DEM). En el mapa se confirma que las zonas montañosas son las que mayores valores de Kp debido su pendiente, mientras que la zona del cuaternario es la que posee menores valores al tener un terreno con menor inclinación.

**Figura 9**

*Mapa de la fracción de lluvia que se infiltra debido a la pendiente del área de estudio.*



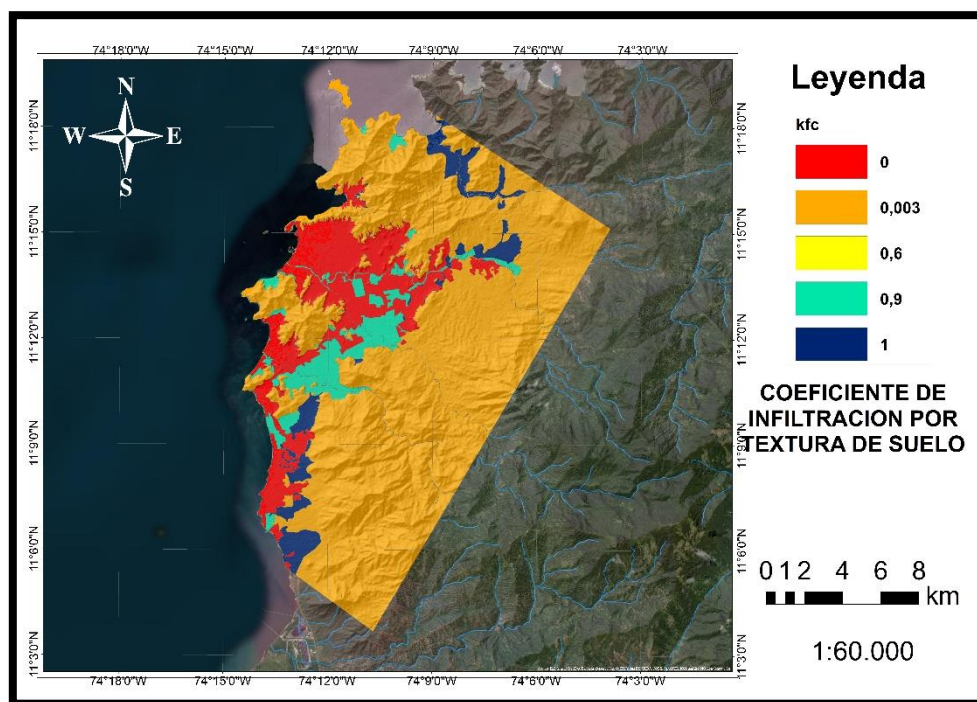
*Nota:* Esta información fue suministrada por Escobar Villar (2022).

### **Fracción que Infiltra Debido a la Textura del Suelo (Kfc).**

Este valor nos permite representar el aporte de las texturas del suelo a la infiltración en el área de estudio (ver Figura 10). Los valores del área de estudio por lo general son muy bajos, debido a que en su mayoría esta constituida por la zona urbana y rocas casi impermeables. Los depósitos del cuaternario son los que mayores valores presentan, que van de 0,9 a 1 que es el máximo valor posible.

**Figura 10**

*Mapa de la fracción de lluvia que se infiltra debido a la textura del suelo del área de estudio.*



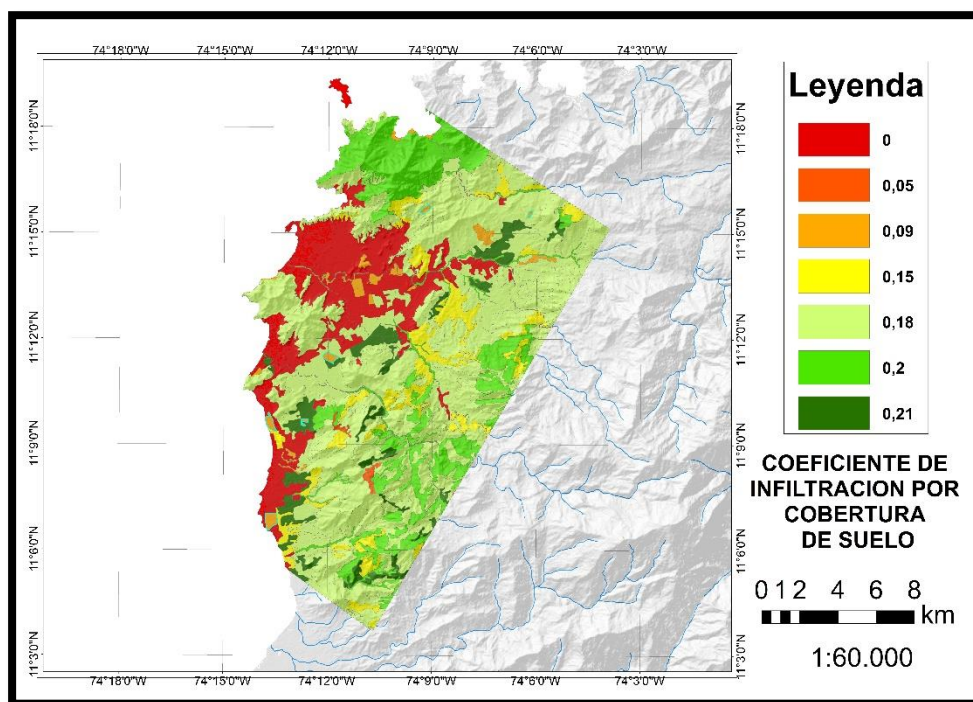
*Nota:* Este mapa fue suministrado por Escobar Villar (2022).

### **Fracción que Infiltra por Cobertura Vegetal ( $K_v$ ).**

En la Figura 11 se observa los aportes a la infiltración debido a las coberturas vegetales. (ver Figura 11 **Figura 10**). Se puede observar que el coeficiente es 0 en la zona urbana al no poseer cobertura vegetal, los mayores valores corresponden a pastos y bosques presentes en el área de estudio.

**Figura 11**

*Mapa de la fracción de lluvia que se infiltra debido a la cobertura del suelo del área de estudio.*



*Nota:* Esta imagen pertenece al Escobar Villar (2022).

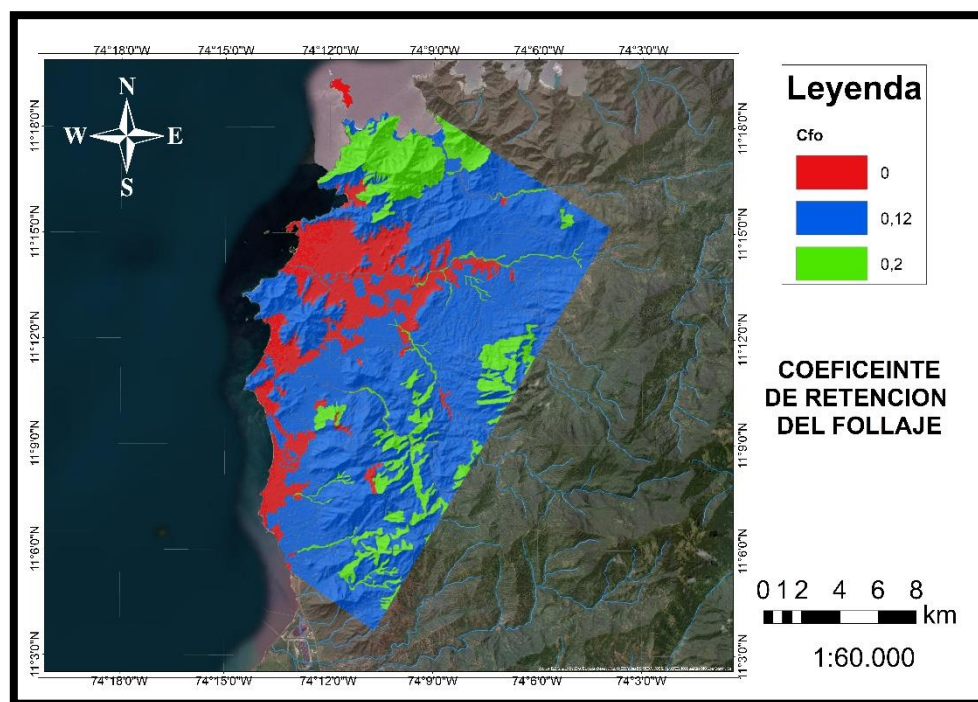
### **La Fracción de Lluvia Interceptada por el Follaje (Cfo).**

Es el coeficiente de retención de aguas lluvias retenidas por el follaje de la vegetación (ver Figura 12). Su importancia radica en que sus resultados representan el valor de retención de las lluvias por efectos de su función biológica en el ecosistema.



**Figura 12**

Mapa del coeficiente de retención por follaje del área de estudio



*Nota:* Esta imagen fue extraída de Escobar Villar (2022)

### Retención (Ret)

Es la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje, para hallarla se aplicará una ecuación dependiendo de las siguientes condiciones:

*Si  $P$  es menor o igual a 5 mm/mes,  $Ret = P$*

*Si el producto  $(P)(Cfo)$  es mayor o igual de 5 mm/mes,  $Ret = (P)(Cfo)$*

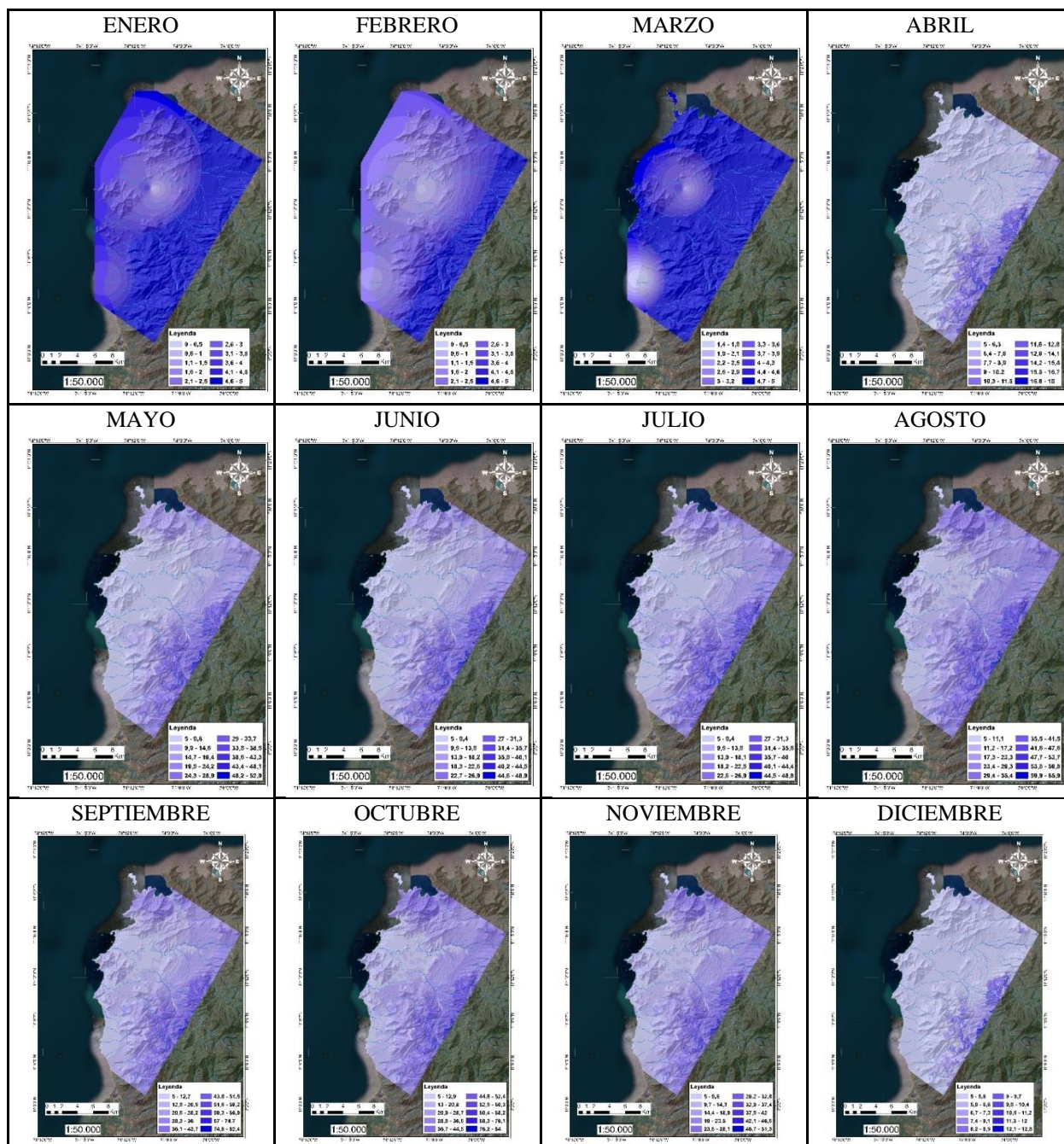
*Si  $P$  es mayor de 5mm/mes y el producto  $(P)(Cfo)$  menor de 5,  $Ret = 5$*

En la retención mensual del área de estudio (ver Figura 13), se presenta una tendencia baja de precipitación interceptada por follaje, salvo en los meses de enero, febrero y marzo, en donde las precipitaciones fueron tan bajas que la retención máxima en esos meses fue de 5

mm/mes. El mes que presento mayor retención fue octubre, debido a las grandes precipitaciones de ese mes.

**Figura 13**

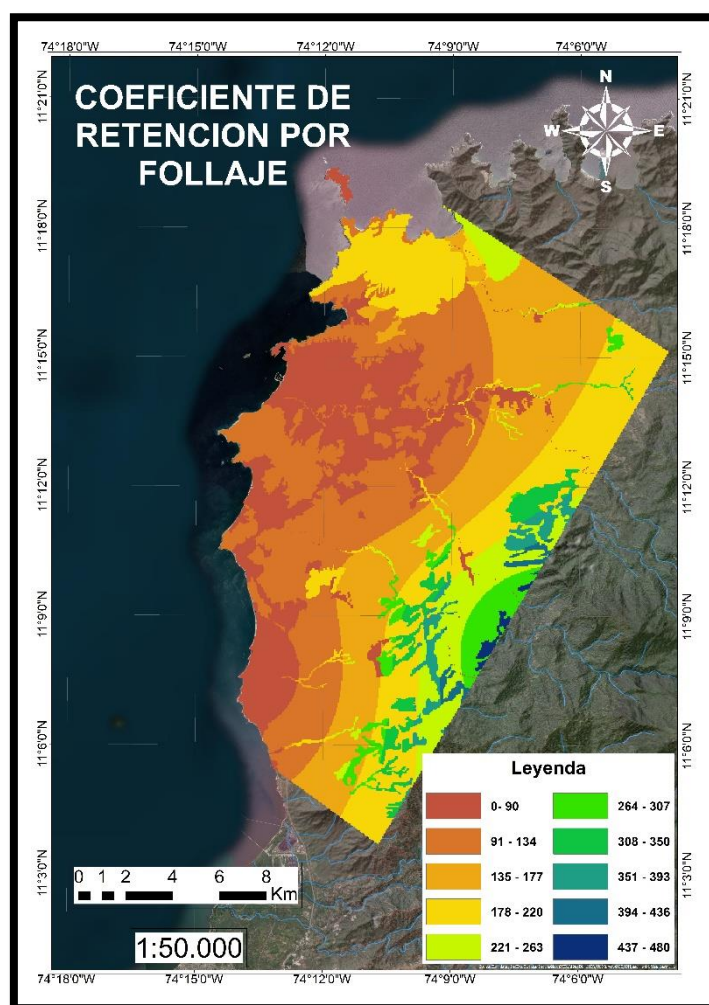
*Mosaico de retenciones por follaje mensuales, en mm/mes.*



En la Figura 14 se observa la retención por follaje en el área de estudio, con unidades de mm/año, las zonas con mayor retención son las que mayores precipitaciones tiene, teniendo una clara relación proporcional. Se destaca la presencia de los bosques con un coeficiente de Cfo de 0,20 que aportan la mayor retención de la zona. Esta figura es el resultado de sumar las retenciones mensuales. En promedio la retención se encuentra entre 78 y 230 mm/año.

**Figura 14**

*Retenciones por follaje total, en mm/año.*



### **Coeficiente de Infiltración (Ci)**

Sumando los mapas que contienen el  $K_p$ ,  $K_v$  y  $K_{fc}$ , descritos anteriormente se obtiene el coeficiente por infiltración del suelo, este es adimensional y se obtiene de una ecuación teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

$$\text{Si } k_p + k_v + k_{fc} \text{ es mayor de } 1, Ci = 1$$

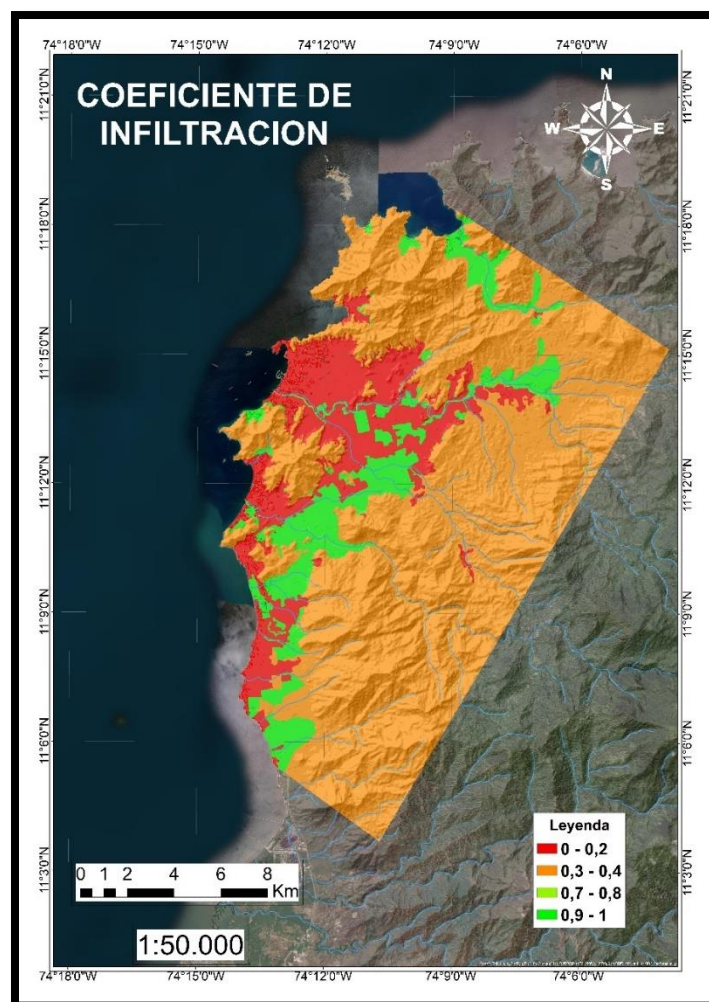
$$\text{Si } k_p + k_v + k_{fc} \text{ es menor o igual a } 1, \text{ entonces } Ci = k_p + k_v + k_{fc}$$

La Figura 15 se encuentran los valores de  $C_i$  del área de estudio, en donde el valor dominante fue el del  $K_{fc}$ . Los mayores valores para estos coeficientes se encuentran en el cuaternario teniendo valores de 0,9 a 1 en donde la pendiente, la textura de suelo y la vegetación aportaron valores altísimos. Para el caso de las montañas a pesar de tener la vegetación que aporta un valor alto de  $k_v$ , su alta pendiente genera que la mayoría de agua se vaya por escorrentía, su  $K_{fc}$  de 0,03 es casi imperceptible y no aporta nada al coeficiente de infiltración.



**Figura 15**

*Coeficiente de infiltración del área de estudio.*



El Ci es el coeficiente por el cual se multiplica la precipitación para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. Teniendo en cuenta que valores que superan 1, son iguales a 1, es decir, el coeficiente de infiltración máximo será igual a 1, siendo este el 100% de precipitación con potencial a infiltrarse.

Para este estudio la zona urbana al ser totalmente impermeable se le asignó un valor de Ci igual a 0, de esta forma las aguas lluvias se irá por escorrentía.

## Infiltración Pluvial Mensual ( $P_i$ )

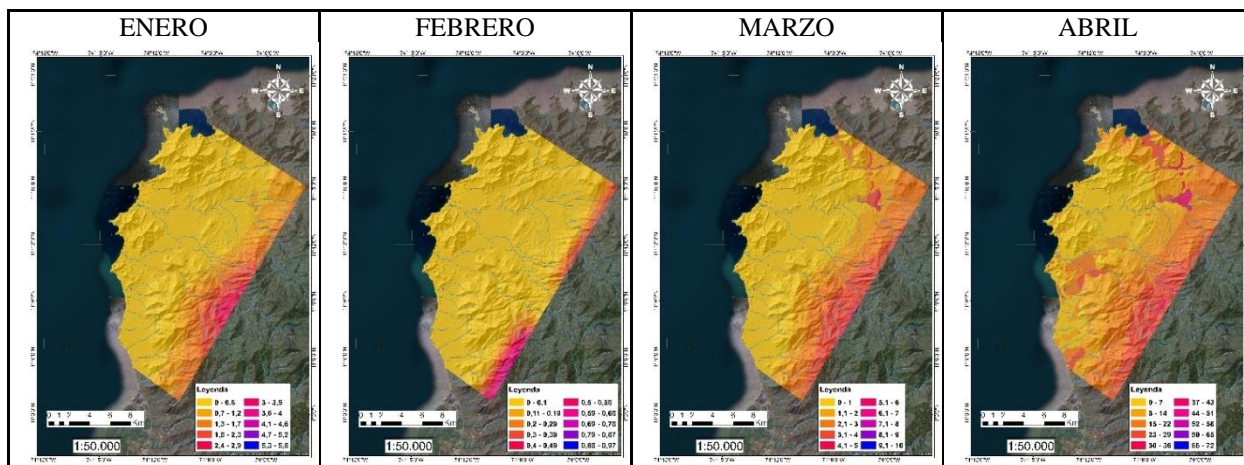
Para hallar la cantidad de agua en mm/mes que se infiltra se utilizará la siguiente ecuación:

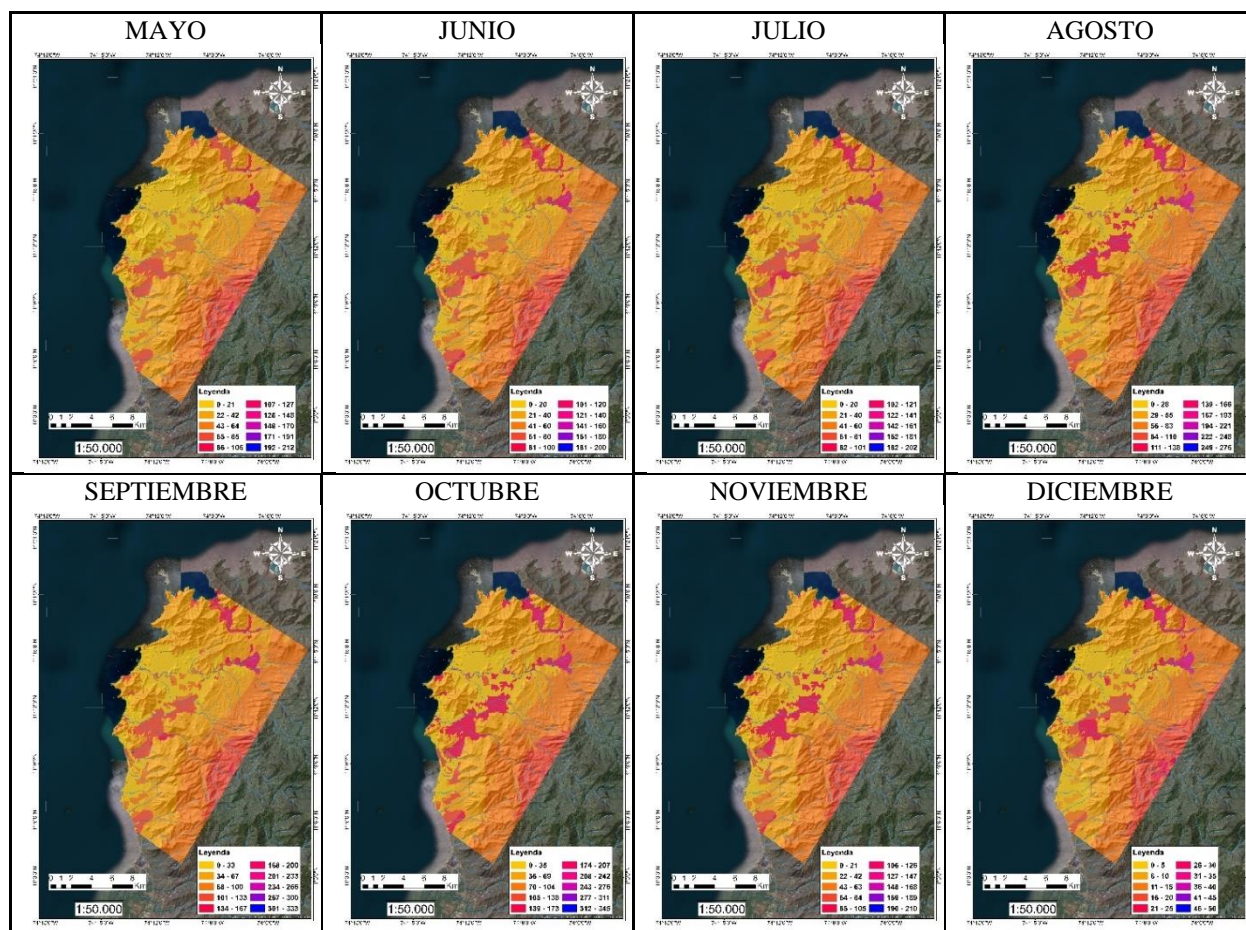
$$P_i = (C_i) (P - Ret)$$

Al estar claramente condicionada por las precipitaciones la mayor infiltración de agua se dará en el mes de octubre. Tal como lo muestra la Figura 16. Teniendo los meses de enero, febrero y marzo los que presentan los menores valores. La precipitación que logra infiltrarse debe pasar por diferentes procesos para poder llegar a alojarse como agua subterránea, en donde debe superar la demanda de las plantas, llevar el suelo a capacidad de campo y la evapotranspiración. El mes con mayor precipitación infiltrada fue octubre.

**Figura 16**

*Mosaico de precipitaciones infiltradas mensualmente, en mm/mes.*

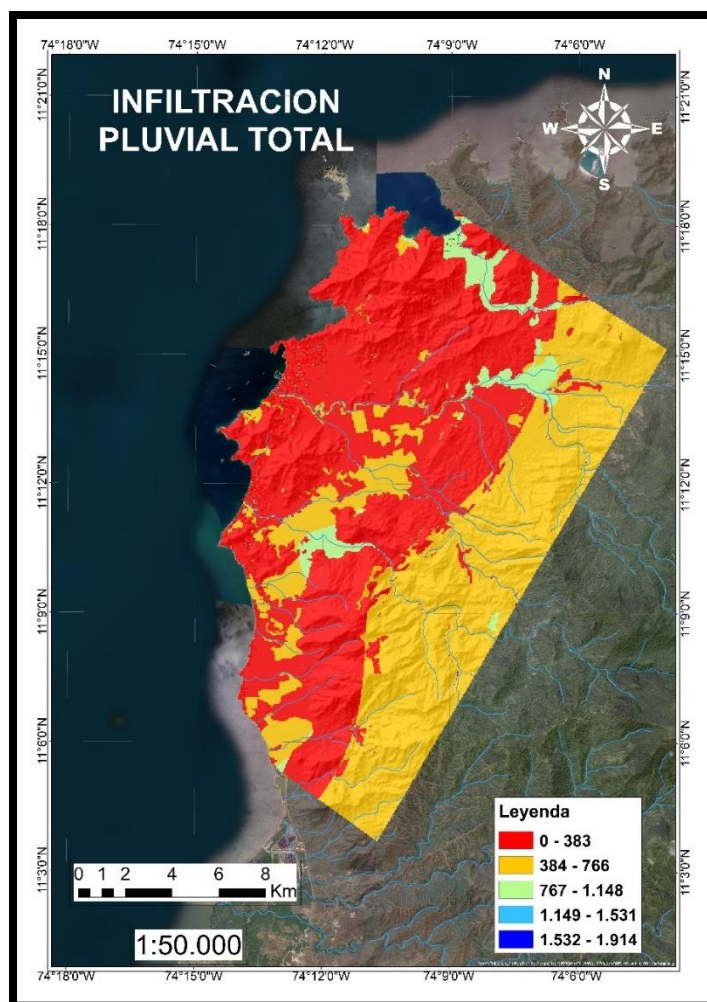




En la Figura 17 se observa el área en donde se infiltran más las aguas lluvias, la cual corresponde a los depósitos del cuaternario, especialmente al conformado por abanicos y gravas. A pesar de tener un bajo Ci el Batolito de Santa Marta según la metodología de Schosinsky N., puede llegar a infiltrar una considerable cantidad de agua, debido al alto coeficiente de  $K_v$ , para que esto ocurriese fue necesario tener las más grandes precipitaciones en el área de estudio. El promedio de agua que se infiltra al año es de 370 mm/año.

**Figura 17**

*Infiltración pluvial total, en mm/año.*



### Escorrentía Superficial (ESC)

Es la precipitación que no llega a infiltrarse y por la gravedad llega a la red de drenaje dada en mm/mes, para hallarla se utiliza la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - Pi$$

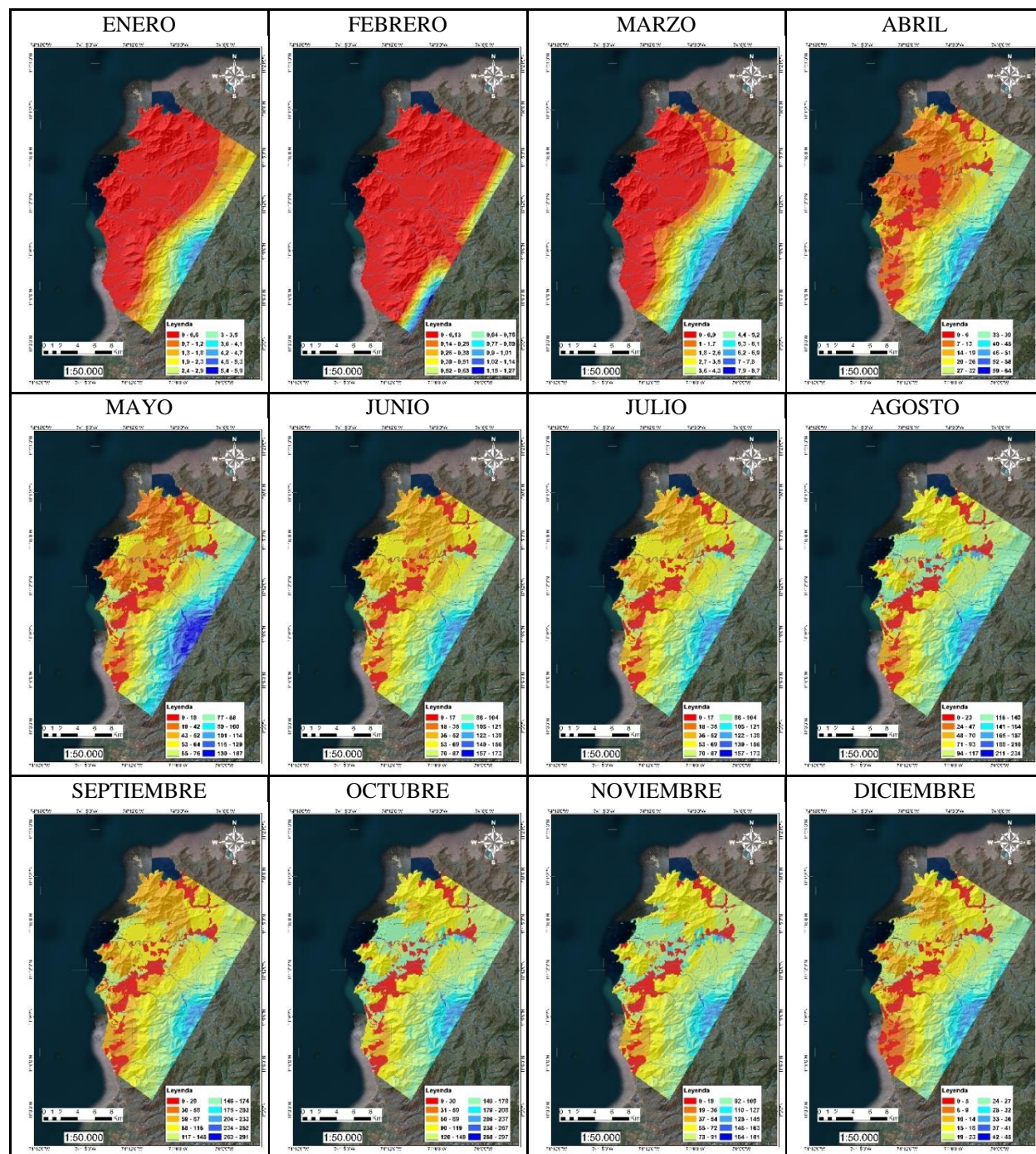
En la Figura 18 se puede observar la escorrentía superficial mensual, los valores de los meses de enero, febrero y marzo son bastante bajos, debido a que la precipitación es poca, en consecuencia, la mayoría de las lluvias son interceptadas por el follaje. En el resto de meses se



presenta un patrón, que vario acorde a la precipitación. En donde este último influye en que octubre sea el mes con mayor escorrentía superficial.

**Figura 18**

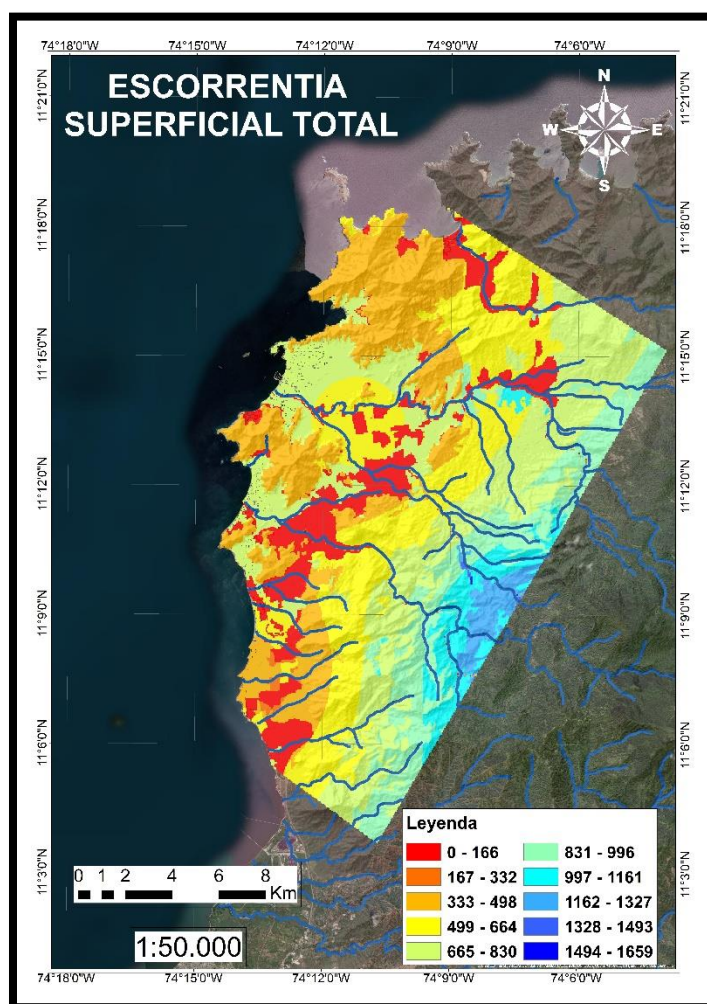
*Mosaico de escorrentías superficiales mensuales, en mm/mes.*



En la Figura 19 se observa la escorrentía superficial en mm/año, es directamente proporcional a la pendiente, teniendo los menores valores en los depósitos del cuaternario y los mayores en las montañas. En promedio la escorrentía se encuentra entre los valores de 317 y 889 mm/año. De los coeficientes obtenidos, se obtuvo que cerca del 100% de las precipitaciones en los depósitos del cuaternario se infiltraban, es decir, los valores de escorrentía en esa zona son 0, siendo este un valor irreal.

**Figura 19**

*Escorrentía superficial total en mm/año.*



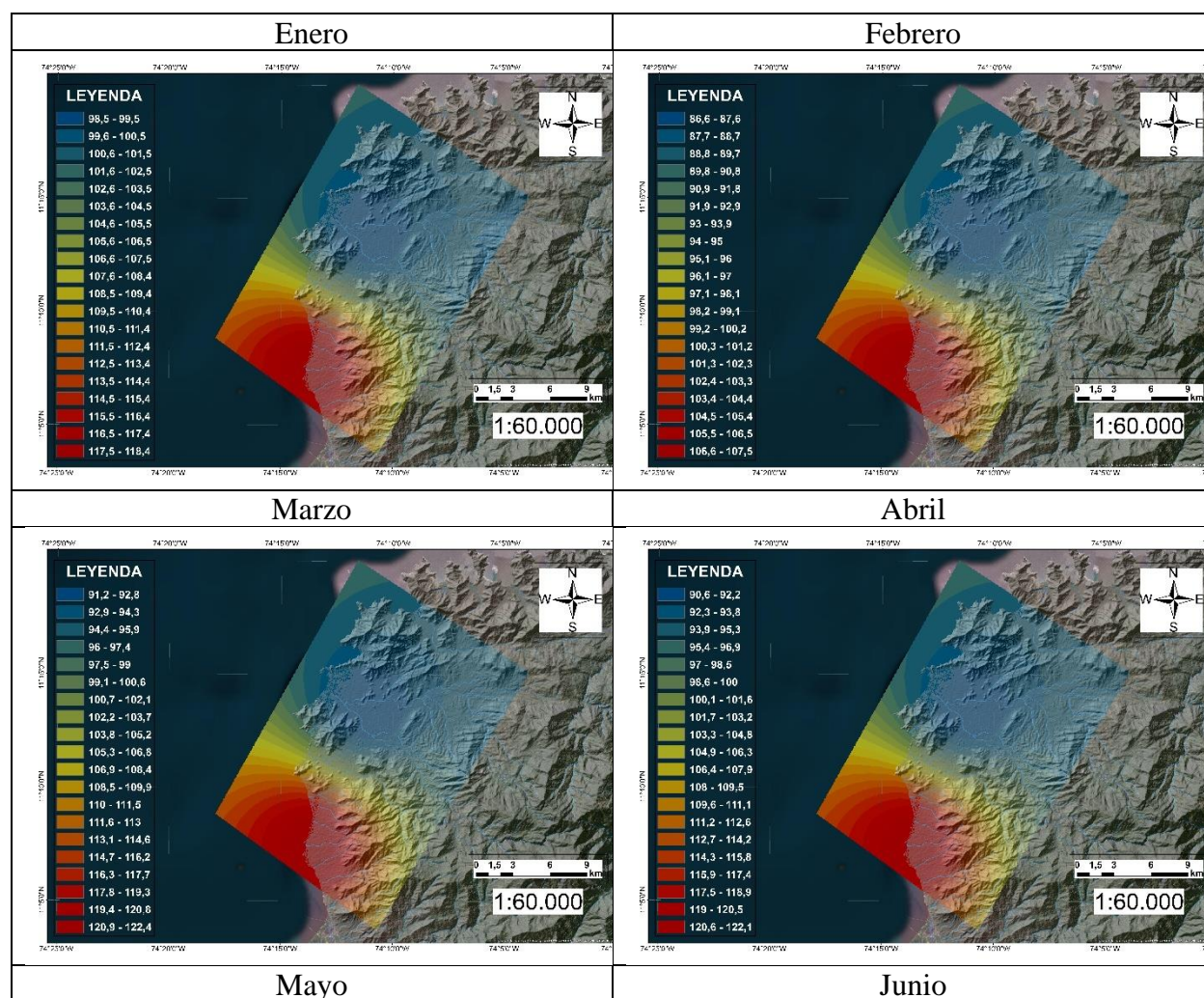
## Evapotranspiración Potencial (ETP)

Representa las salidas en el balance hídrico, en contraste con la precipitación infiltrada.

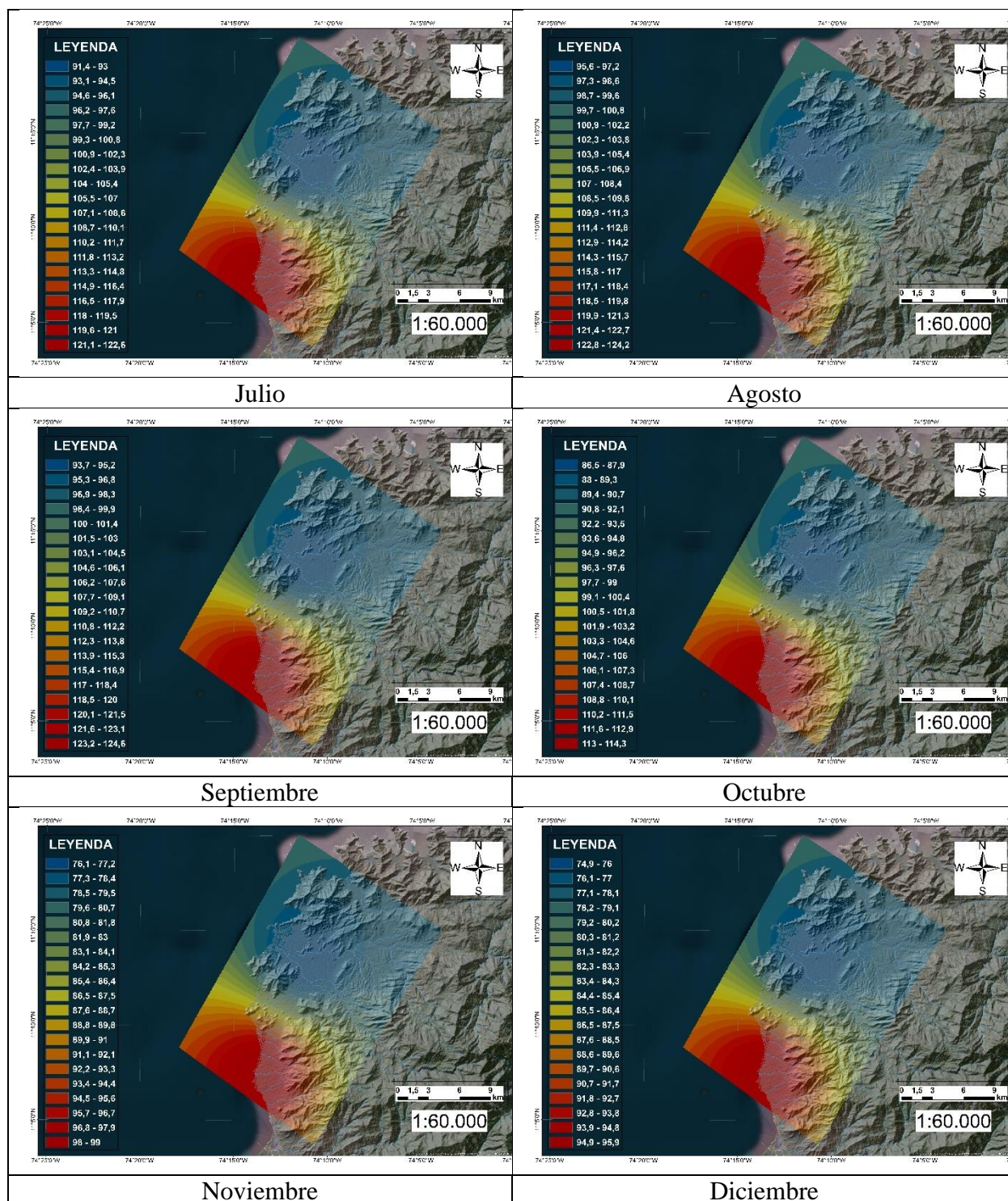
Es la cantidad de agua en mm que la planta transpira más lo que se evapora. Este factor es dependiente a la temperatura. En la Figura 20 se puede observar las distribuciones mensuales de ETP dentro del área de estudio. Para determinar estos datos se utilizó la metodología de Thornthwaite, en donde tiene en cuenta la temperatura y el brillo solar.

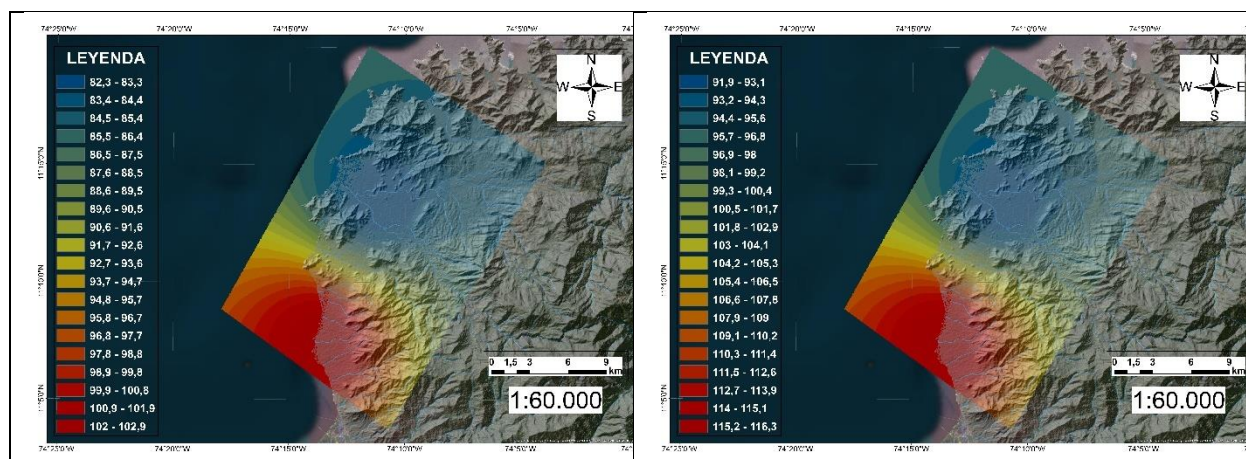
**Figura 20**

*Mosaico de Evapotranspiración potencial mensual en mm/mes.*









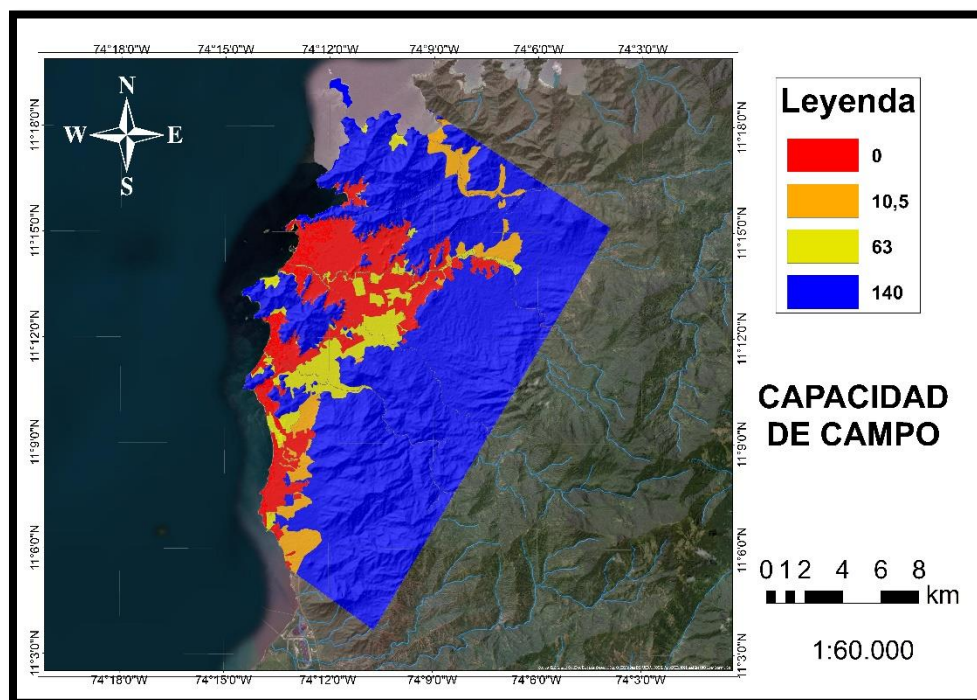
*Nota:* Este mosaico fue extraído de Escobar Villar (2022).

### Capacidad de Campo (CC)

Es la máxima humedad que un suelo podría llegar a tener, sin ser considerado en saturación, esta distribución se puede observar en la Figura 21. En este estado las plantas tienen la capacidad de transpiración máxima.

**Figura 21**

*Mapa de capacidad campo del área de estudio en mm.*



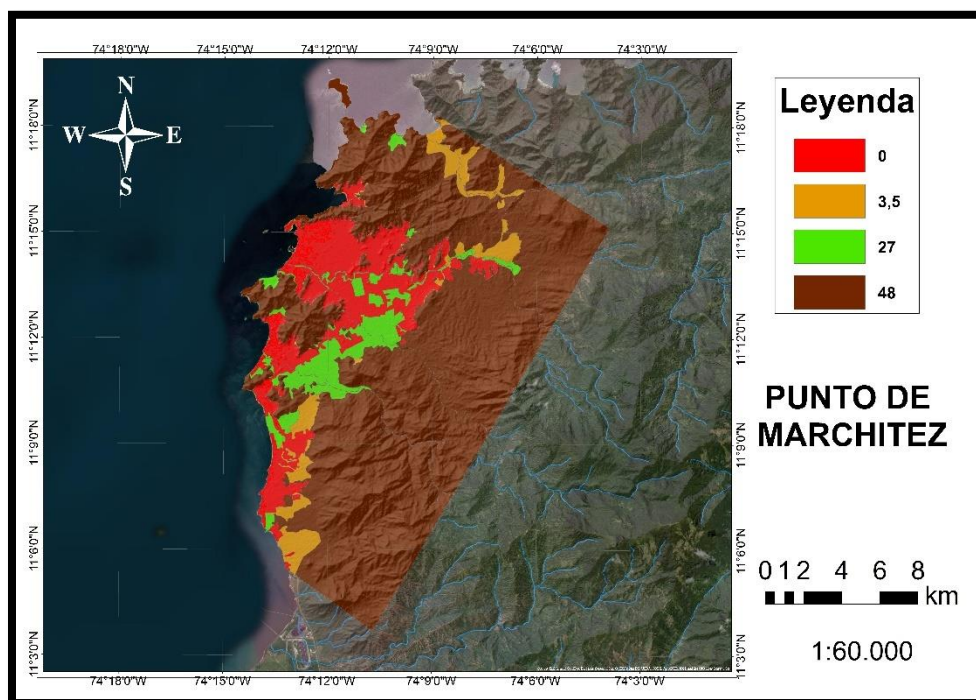
*Nota:* esta información fue suministrada por Escobar Villar (2022).

### **Punto de Marchitez (Pm)**

Es la mínima humedad a la que podría llegar un suelo antes que su vegetación muera. En la Figura 22 se encuentra la distribución de este parámetro, para el área de interés.

### **Figura 22**

*Mapa de punto de marchitez del área de estudio en mm.*



*Nota:* Este mapa pertenece a Escobar Villar (2022).

### **Humedad inicial (HSi)**

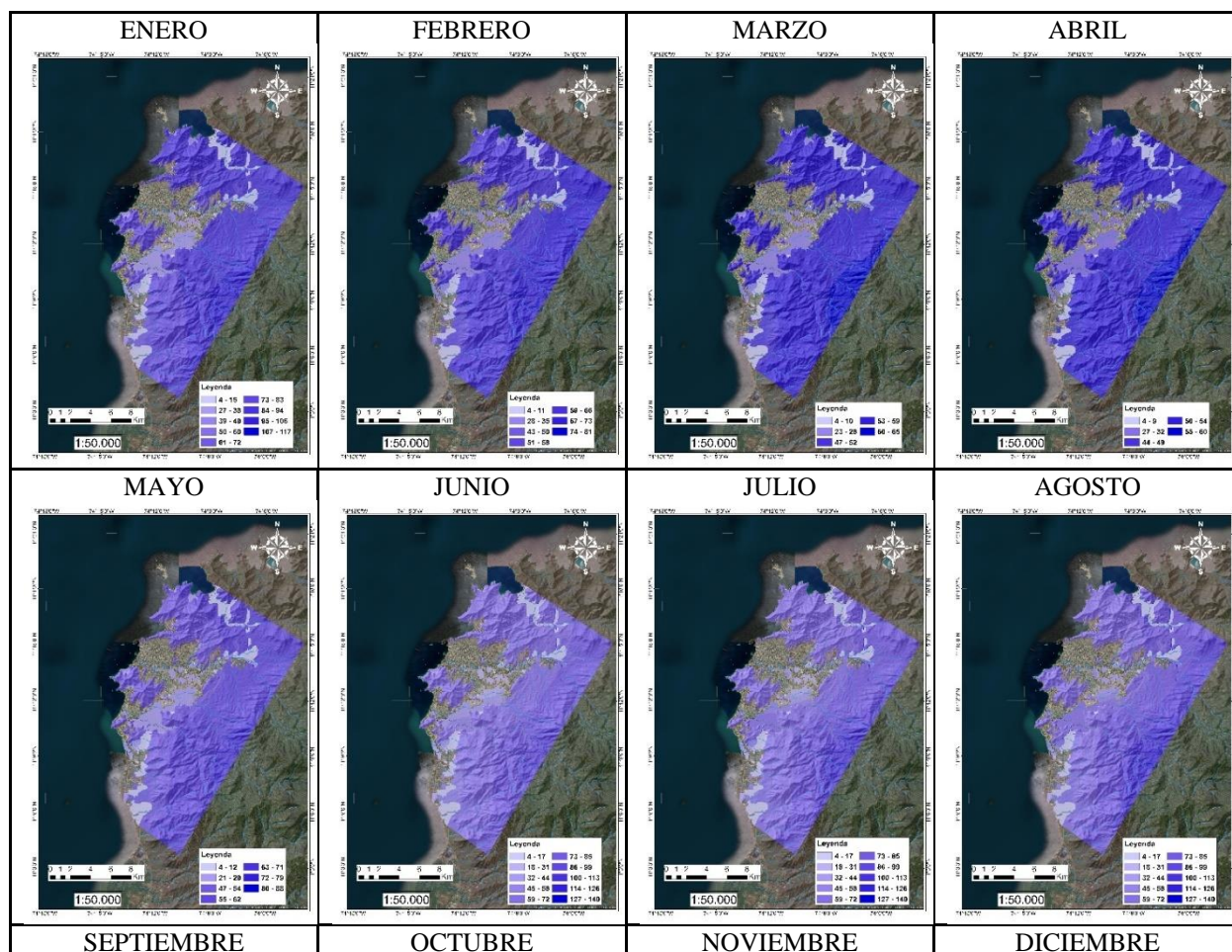
Representa la humedad al inicio de cada mes (ver Figura 23), que es igual a la humedad final de cada mes, si no se tiene se procede mediante el criterio empleado por Schosinsky N. (2006), en donde se observa los meses consecutivos con mayores precipitaciones, al mes siguiente de los analizados se le asigna un valor de humedad inicial igual a la capacidad de campo. Para este caso los meses consecutivos que tuvieron las mayores precipitaciones fueron

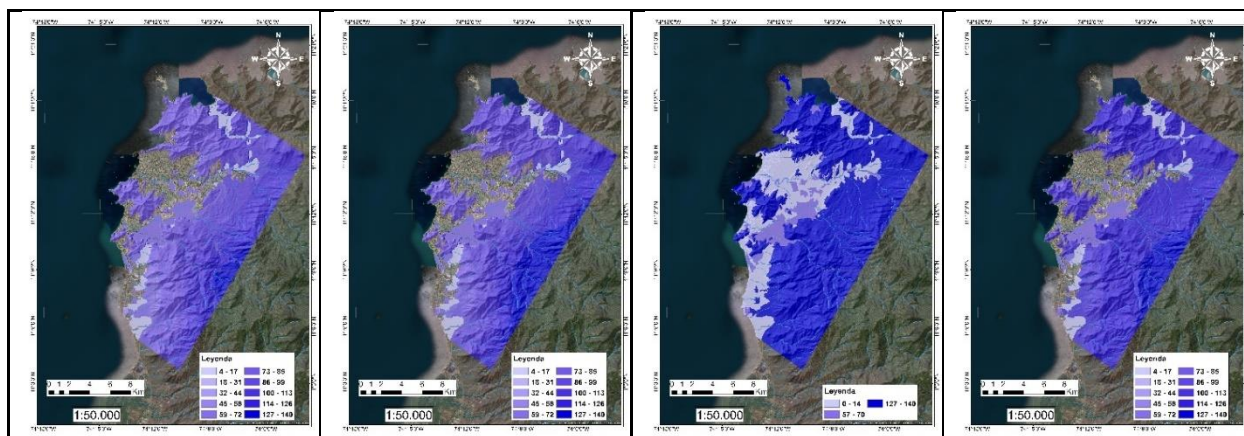


agosto, septiembre y octubre. Por ello para este estudio se le asignara al mes de noviembre una humedad inicial igual a la capacidad de campo. Al final de esta secuencia la humedad final de octubre debe ser idéntica a la capacidad de campo. Se destaca que la humedad inicial más alta se presentó en el mes inicial del cálculo, noviembre.

**Figura 23**

*Mosaico de la humedad inicial para cada mes en mm/mes.*





### Coefficiente de Humedad (C1)

Es el coeficiente de humedad al final del mes sin considerar la evapotranspiración. En caso de ser inferior a 0 se igualará a 0, y si es mayor a 1 se igualará a 1. La ecuación para hallarlo es la siguiente:

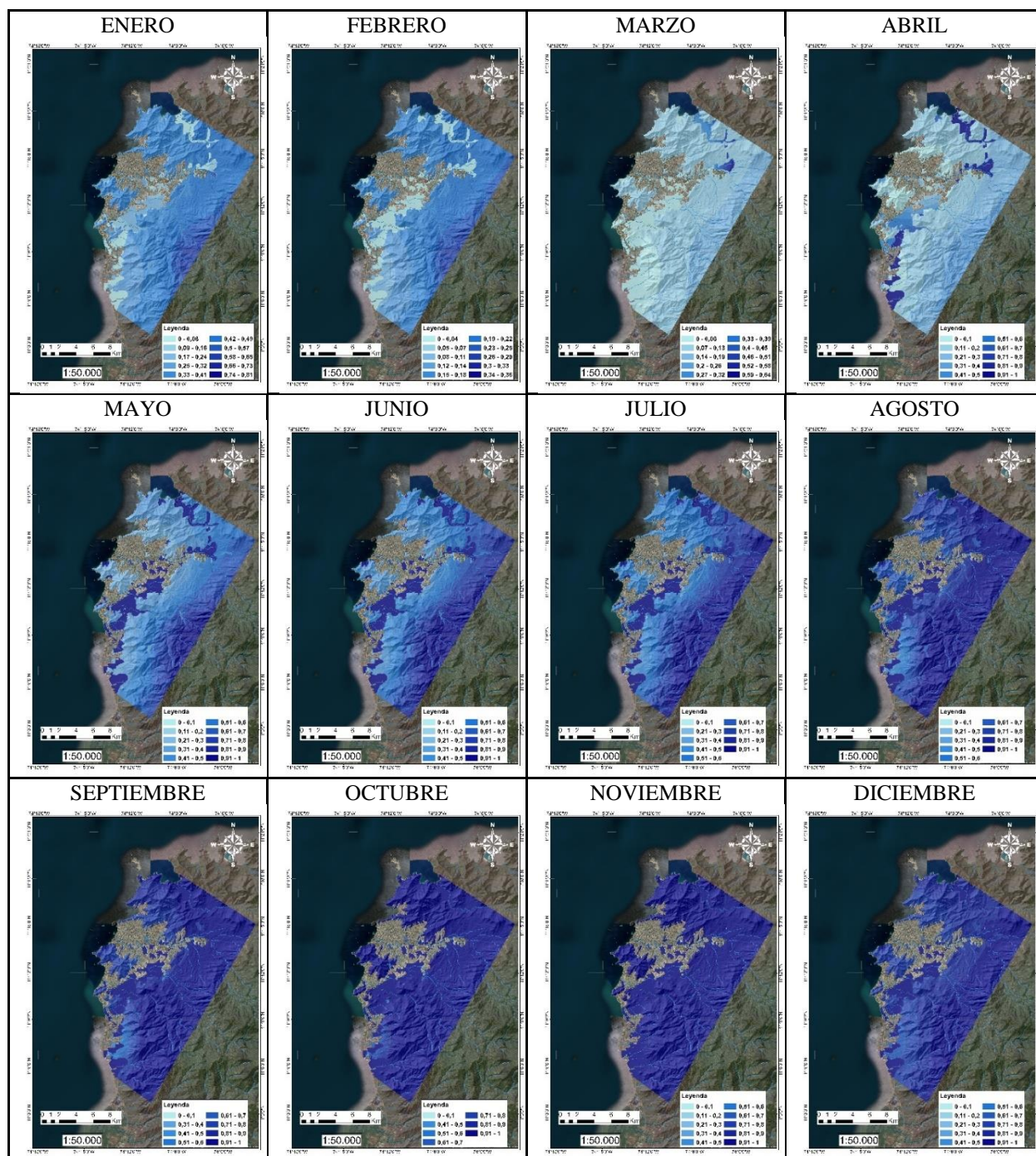
$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC - PM)$$

Se puede observar en la Figura 24 que en los primeros meses del año el coeficiente C1 es bastante bajo, especialmente en la zona de los depósitos del cuaternario y con datos medios en las montañas, pero esta tendencia se invierte en los meses siguientes, en donde los valores cercanos a 1 están en los depósitos.



Figura 24

*Mosaico del coeficiente de humedad C1 para cada mes.*



## Evapotranspiración Potencial Real (Etr1)

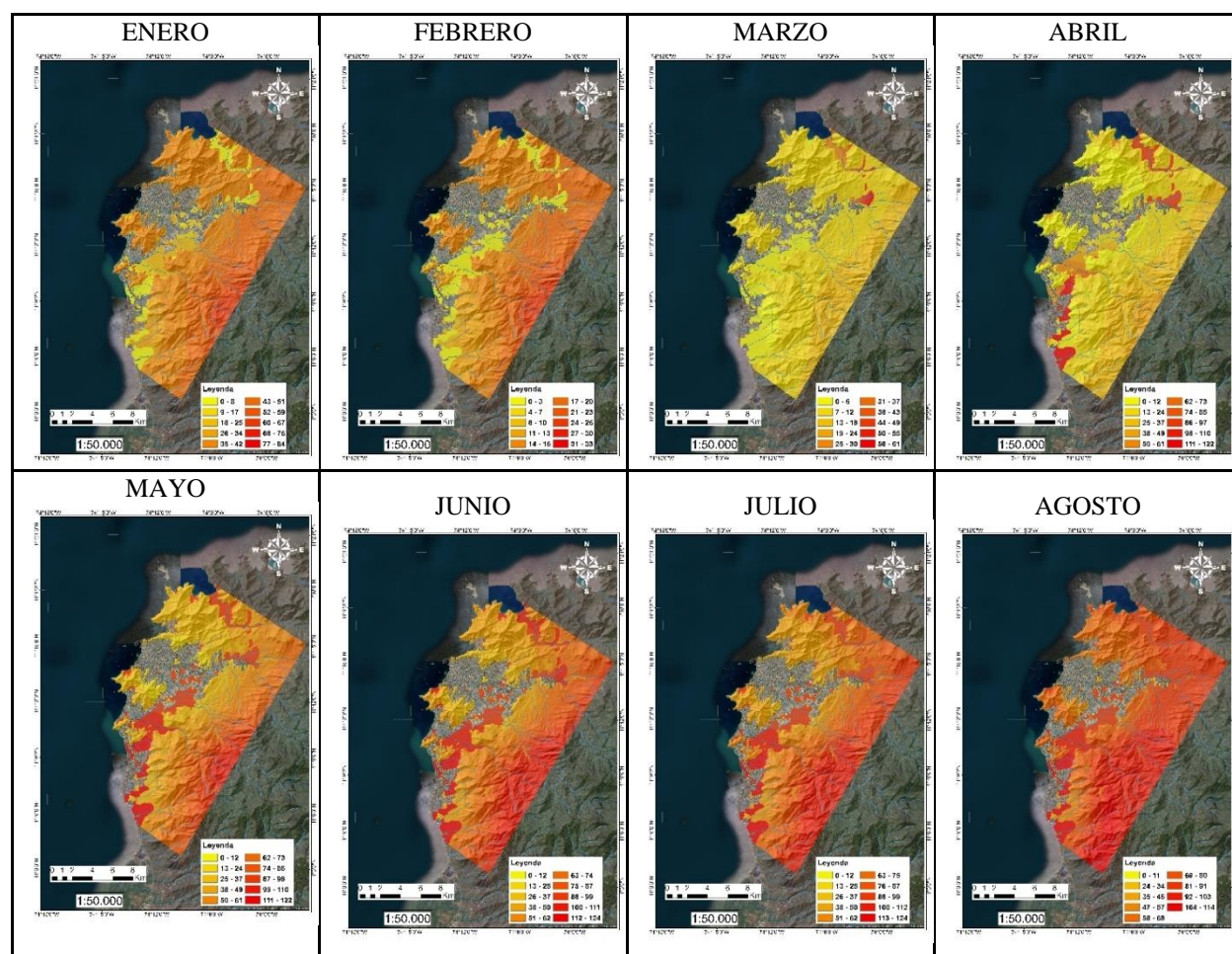
Tiene en cuenta el valor de C1 y es necesario para hallar en C2, está dada en mm/mes, y se halla mediante la siguiente ecuación:

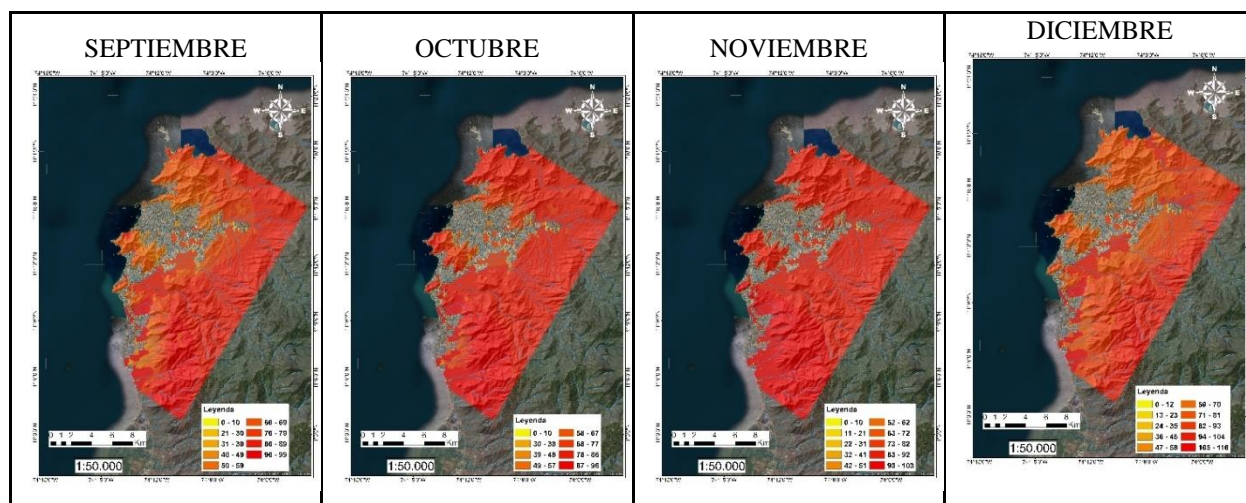
$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

De la Figura 25 se observa la evapotranspiración potencial real mensual, en donde los valores con tonalidades rojas son los mayores, y con tonalidades amarillas inferiores. Se puede observar que la relación que hay entre estos valores y la precipitación que puede infiltrarse mensualmente, ya que, a mayor infiltración mayor potencial de evapotranspiración.

**Figura 25**

*Mosaico de evapotranspiración potencial real para de cada mes, en mm/mes.*





### Coefficiente de Humedad (C2)

Es el coeficiente de humedad al final del mes que tiene en cuenta la evapotranspiración. En caso de ser inferior a 0 se igualará a 0, y si es mayor a 1 se igualará a 1. La ecuación para hallarlo es la siguiente:

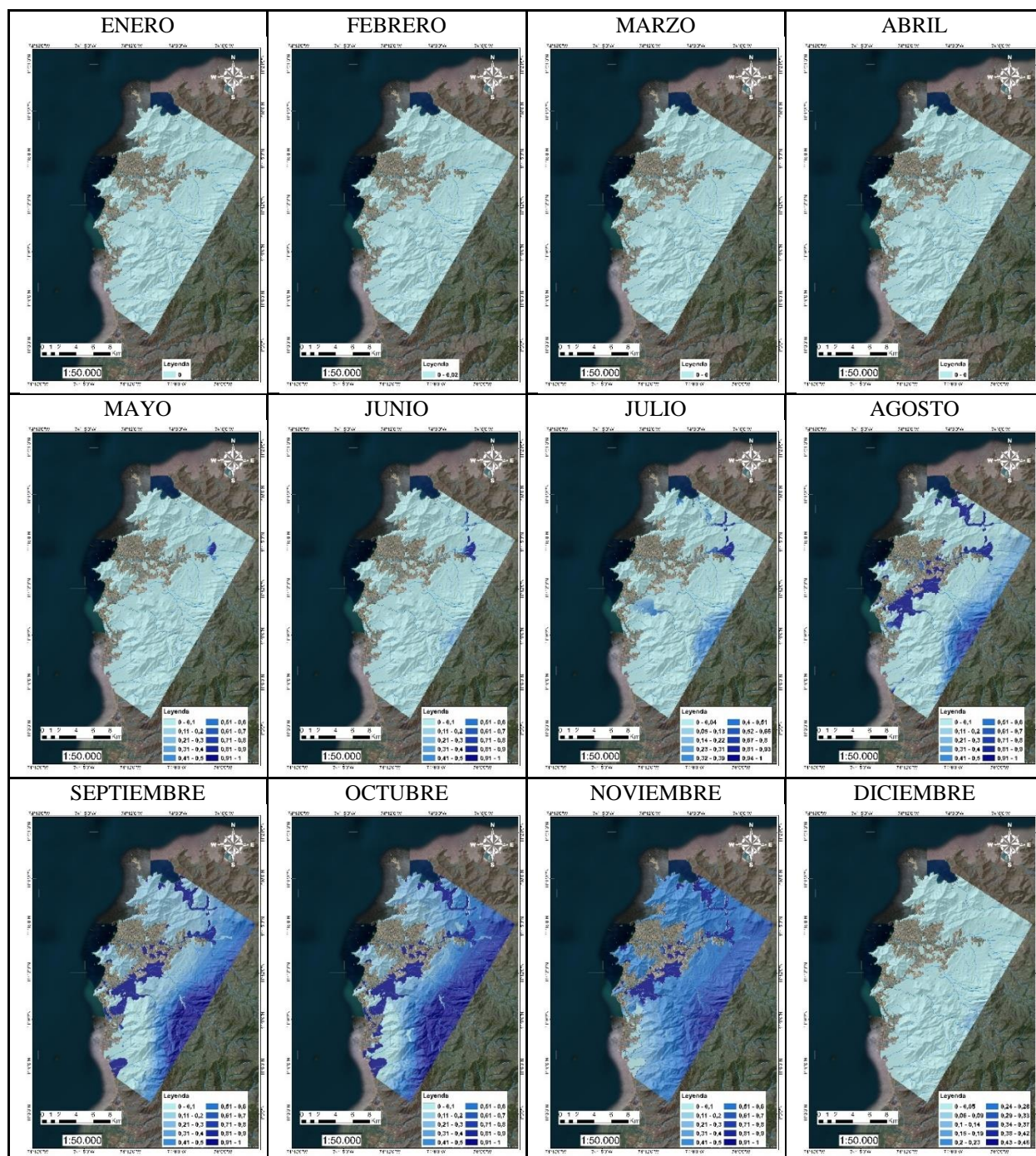
$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM)$$

En la Figura 26 se puede ver que en los meses de enero a junio el coeficiente C2 es 0, y solo a partir de agosto se puede apreciar un aumento significativo. Esto se debe a los bajos valores obtenidos de humedad del suelo y precipitación infiltrada, que en esos meses no logra satisfacer todas las necesidades. Se presenta un gran cambio entre los coeficientes C1 y C2, debido a la inclusión de la evapotranspiración, dentro del análisis.



Figura 26

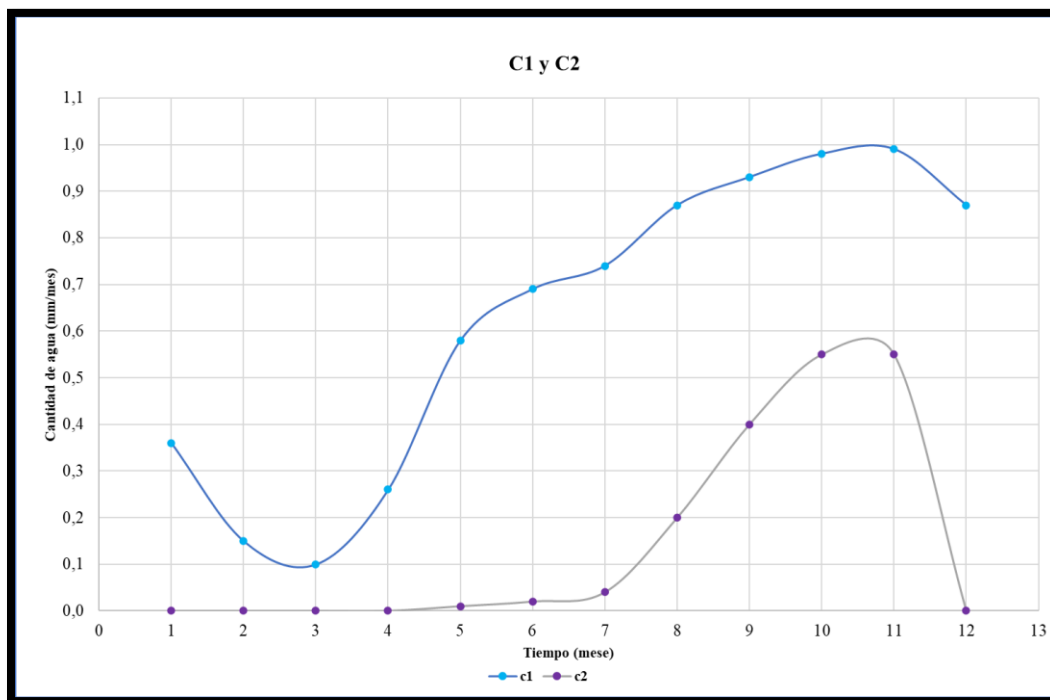
Mosaico del coeficiente de humedad C2 de cada mes.



Hay una diferencia muy marcada en los coeficientes de humedad (ver Figura 27), en donde el C2 tiene valores inferiores a 0,1 por 8 meses, a diferencia del C1 que no los tiene. Esto se debe a que el C2 incorpora la evapotranspiración.

**Figura 27**

*Comparación C1 y C2.*



### Evapotranspiración Real Tentativa Promedio (ETPR)

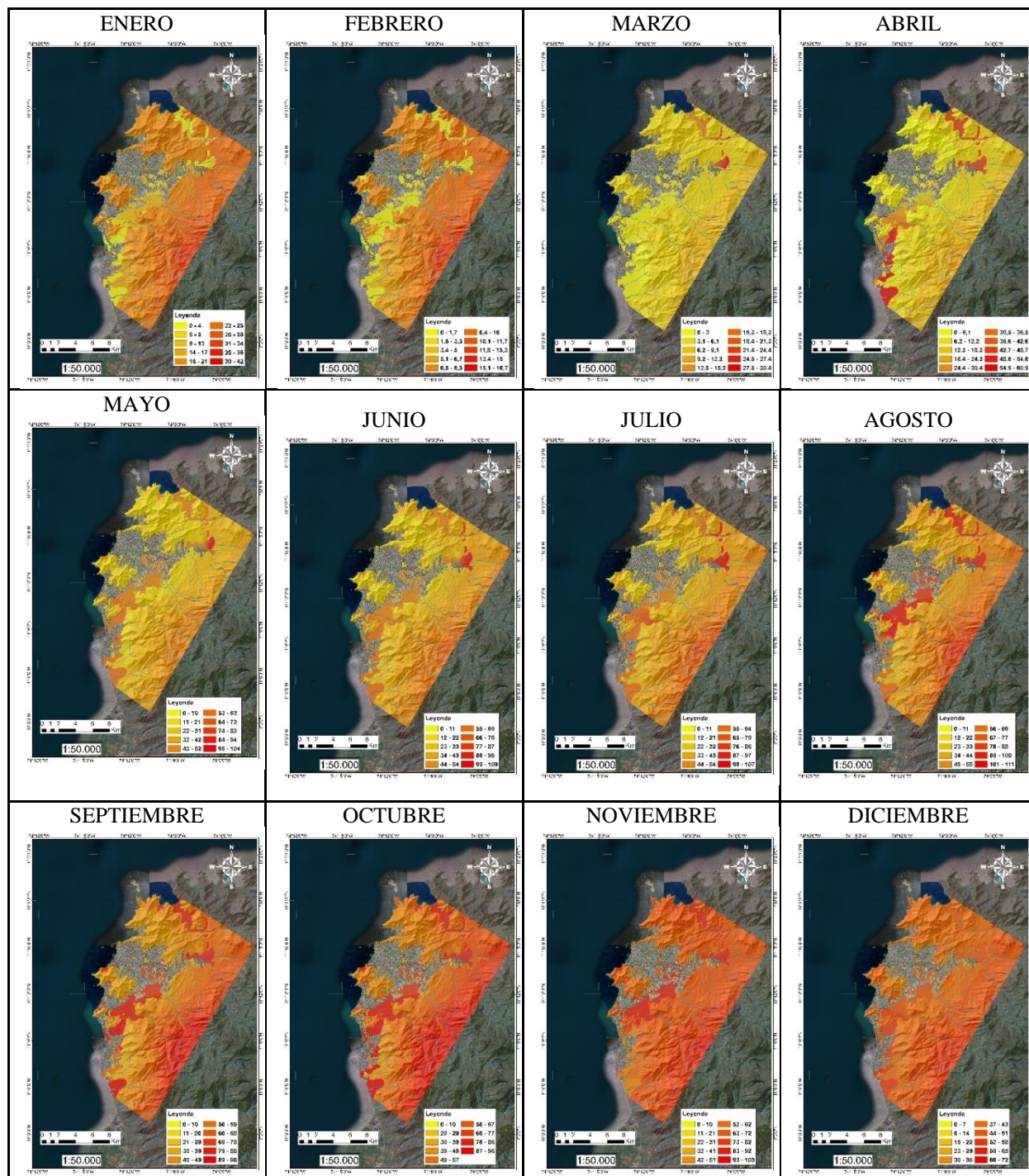
Es el promedio entre C1 y C2, multiplicado por el ETP, se encuentra en unidades de mm/mes y se calcula con la siguiente formula:

$$ETPR = ((C1+C2)/2) ETP$$

Según la Figura 28 los valores más altos de ETPR se encuentran en los meses de agosto a diciembre, presentándose los mayores valores en los depósitos del cuaternario.

Figura 28

Mosaico de evapotranspiración real tentativa promedio para de cada mes, en mm/mes.





## Humedad Disponible (HD)

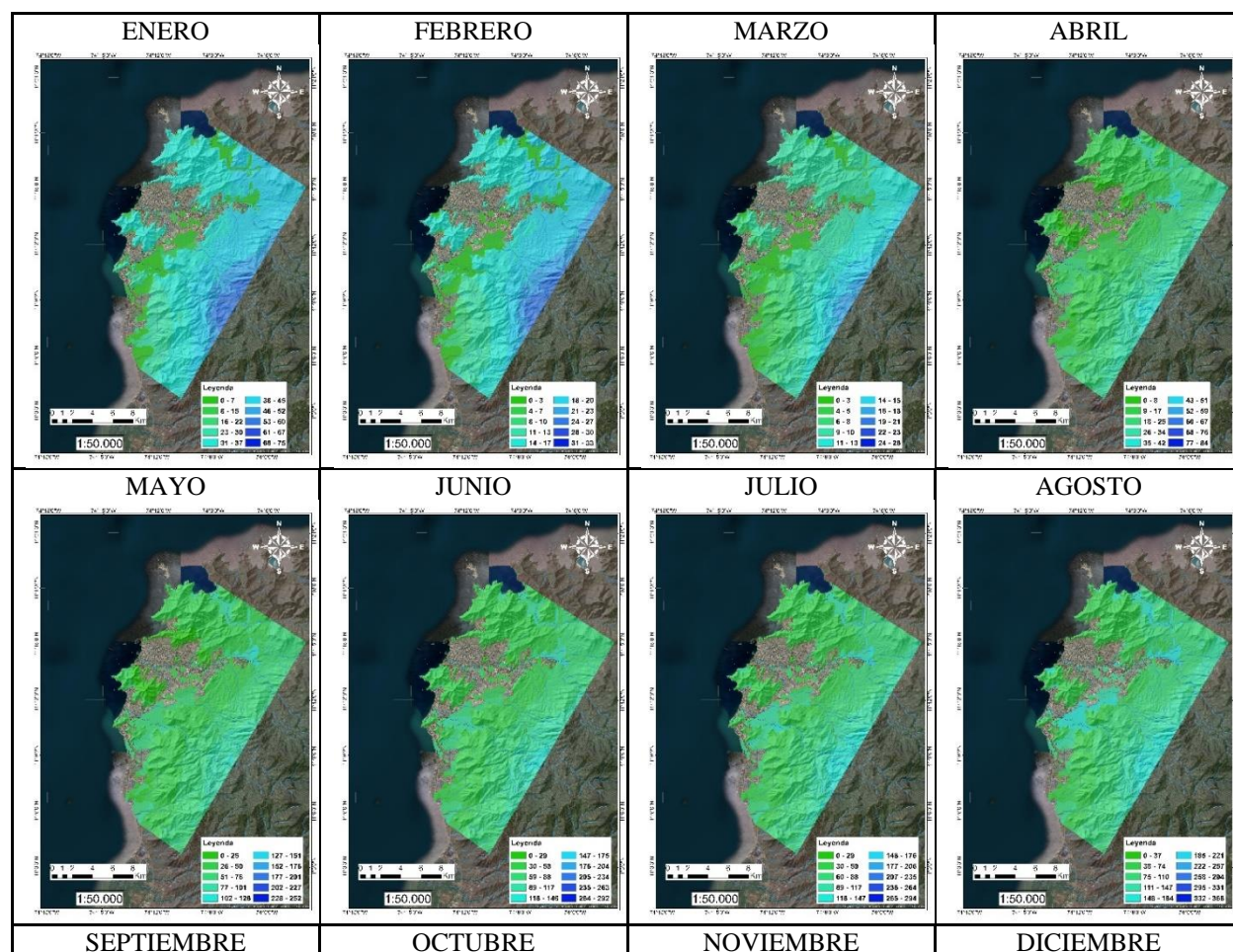
Es la humedad que las raíces de las plantas pueden tomar para tener la capacidad de evapotranspirar, está dada en mm/mes. La ecuación para hallarla es la siguiente:

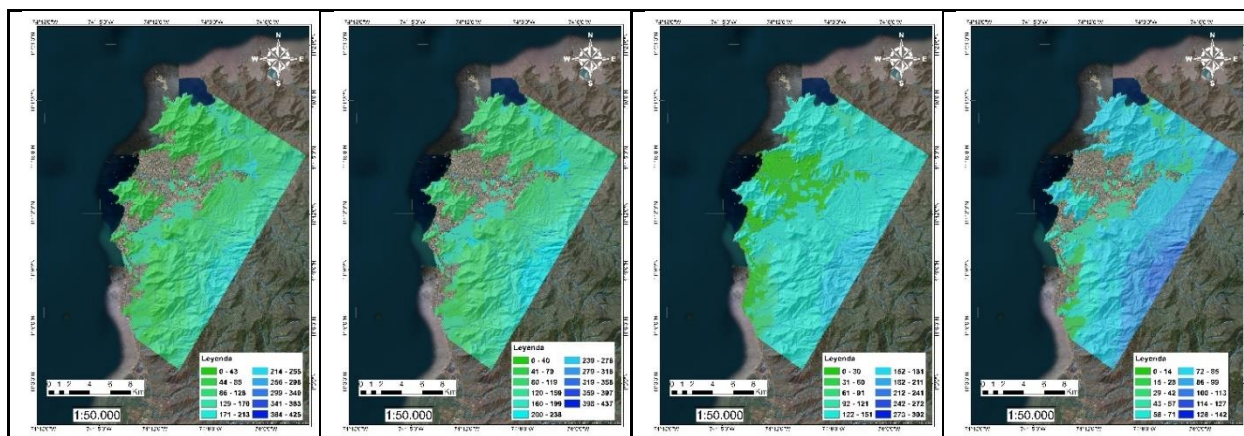
$$HD = HSi + Pi - PM.$$

En la Figura 29, las tonalidades de azul representan valores altos de humedad disponible y verdes para bajos valores. Los primeros meses son los menores, ya que la infiltración, es baja mientras los meses con mayor infiltración son los que tienen los valores de humedad más altos.

**Figura 29**

*Mosaico de humedad disponible para de cada mes, en mm/mes.*





### Evapotranspiración Real Promedio (ETP)

Tiene en cuenta la humedad disponible, en donde si esta es inferior al ETPR las plantas no podrán evapotranspirar la demanda del ETPR, por lo que solo se evapotranspirara el valor de HD, y cuando esta es superior el valor del ETPR podrá consumir su lo requerido. Por lo que solo se puede evapotranspirar cuando hay humedad. El anterior análisis se resume en las siguientes condiciones para determinar el ETR dado en mm/mes.

*Si ETPR es menor o igual a HD,  $ETR = ETPR$ .*

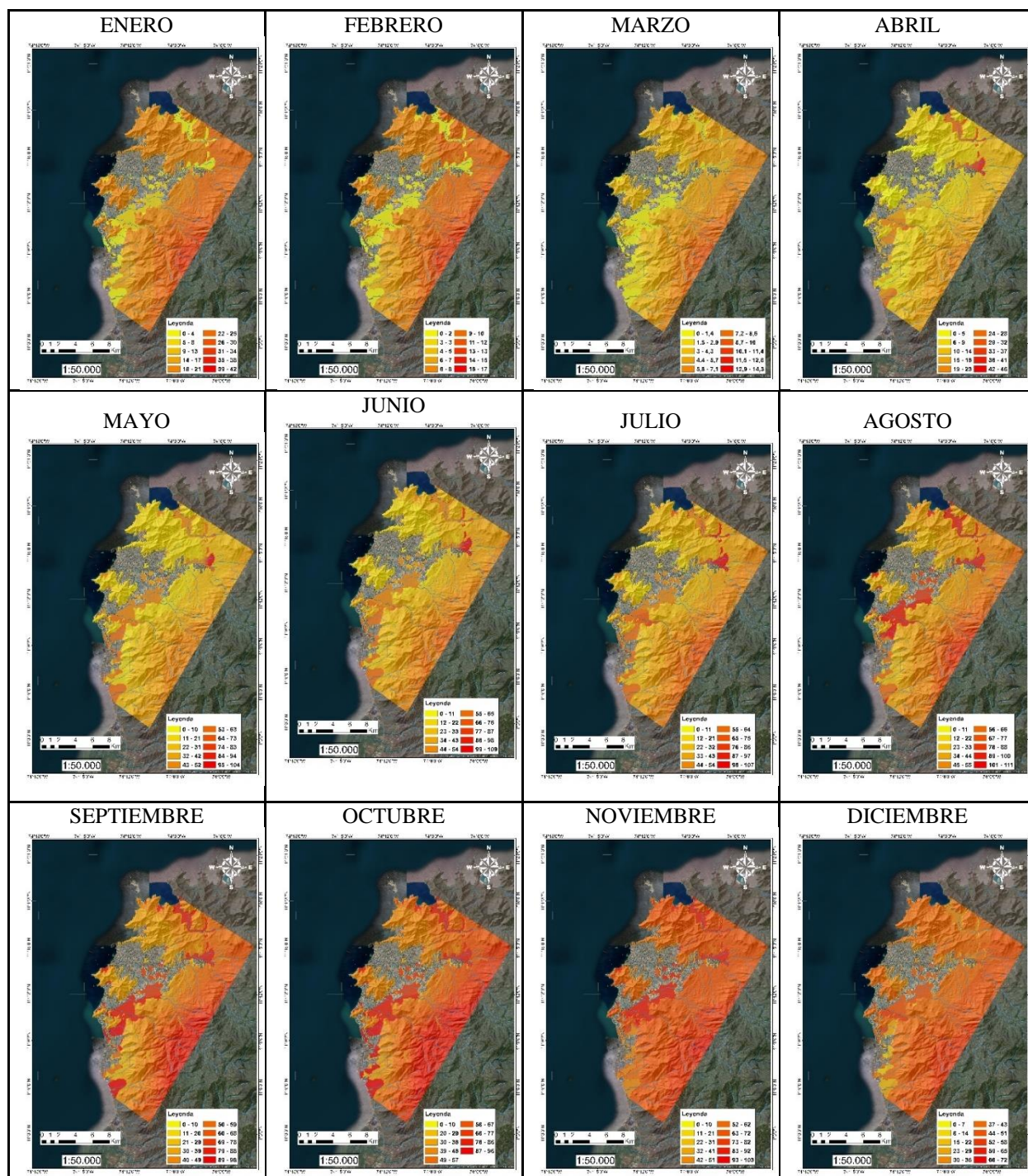
*Si ETPR es mayor que HD,  $ETR = HD$ .*

En la Figura 30 se puede observar los valores del mensuales del ETR, de los cuales se puede analizar que los meses con mayores valores de ETP, no fueron los que al final obtuvieron los mayores valores de ETR, ya que, para este último es necesario que haya humedad que pueda ser evapotranspirada, dejando así a los meses con mayor humedad disponible mayores valores de ETR.



**Figura 30**

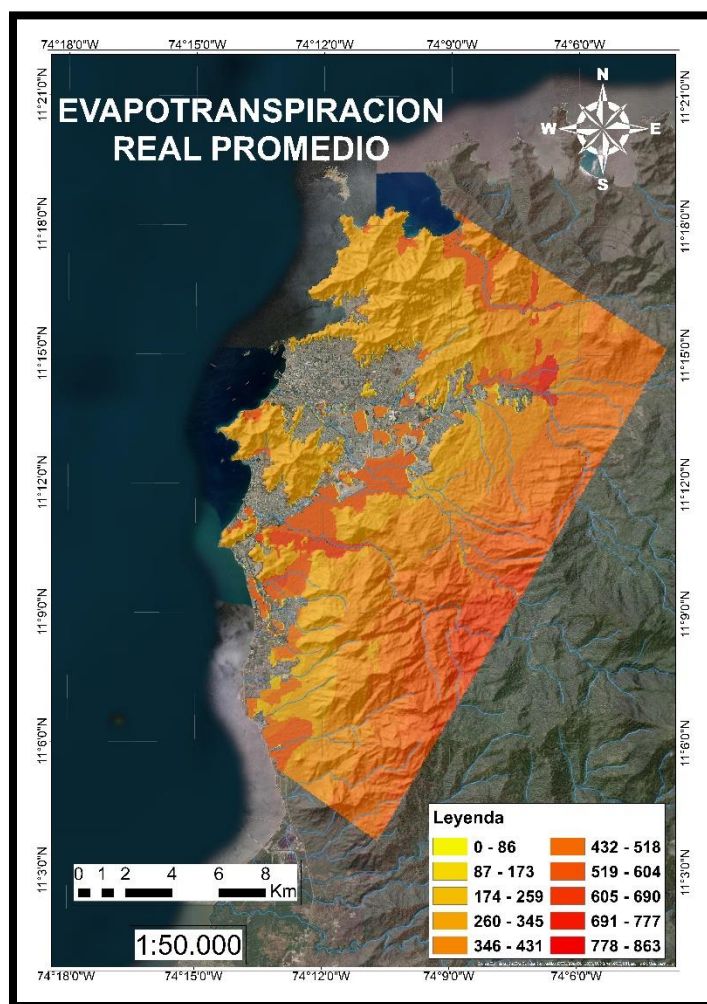
*Mosaico de evapotranspiración real promedio para de cada mes en mm/mes.*



A partir del resultado de sumar los ETR mensuales se obtuvo el ETR anual (ver Figura 31), del cual se puede concluir que la humedad disponible afecta en gran medida a estos valores, tanto como el ETP, los mayores valores de ETR se concentran en el depósito del cuaternario y la parte más alta del Batolito de Santa Marta perteneciente al área de estudio.

### Figura 31

*Evapotranspiración real promedio anual, en mm/año.*

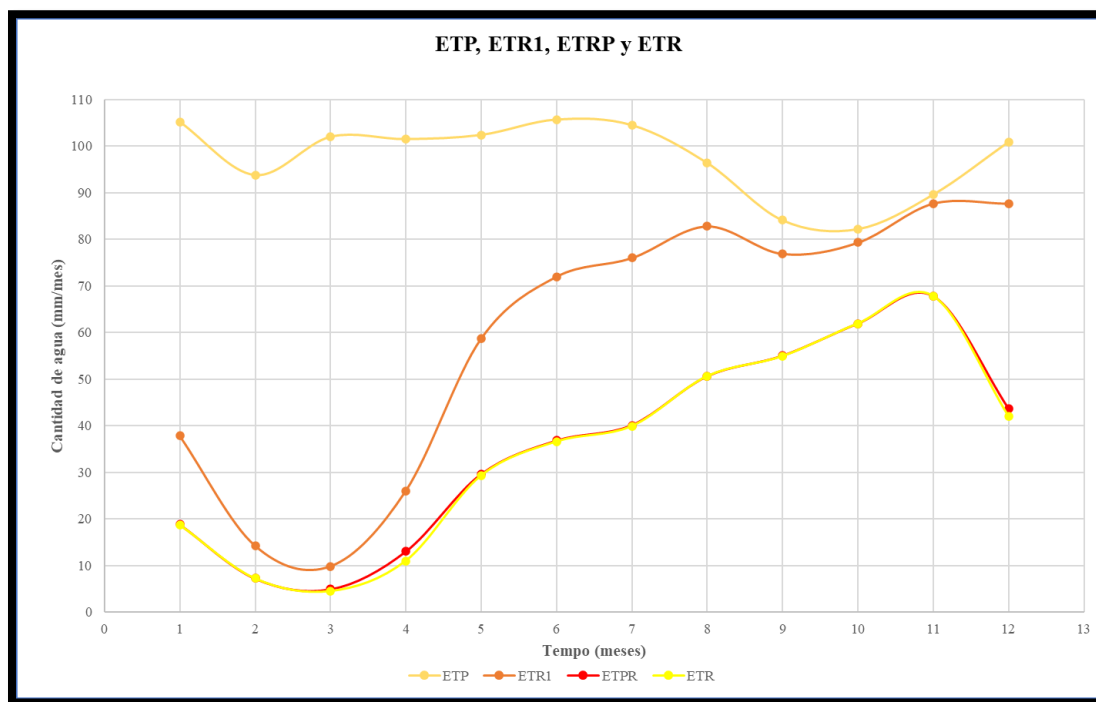


Según la Figura 32, el ETP maneja valores muy superiores a los demás factores, ya que este no tiene en cuenta la humedad del suelo. La relación entre el ETRP y ETR es clara, sus

valores son casi un calco, eso nos indica que la humedad disponible del suelo siempre fue superior al ETRP para que esta igualdad se diera.

**Figura 32**

*Comparación entre las evapotranspiraciones.*



### Humedad Final (HSf)

Es la humedad del suelo al final del mes, expresada en mm/mes, esta no puede superar la capacidad de campo. Es la humedad disponible menos el punto de marchitez de las plantas y la evapotranspiración real promedio. Para hallarla se necesita una ecuación, que depende de las siguientes consideraciones:

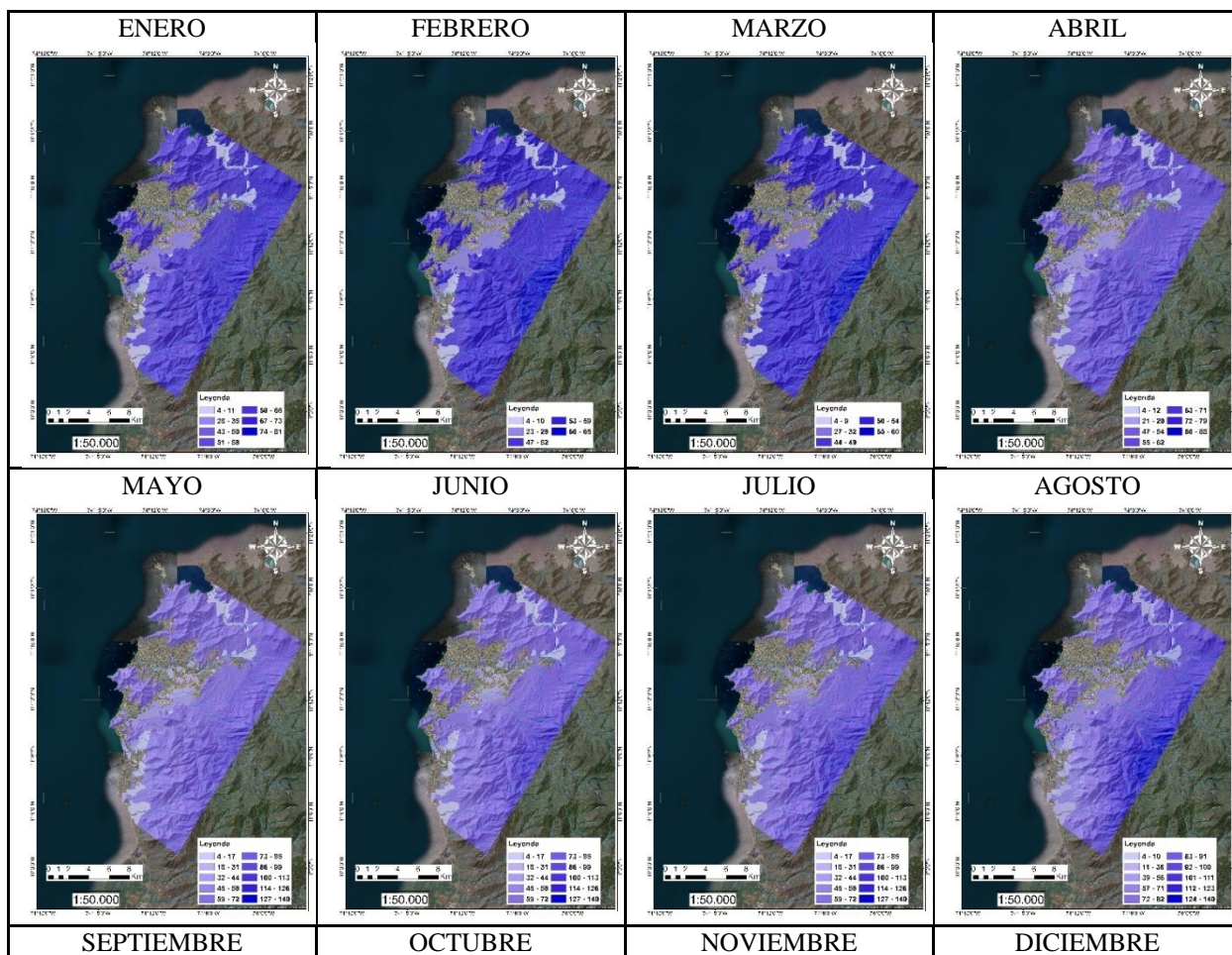
*Si  $(HD + PM - ETR)$  es menor que la capacidad de campo,  $HSf = HD + PM - ETR$*

*Si  $(HD + PM - ETR)$  es mayor o igual que la capacidad de campo,  $HSf = CC$*

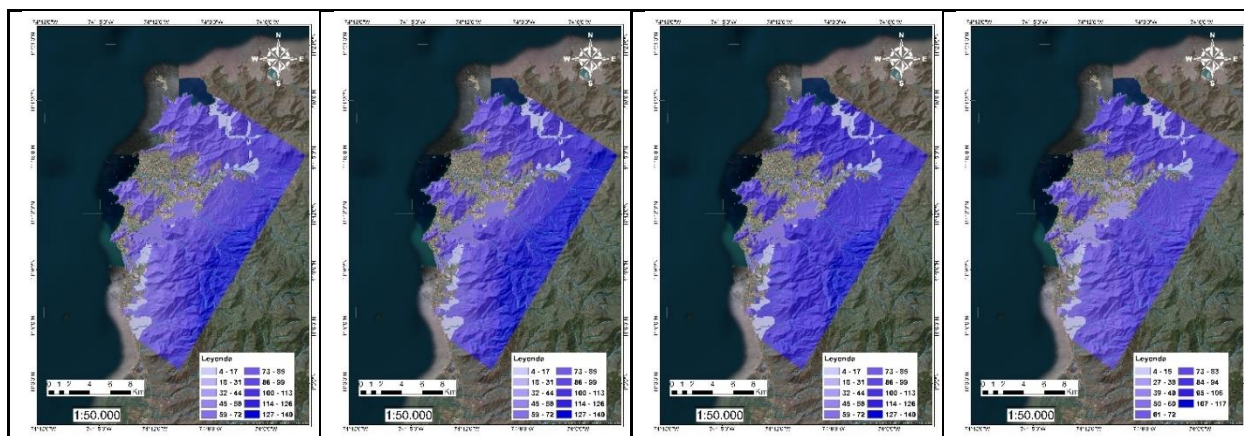
Se obtuvo la Figura 33 que ilustra el comportamiento de las humedades finales por meses y zonas, del área de estudio, lo que se puede observar es que las zonas con mayor humedad final corresponden a él batolito de Santa Marta y a los Esquistos presentes.

**Figura 33**

*Mosaico de la humedad del suelo final de cada mes, en mm/mes.*



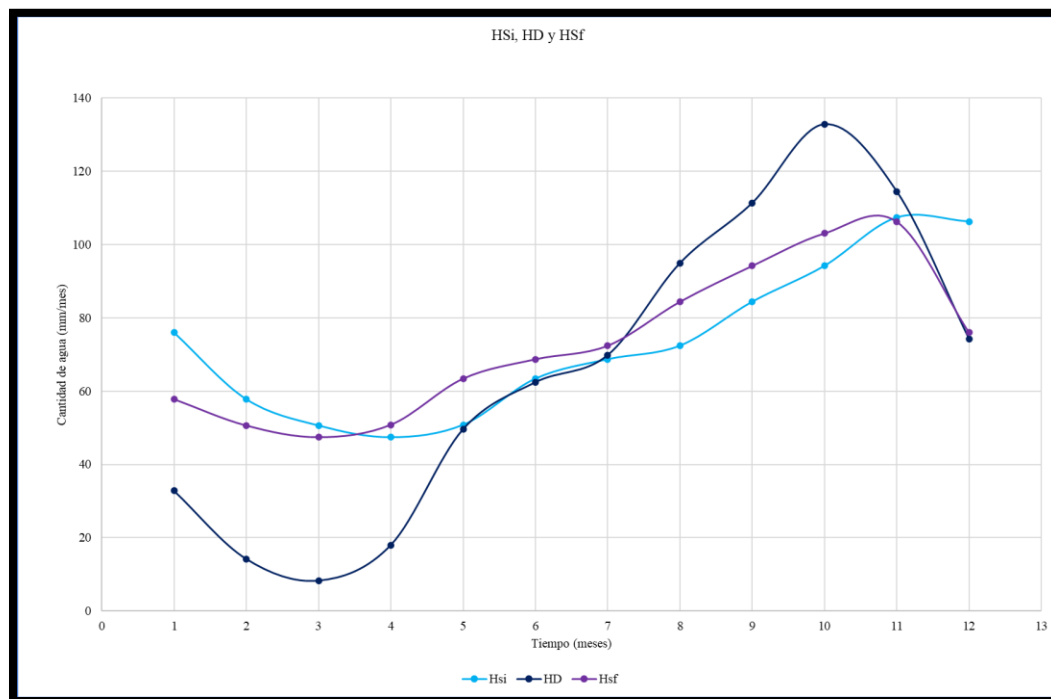




Como la humedad final de un mes es igual a la inicial del mes siguiente, las graficas son muy parecidas (ver Figura 34), la humedad disponible es superior en los meses de agosto hasta noviembre, lo que podría indicar los meses en donde hay recarga hacia el acuífero.

**Figura 34**

*Comparación de humedades.*



## Déficit de Capacidad de Campo (DCC)

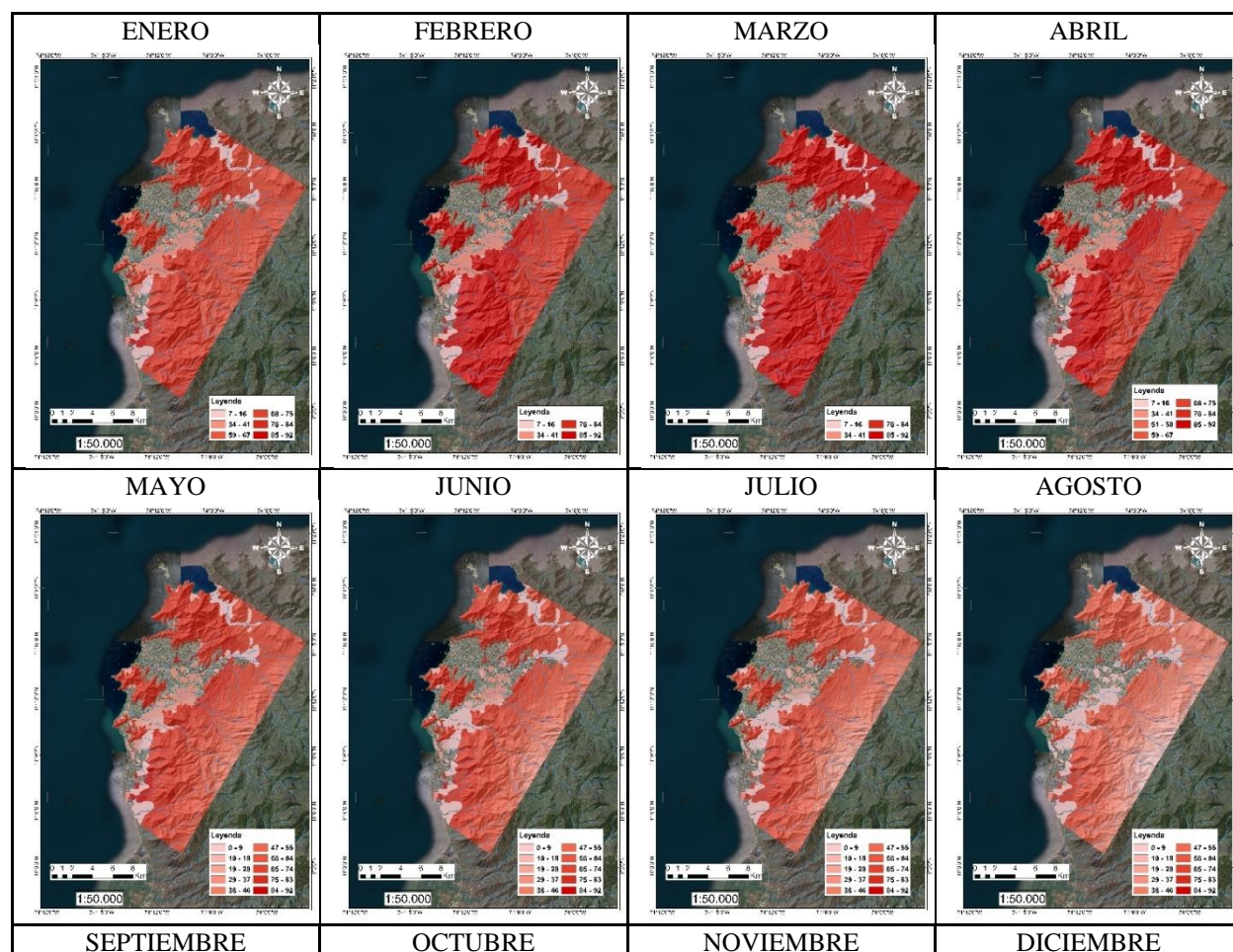
Es la humedad faltante en mm/mes para que el suelo tenga una humedad igual a la capacidad de campo al final del mes, para obtenerla se utiliza la siguiente expresión:

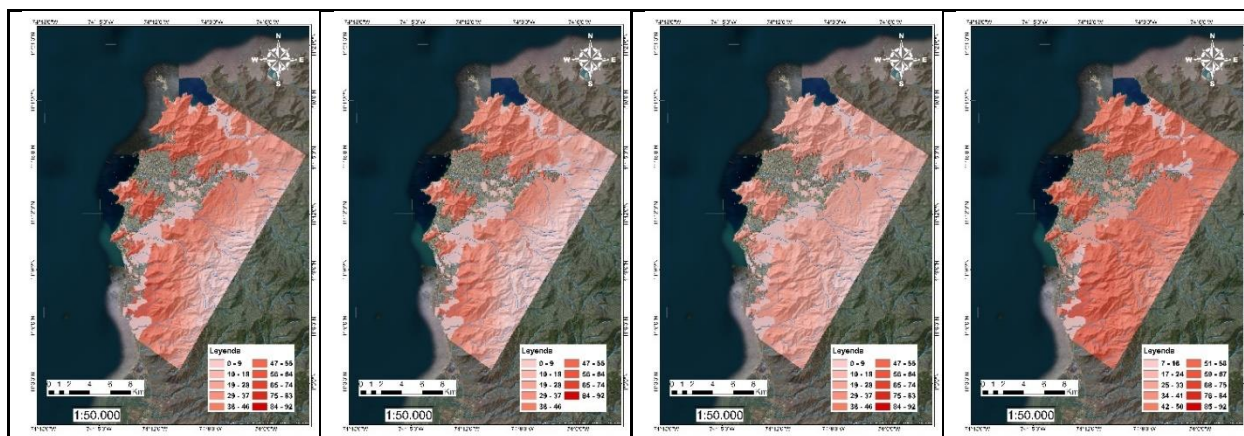
$$DCC = CC - HSf$$

En la Figura 35 se puede ver que el DCC de enero a julio son altos, respecto al resto de meses que presentaban una tendencia media/baja, teniendo así al mes de noviembre como el menos cantidad de humedad necesita para alcanzar la capacidad de campo al final del mes.

**Figura 35**

*Mosaico del déficit de capacidad de campo de cada mes en mm/mes.*

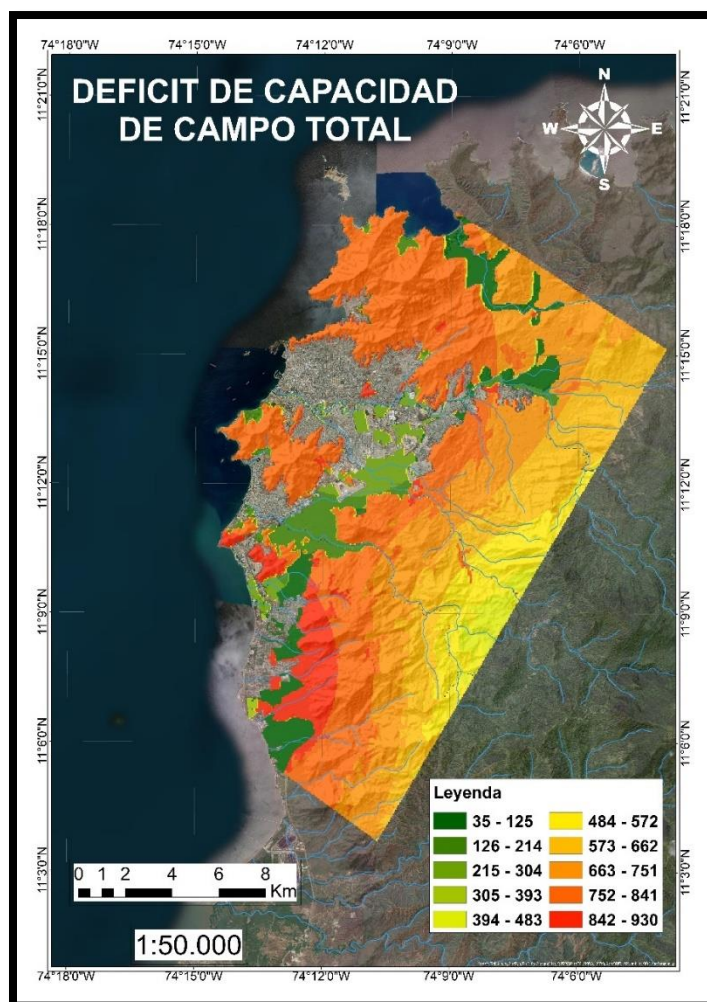




En la Figura 36 se puede observar el DCC anual en mm/año, en donde las zonas de abanicos y gravas son las que menos déficit poseen, seguido del depósito de aluviones, en la parte de debajo de la zona de estudio se puede observar los valores más altos en color rojo.

**Figura 36**

*Mapa del déficit de capacidad de campo total en mm/año.*



### **Necesidad de Riego (NR)**

Es la cantidad de agua ideal en mm/mes para que el cultivo tenga la máxima productividad. Es el agua que tendría que añadirse al suelo en el mes mediante el riego, para que el terreno siempre este a capacidad campo. Con el fin de que las plantas no tengan la necesidad de cerrar estomas y estas puedan evapotranspirar. Se obtiene de la siguiente ecuación:

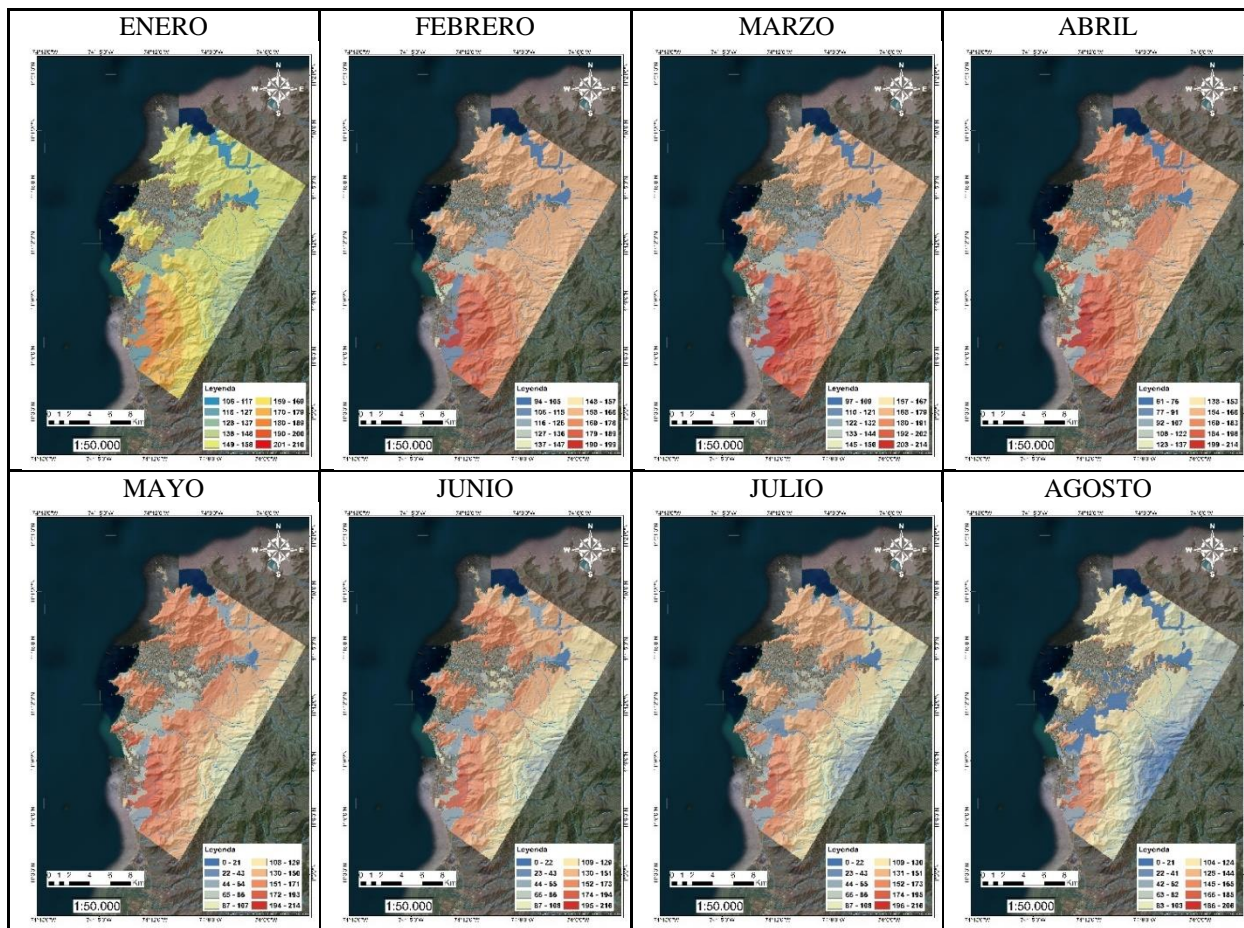
$$NR = DCC - ETR + ETP$$

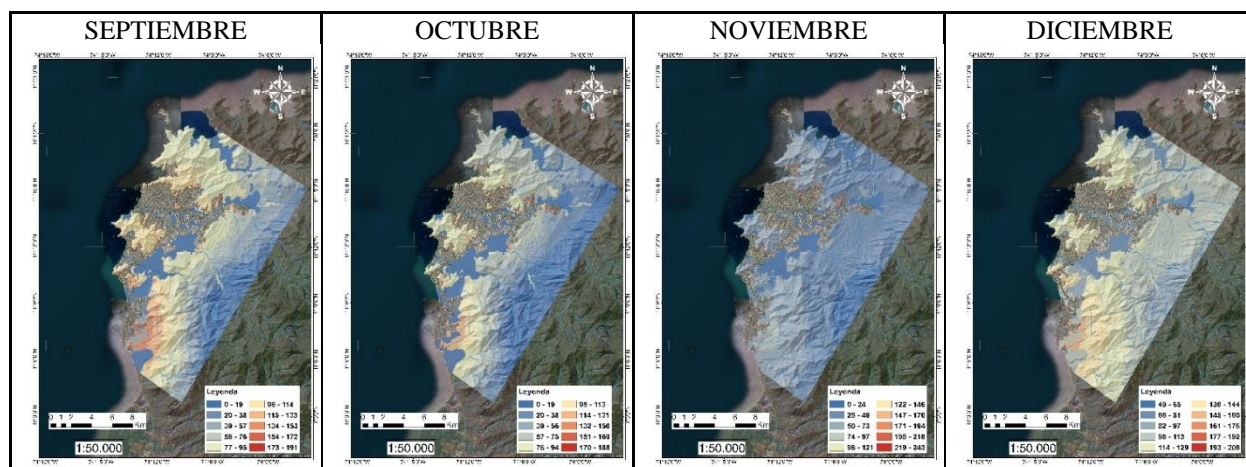


La necesidad de riego mensual (ver Figura 37), en donde los mayores valores están presentes de los meses de febrero a julio, teniendo al mes de noviembre el que menor cantidad de agua necesitaría añadirse para que las plantas se mantengan en capacidad de campo.

**Figura 37**

*Mosaico de la necesidad de riego de cada mes en mm/mes.*

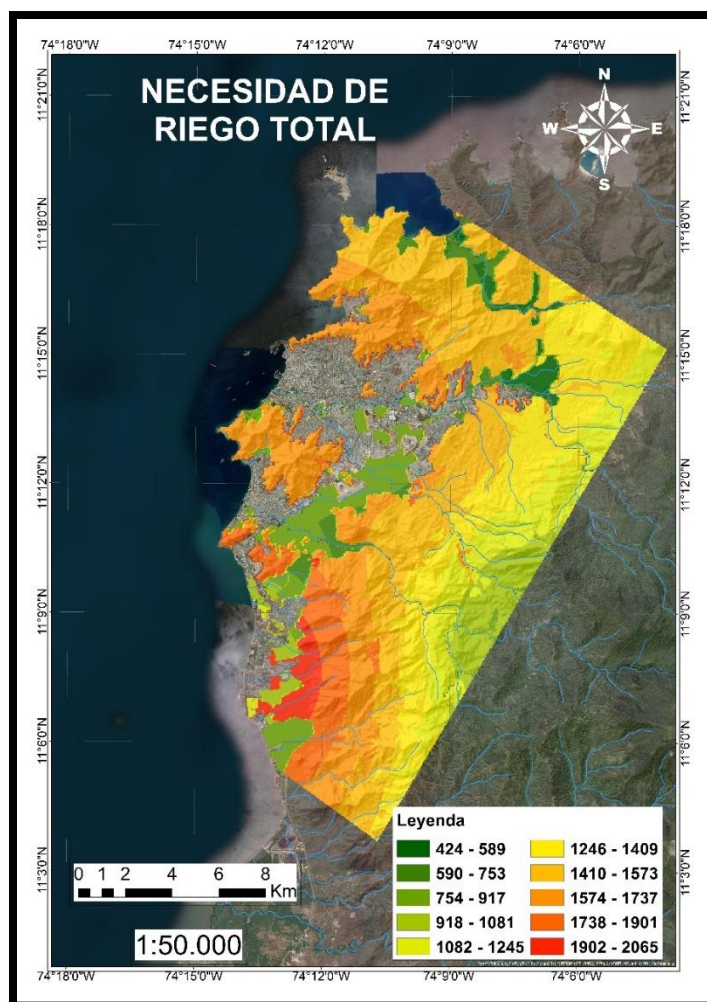




De la Figura 38 se puede ver la necesidad de riego total del área de estudio, el patrón de comportamiento es muy similar al de déficit de capacidad de campo, claramente en esta imagen se manejan valores superiores, teniendo los más bajos en los depósitos de abanicos y gravas.

**Figura 38**

*Mapa de la necesidad de riego total en mm/año.*



### **Recarga Potencial del Acuífero (Rp)**

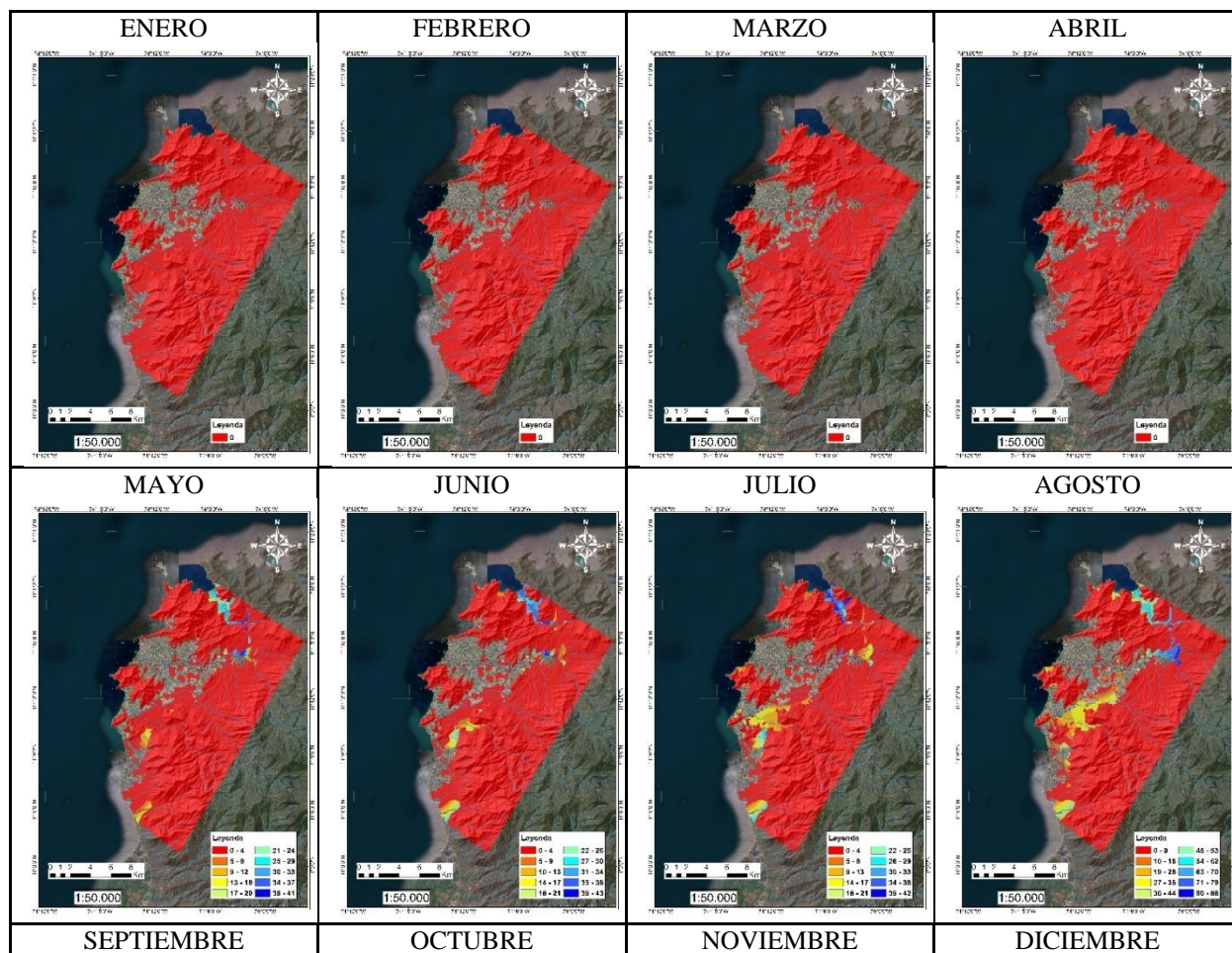
Esta se da si el agua que se infiltra es suficiente para cumplir con la demanda de la evapotranspiración de las plantas y para llevar al suelo a capacidad de campo. Esta es el agua que “sobra” una vez cumplido los anteriores procesos, y son la que al final recargan el acuífero. Para obtenerla se requiere de la siguiente ecuación:

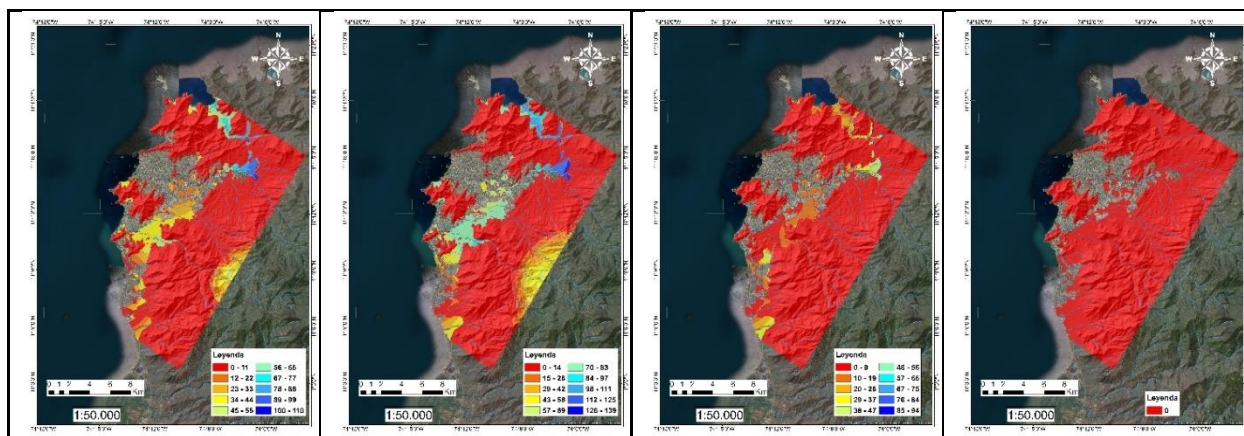
$$Rp = Pi + HSi - HSf - ETR$$

La recarga potencial mensual visualizada en la Figura 39 es muy baja, teniendo los meses de diciembre a abril una recarga de 0, los demás meses solo se puede apreciar una pequeña recarga en unas zonas específicas, el mes de octubre es el que más recarga le aporta al acuífero.

**Figura 39**

*Mosaico de la recarga potencial de cada mes en mm/mes.*



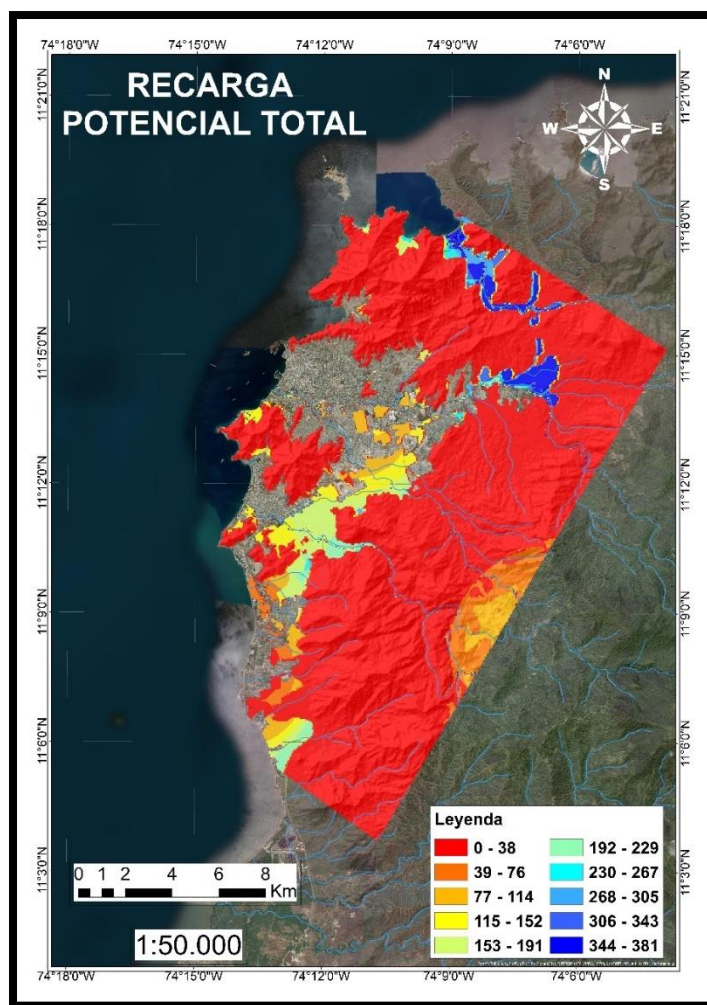


En la Figura 40 se puede apreciar la recarga potencial anual al acuífero, en donde se identifican las zonas con mayor y menor recarga. El acuífero recibe muy poca recarga anual, en donde solo los depósitos del cuaternario aportan cantidades considerables, de estos destaca el depósito de abanicos y gravas. Existe una recarga considerable en el Batolito de Santa Marta, esto debido al Kv y a las grandes precipitaciones que se presentan en la zona.



**Figura 40**

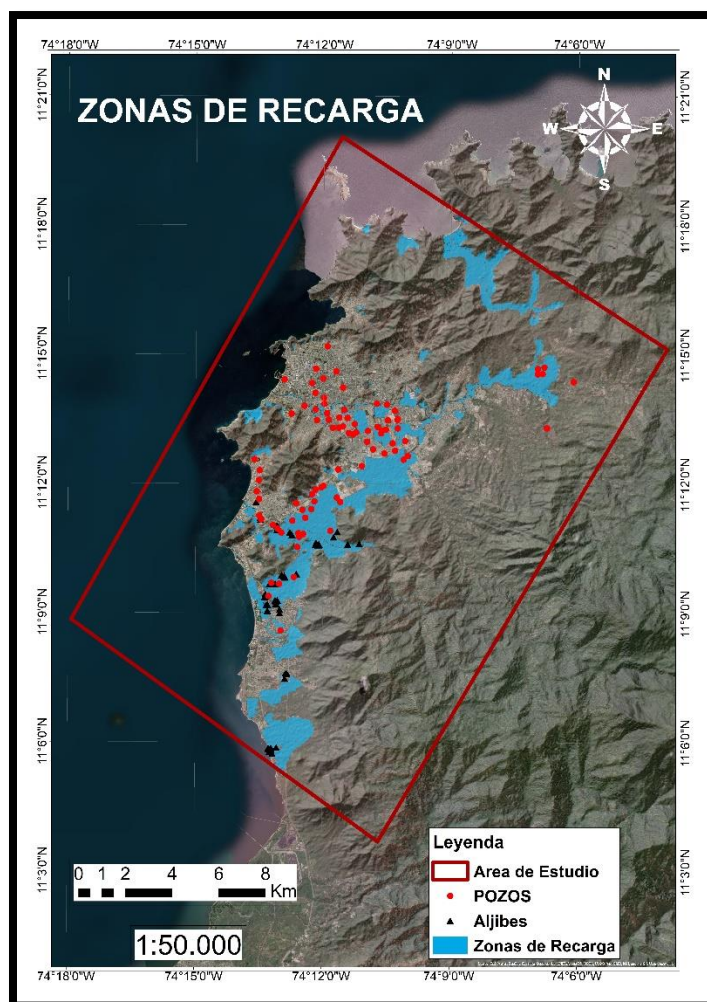
*Mapa de la recarga potencial total en mm/año.*



Las zonas de recarga del área de estudio hacen parte de las formaciones hidrogeológicas de tipo acuífero, las cuales tienen porosidad primaria. Gran parte de estas son de tipo libre, su productividad va desde baja a alta. En la Figura 41 es posible observar que la gran mayoría de puntos de agua de la ciudad coinciden con las zonas de recarga; además, hay que tener en cuenta que la extensión de estas ha venido decreciendo con el paso de los años, parte de esta consecuencia se debe al drástico crecimiento urbano de la ciudad.

**Figura 41**

*Mapa de recarga del área de estudio en mm/año.*



En la Figura 42 se presenta la información suministrada por los ráster, en donde se obtuvo los promedios mensuales de los datos más relevantes del área de estudio.

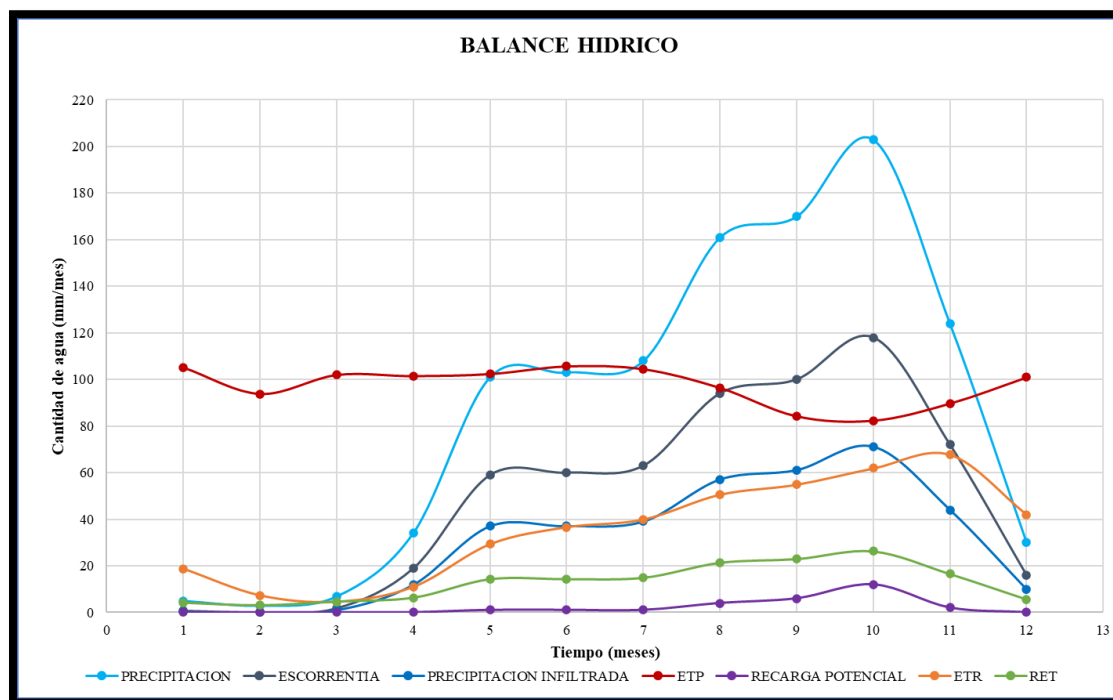
Se puede inferir que la recarga será poca, teniendo en cuenta solo a la evapotranspiración potencial, ya que en la mayoría de meses es superior a la precipitación, en esos casos es posible que la humedad del suelo llegue al punto de marchitez en las plantas.

La mayoría de las aguas lluvias se va por escorrentía superficial con un porcentaje de 57,5% de las precipitaciones, en donde su patrón de comportamiento es muy similar llegando a

sus picos máximos en los meses de agosto septiembre y octubre. Esto se debe en gran medida a las fuertes pendientes de la zona.

**Figura 42**

*Balance Hídrico Resultante.*



La precipitación infiltrada es muy baja con respecto al ETP, en donde en ningún mes llega a superar a este, el agua que se infiltra es el 35,2% de las precipitaciones. Lo anterior descrito afecta en gran medida a la recarga potencial del acuífero en donde sus valores son nulos en 5 meses y casi imperceptibles en el resto. La recarga potencial representa solo el 2,6% de las precipitaciones totales. A diferencia del ETP y el ETR, este último presenta sus valores más altos en el mes de octubre, debido a que hay mayor humedad disponible a evapotranspirar.

En la Tabla 3 se observa las áreas de cada formación, el Batolito de Santa Marta tiene la mayor extensión de territorio y la menor corresponde a los depósitos de abanicos y gravas.

También se puede ver el volumen de recarga anual de cada formación, el depósito de aluviones



recientes es el más aporta a la recarga del acuífero, conformando el 51,2% del total del agua que se recarga.

**Tabla 3**

*Cálculo del volumen de recarga por formación.*

<b>FORMACION</b>	<b>AREA (m<sup>2</sup>)</b>	<b>RECARGA (m/año)</b>	<b>VOLUMEN DE RECARGA (m<sup>3</sup>/año)</b>
<b>Abanicos y gravas</b>	20.934.100,48	0,22	4.542.699,80
<b>Aluviones recientes</b>	46.931.306,33	0,13	6.223.091,22
<b>Batolito de Santa Marta</b>	164.562.538,56	0,01	1.184.850,28
<b>Esquisto de Concha</b>	25.216.048,14	0,001	35.302,47
<b>Esquisto de Gaira</b>	35.647.531,03	0,002	74.859,82
<b>TOTAL</b>	<b>293.291.524,55</b>	<b>0,36</b>	<b>12.060.803,58</b>

### **Conclusiones y Recomendaciones**

- Se generó un modelo geológico con información secundaria, logrando identificar las formaciones geológicas, y su comportamiento hidrogeológico. Obteniendo la capacidad de almacenar y transmitir el agua de cada formación.
- Se halló la recarga potencial del sistema acuífero de Santa Marta y sus alrededores, mediante el balance hídrico de suelos, calculando y analizando cada uno de los factores que intervienen en el resultado. Obteniendo un valor anual superior a los 12 millones de metros cúbicos, siendo el mes de octubre en donde se presenta los mayores valores de recarga potencial.
- Se recomienda un estudio hidrogeológico a detalle del Batolito de Santa Marta, que debido a sus propiedades este estudio no descarta que pueda almacenar agua por porosidad secundaria.
- Este documento facilita la generación de un modelo hidrogeológico conceptual, aportando y recopilando la información necesaria para que este se pueda llevar a cabo.
- La formación que mayor aporte hace a la recarga del acuífero, es el depósito de aluviones recientes, aportando más de la mitad de la lluvia infiltrada que vence a la evapotranspiración y alcanza a llevar al suelo a capacidad de campo. Sin embargo, la mayoría del depósito se encuentra impermeabilizado por el área urbana, disminuyendo la zona de recarga con el pasar de los años.
- De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se recomienda la implementación de SUDS, pozos de recarga artificial o un sistema mixto como medidas temporales que salvaguarden el funcionamiento del acuífero.

- El depósito de abanicos y gravas a pesar de ser la formación que más infiltra en promedio, no es tan relevante como el depósito de aluviones recientes, debido a que es un acuífero de menor extensión, baja calidad de agua y menor productividad.
- Mas de la mitad de las precipitaciones del área de estudio, alimentan a las corrientes superficiales por medio de la esorrentía superficial, donde las grandes pendientes y algunas zonas con poco o nulo coeficiente de infiltración, permiten que el agua no se infiltre.
- Las bajas precipitaciones durante un año traen consecuencias sobre la recarga potencial total, en pocos meses del año las aguas lluvias superan a la evapotranspiración.
- La precipitación infiltrada solo se presenta de forma considerable en los depósitos del cuaternario, teniendo muy pocos valores en los Esquistos y en el Batolito, a pesar de que estos últimos poseen la mayor extensión del área estudiada.
- A la hora de calcular el balance hídrico es necesario tener valores de los coeficientes fiables, ya que pueden provocar valores extremos que no representen el comportamiento de los factores analizados, presentando valores muy altos en solo unos cuantos pixeles de los mapas.
- Los valores propuestos para los coeficientes de  $K_p$ ,  $K_v$ ,  $K_{fc}$ ,  $C_{fo}$ , etc. Comprendidas en la metodología de Schosinsky N. (2016), las clasificaciones de estos son muy limitadas, obliga a que los valores sean reclasificados para poder iniciar los cálculos. Para ello se deberían realizar estudios que determinen esos factores para cada área que se quiera analizar.

## Referencias

- Alcaldía Distrital de Santa Marta. (s.f.). *Geografía*. <https://www.santamarta.gov.co/geografia>
- Colmenares, F., Mesa, A., Roncancio, J., Arciniegas, E., Pedraza, P., Cardona, A., Romero, A., Silva, A., Alvarado, S., Romero, O. y Vargas, A. (2007). *Geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33, 34 y 40*. Proyecto: “Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta”. Servicio Geológico Colombiano [SGC], Colección: General. Bogotá D.C.: INGEOMINAS.
- <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010018162/documento/pdf/2105181621101000.pdf>
- Corporación Autónoma Regional del Magdalena (2019). *Caracterización básica y del sistema Físicobiótico*. Fase de diagnóstico, Documento general, Vol. I. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MIAMBIENTE]. Gobierno de Colombia.
- <https://www.corpamag.gov.co/proyectos-estrategicos/pomcas/documentacion-pomcas>
- Díaz, A., Molina, J. y Quintero, K. (2020). *Recuperación del manto acuífero de la zona norte de la ciudad de Santa Marta D.T.C.H.* [Trabajo de grado de especialización, Universidad del Magdalena] Repositorio Digital Universidad del Magdalena.
- <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/handle/123456789/6200>
- Escobar Villar, A. (2022). *Hidrometeorología y Cálculo de Variables Preliminares de un Balance Hídrico para el Sistema Acuífero de Santa Marta y sus Alrededores* [Trabajo de grado, Universidad del Magdalena].

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*.

[http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA\\_2014.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf)

Macdonald, W., Doolan, B. & Cordani, G. (1971). *Cretaceous – Early Tertiary Metamorphic K-Ar age values from the South Caribbean*. Geological Society of America Bulletin 82 : 1381 - 1388.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay [M.G.A.P.]. (2012). *Manual de Agua Subterránea* (1ra ed.). Dirección General de Desarrollo Rural, Denad Internacional S.A (1), 121 pp. ISBN: 978-9974-594-09-8.

[http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10\\_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf](http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf)

Perdomo, V. y Rojas, C. (2017). Modelo Hidrogeológico Conceptual a Partir de Información Secundaria, en los Alrededores del Centro Urbano del Municipio de Chiquinquirá. [Trabajo de grado de especialización, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia.

<https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15317>

Pirela-Medina, M. y Ramírez-Hernández, R. (2017). *Modelo geológico-estructural del yacimiento VENI del noroeste del lago de Maracaibo*. Minería y Geología, 33(1), pp. 44-57. E-ISSN: 1993-8012. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223549947004>

Pulido, A. (s.f.). Sobreexplotación de Acuíferos y Desarrollo Sostenible [Ponencia]. *III Taller Internacional sobre Gestión y Tecnologías de Suministro de Agua Potable y Saneamiento Ambiental*, La Habana, Cuba.

[https://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c10/\\$File/PGA-c10.pdf](https://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c10/$File/PGA-c10.pdf)

Rebollo, L. F. (s.f.). Tema 5: Balance Hídrico de un Sistema Acuífero [diapositivas]. *Catedra de Hidrogeología, Licenciatura en Ciencias Ambientales. Departamento de Geología, Universidad de Alcalá [UAH], Alcalá de Henares, España.*

[https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T5-Balance%20h%C3%A9drico%20de%20un%20sistema%20acu%C3%A9fero.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T5-Balance%20h%C3%A9drico%20de%20un%20sistema%20acu%C3%A9fero.pdf)

Recursos de Agua de Puerto Rico. (s.f.) Intrusión Salina.

<http://www.recursosaguapuertorico.com/Intrusion-Salina.html>

Resolución 471 de 2020. (2020, 14 de mayo). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Diario Oficial No 51.318.

[https://normograma.info/findeter/docs/resolucion\\_igac\\_0471\\_2020.htm](https://normograma.info/findeter/docs/resolucion_igac_0471_2020.htm)

Sánchez, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea* (2nd ed.). Createspace Independent Pub., 414 pp. <https://hidrologia.usal.es/Libro.htm>

Schosinsky N. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, Núm. 34-35, (2006), 13-30.

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/4223>

Servicio Geológico Colombiano [IGAC]. (s.f.). *Estado de la Cartografía Geológica.*

[https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado\\_Cartografia\\_Geologica/](https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/)

SuD Sostenible. (s.f.). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible* [SUDS].

<http://sudsostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/>

Tschanz, Ch. M., Jimeno, A. y Vesga, C., (1969). *Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Área (Colombia)* [Preliminary Report]. Servicio Geológico Colombiano [SGC], Informe Técnico, Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras [INGEOMINAS].  
<https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=12225#:~:text=Resumen%3A%20La%20Zona%20I%2C%20en,de%20la%20Serran%C3%ADa%20del%20Perij%C3%A1.>



## Apéndice A

**Tabla A1**

*Inventario de pozos.*

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 03TP	Ciénaga	11° 02' 46.67"	74° 11' 48.47"	61	Osmelia Hernández
Pz 07GP	Santa Marta	11° 11' 35.66"	74° 12' 12.07"	16	Omar
Pz 08GP	Santa Marta	11° 11' 15.64"	74° 13' 29.93"	8	Luis Herrera
Pz 09GP	Santa Marta	11° 11' 15.64"	74° 13' 29.93"	9	Juan Díaz
Pz 11GP	Santa Marta	11° 11' 10.24"	74° 13' 27.12"	10	Carlos Rueda
Pz 13GP	Santa Marta	11° 11' 32.82"	74° 12' 37.88"	14	Cristianos GNG
Pz 15MP	Santa Marta	11° 14' 33.51"	74° 06' 57.30"	73	Jardines Jerusalén
Pz 16MP	Santa Marta	11° 14' 43.25"	74° 06' 47.96"	80	Jardines Jerusalén
Pz 17MP	Santa Marta	11° 14' 34.00"	74° 06' 50.40"	78	Jardines Jerusalén
Pz 18MP	Santa Marta	11° 14' 40.95"	74° 06' 57.21"	72	Rodrigo Vives
Pz 20GP	Santa Marta	11° 10' 57.15"	74° 13' 03.66"	13	CAJAMAG
Pz 24GP	Santa Marta	11° 10' 31.85"	74° 12' 36.13"	19	Adalberto Carvajal
Pz 25GP	Santa Marta	11° 10' 46.10"	74° 12' 33.42"	17	Alejandro Mendieta
Pz 26GP	Santa Marta	11° 10' 50.04"	74° 12' 27.86"	19	Juan Carlos Ospina
Pz 40GP	Santa Marta	11° 09' 23.66"	74° 13' 16.31"	10	Walter Friebber
Pz 48GP	Santa Marta	11° 09' 41.85"	74° 13' 12.35"	12	Antonio Maldonado
Pz 53GP	Santa Marta	11° 09' 40.51"	74° 13' 01.51"	15	Emiro Gnecco
Pz 59GP	Santa Marta	11° 09' 49.74"	74° 12' 40.71"	32	Velásquez
Pz 69GP	Santa Marta	11° 12' 18.70"	74° 13' 29.30"	5	Cristina Vargas
Pz 70GP	Santa Marta	11° 12' 34.00"	74° 13' 36.80"	4	Álvaro Valderrama
Pz 71GP	Santa Marta	11° 12' 04.90"	74° 13' 30.70"	5	Wilfrido Sevilla
Pz 72GP	Santa Marta	11° 11' 49.30"	74° 13' 33.40"	3	Carlos Gamba
Pz 73GP	Santa Marta	11° 11' 38.50"	74° 13' 30.20"	3	María Isabel Cardona

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 77MP	Santa Marta	11° 12' 20.09"	74° 11' 38.68"	21	ALFERING
Pz 78GP	Santa Marta	11° 11' 51.91"	74° 12' 10.81"	18	Servifetec
Pz 79GP	Santa Marta	11° 11' 45.63"	74° 12' 15.43"	19	ARGOS
Pz 80GP	Santa Marta	11° 10' 54.70"	74° 11' 49.52"	23	SENA Agropecuaria
Pz 81GP	Santa Marta	11° 11' 34.83"	74° 11' 35.44"	16	Molinos Santa Marta
Pz 82GP	Santa Marta	11° 11' 41.05"	74° 11' 40.47"	19	Molinos Santa Marta
Pz 83MP	Santa Marta	11° 13' 10.67"	74° 10' 38.25"	25	Univ. Sergio Arboleda
Pz 84MP	Santa Marta	11° 13' 14.33"	74° 10' 37.56"	24	Héctor Viverus
Pz 85MP	Santa Marta	11° 13' 29.37"	74° 10' 15.28"	27	Universidad UCC
Pz 86MP	Santa Marta	11° 14' 26.63"	74° 12' 00.21"	14	Univ. Sergio Arboleda
Pz 87MP	Santa Marta	11° 14' 20.22"	74° 12' 16.09"	9	Carlos Correa
Pz 88MP	Santa Marta	11° 14' 06.81"	74° 12' 11.11"	12	Pirry Wash
Pz 89MP	Santa Marta	11° 13' 51.39"	74° 11' 58.64"	17	Oceanmall
Pz 90MP	Santa Marta	11° 13' 59.74"	74° 11' 59.15"	16	Rodrigo Castañeda
Pz 91MP	Santa Marta	11° 13' 37.74"	74° 12' 44.69"	6	Club de Suboficiales
Pz 92MP	Santa Marta	11° 13' 48.62"	74° 12' 26.51"	13	Lava Autos La 30
Pz 93MP	Santa Marta	11° 13' 23.32"	74° 11' 15.22"	17	Univ. del Magdalena
Pz 94MP	Santa Marta	11° 13' 28.54"	74° 12' 08.77"	13	DISTRACON
Pz 95PP	Santa Marta	11° 17' 32.02"	73° 53' 36.70"	4	Barlovento
Pz 96MP	Santa Marta	11° 12' 24.84"	74° 11' 05.33"	28	Construc. CPV Ltda
Pz 97MP	Santa Marta	11° 12' 59.86"	74° 10' 04.22"	29	BioCombustibles SC
Pz 98MP	Santa Marta	11° 11' 57.01"	74° 11' 59.41"	15	OPL Logística
Pz 99MP	Santa Marta	11° 11' 55.07"	74° 12' 02.20"	14	OPL Logística
Pz 100MP	Santa Marta	11° 14' 22.95"	74° 06' 06.68"	103	Urbanización Utica
Pz 101MP	Santa Marta	11° 13' 18.49"	74° 06' 43.98"	101	Ramón Flórez

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 102GP	Santa Marta	11° 08' 35.65"	74° 12' 59.18"	40	Urb. Portal de la Sierra
Pz 107GP	Santa Marta	11° 11' 44.52"	74° 12' 03.93"	15	TECBACO S.A.
Pz 108MP	Santa Marta	11° 14' 25.28"	74° 12' 54.79"	3	Prabyc Ingenieros
Pz 109MP	Santa Marta	11° 13' 18.23"	74° 11' 37.53"	16	Serteba S.A.
Pz 110GP	Santa Marta	11° 11' 02.36"	74° 13' 10.36"	13	Luis Ernesto Gómez
Pz 111MP	Santa Marta	11° 15' 11.63"	74° 11' 54.21"	10	Lava autos Johnson
Pz 112MP	Santa Marta	11° 13' 09.01"	74° 11' 17.50"	19	Lavaut. El Trébol No. 1
Pz 113MP	Santa Marta	11° 13' 10.82"	74° 11' 23.78"	19	Lavaut. El Trébol No. 2
Pz 114MP	Santa Marta	11° 14' 40.29"	74° 12' 10.21"	9	Lavaautos Donde Yesid
Pz 115MP	Santa Marta	11° 14' 36.49"	74° 11' 42.02"	14	Jesús Orozco Ruiz
Pz 116MP	Santa Marta	11° 13' 42.52"	74° 11' 9.45"	20	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 117MP	Santa Marta	11° 13' 14.05"	74° 10' 56.93"	22	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 118MP	Santa Marta	11° 13' 28.23"	74° 11' 0.08"	24	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 119MP	Santa Marta	11° 13' 11.71"	74° 11' 13.35"	20	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 120MP	Santa Marta	11° 13' 19.98"	74° 11' 32.09"	18	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 121MP	Santa Marta	11° 13' 32.02"	74° 11' 25.74"	17	Metroagua S.A., E.SP.

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 122MP	Santa Marta	11°12'58.87"	74°10'57.79"	23	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 123MP	Santa Marta	11°13'41.14"	74° 9'6.30"	33	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 124MP	Santa Marta	11°13'19.44"	74°10'43.25"	26	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 125MP	Santa Marta	11°12'52.55"	74°11'8.29"	22	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 126MP	Santa Marta	11°12'42.50"	74°10'33.61"	30	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 127MP	Santa Marta	11°13'29.36"	74°11'52.33"	16	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 128MP	Santa Marta	11°12'48.25"	74°10'49.46"	27	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 129GP	Santa Marta	11°10'51.07"	74°12'34.51"	15	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 130GP	Santa Marta	11°10'51.87"	74°12'58.56"	13	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 131GP	Santa Marta	11°11'5.34"	74°12'57.07"	13	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 132GP	Santa Marta	11° 11' 08.54"	74° 12' 43.17"	14	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 133GP	Santa Marta	11°11'15.99"	74°12'7.37"	15	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 134MP	Santa Marta	11°13'28.93"	74°10'28.57"	26	Alcaldía Distrital
Pz 135MP	Santa Marta	11°13'51.71"	74°10'44.28"	22	Alcaldía Distrital
Pz 136MP	Santa Marta	11°13'44.62"	74°10'7.40"	31	Alcaldía Distrital

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 137MP	Santa Marta	11°13'15.69"	74°10'31.42"	26	Alcaldía Distrital
Pz 138MP	Santa Marta	11°13'45.65"	74° 9'50.66"	30	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 139MP	Santa Marta	11°13'32.15"	74°11'37.26"	15	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 140GP	Santa Marta	11°11'12.60"	74°12'24.90"	16	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 141GP	Santa Marta	11°11'23.67"	74°12'28.90"	13	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 142MP	Santa Marta	11°12'46.29"	74°10'18.23"	31	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 143MP	Santa Marta	11°13'49.59"	74° 8'55.81"	34	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 144MP	Santa Marta	11°12'56.79"	74°10'21.90"	29	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 145MP	Santa Marta	11°13'32.99"	74°10'0.98"	30	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 146MP	Santa Marta	11°13'17.56"	74°10'14.56"	27	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 147MP	Santa Marta	11°13'18.02"	74°11'46.32"	16	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 148MP	Santa Marta	11°13'29.95"	74°12'5.66"	13	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 149MP	Santa Marta	11°13'0.27"	74°10'40.49"	26	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 150MP	Santa Marta	11°14'14.29"	74°11'32.26"	16	Metroagua S.A., E.SP.

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 151MP	Santa Marta	11°13'30.86"	74°10'14.74"	27	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 152MP	Santa Marta	11°13'42.09"	74°10'18.98"	29	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 153MP	Santa Marta	11°13'43.00"	74°11'30.21"	16	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 154GP	Santa Marta	11°10'58.16"	74°12'3.53"	19	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 155MP	Santa Marta	11°13'38.49"	74°11'54.71"	13	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 156GP	Santa Marta	11°11'24.67"	74°12'16.41"	16	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 157MP	Santa Marta	11°13'43.72"	74°12'10.60"	11	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 158MP	Santa Marta	11°13'50.56"	74°10'30.21"	27	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 159MP	Santa Marta	11° 12' 39.21"	74° 10' 00.22"	36	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 160MP	Santa Marta	11° 12' 33.90"	74° 10' 06.47"	38	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 161MP	Santa Marta	11° 12' 33.90"	74° 10' 06.47"	43	Metroagua S.A., E.SP.
Pz 162MP	Santa Marta	11°12'43.63"	74° 9'55.29"	34	Metroagua S.A., E.SP.

*Nota.* Suministrado Caracterización básica y del sistema Físicobiótico, CORPAMAG, 2019, (pp. 223-227), POMCA.



## Apéndice B

**Tabla B1.**

*Inventario de Aljibes.*

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 01CA	Ciénaga	11° 01' 30.23"	74° 12' 34.72"	47	José Aurela
Pz 02TA	Ciénaga	11° 02' 42.09"	74° 11' 49.79"	61	Antonio Luna
Pz 04GA	Santa Marta	11° 10' 35.61"	74° 11' 24.87"	39	Ernesto Ramírez
Pz 05GA	Santa Marta	11° 10' 53.08"	74° 11' 39.71"	29	-
Pz 06GA	Santa Marta	11° 10' 45.79"	74° 11' 44.82"	24	-
Pz 10GA	Santa Marta	11° 11' 10.29"	74° 13' 28.00"	10	-
Pz 12GA	Santa Marta	11° 11' 12.74"	74° 13' 28.19"	9	-
Pz 14GA	Santa Marta	11° 10' 36.67"	74° 11' 08.55"	48	Manuel Pacheco
Pz 19GA	Santa Marta	11° 10' 59.33"	74° 13' 03.24"	12	CAJAMAG
Pz 21GA	Santa Marta	11° 10' 55.69"	74° 13' 04.72"	14	-
Pz 22GA	Santa Marta	11° 10' 52.48"	74° 12' 46.59"	14	Ciro Sanguino
Pz 23GA	Santa Marta	11° 10' 48.68"	74° 12' 43.47"	16	European School
Pz 27GA	Santa Marta	11° 10' 35.26"	74° 12' 10.23"	21	Edison Gonzales
Pz 28GA	Santa Marta	11° 10' 37.77"	74° 12' 09.68"	17	Iván Pupo
Pz 29GA	Santa Marta	11° 10' 35.23"	74° 12' 05.17"	19	Jhon Ternerá
Pz 30GA	Santa Marta	11° 10' 34.68"	74° 12' 06.32"	20	Jhon Ternerá
Pz 31GA	Santa Marta	11° 09' 03.09"	74° 13' 18.09"	13	Rafael Borja
Pz 32GA	Santa Marta	11° 09' 11.06"	74° 13' 19.42"	11	Héctor Cuesta
Pz 33GA	Santa Marta	11° 09' 11.50"	74° 13' 19.33"	10	Héctor Cuesta
Pz 34GA	Santa Marta	11° 09' 11.04"	74° 13' 17.43"	13	Héctor Cuesta
Pz 35GA	Santa Marta	11° 09' 17.60"	74° 13' 04.06"	20	Walter Friebber
Pz 36GA	Santa Marta	11° 09' 16.32"	74° 13' 05.66"	18	Walter Friebber
Pz 37GA	Santa Marta	11° 09' 12.72"	74° 13' 05.75"	19	Walter Friebber

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 38GA	Santa Marta	11° 09' 16.11"	74° 13' 77.17"	17	Walter Friebber
Pz 39GA	Santa Marta	11° 09' 17.69"	74° 13' 07.04"	17	Walter Friebber
Pz 41GA	Santa Marta	11° 09' 22.72"	74° 13' 20.25"	11	Walter Friebber
Pz 42GA	Santa Marta	11° 09' 23.51"	74° 13' 21.41"	11	Israel Martínez
Pz 43GA	Santa Marta	11° 09' 21.94"	74° 13' 21.93"	11	Mónica Mozo
Pz 44GA	Santa Marta	11° 09' 40.54"	74° 13' 14.33"	9	Jorge Hernández
Pz 45GA	Santa Marta	11° 09' 40.50"	74° 13' 14.76"	8	-
Pz 46GA	Santa Marta	11° 09' 40.78"	74° 13' 14.78"	8	-
Pz 47GA	Santa Marta	11° 09' 40.40"	74° 13' 10.92"	12	Milton Díaz
Pz 49GA	Santa Marta	11° 09' 40.45"	74° 13' 12.27"	11	Antonio Maldonado
Pz 50GA	Santa Marta	11° 09' 26.49"	74° 13' 20.92"	9	Hotel Sánha Plus
Pz 51GA	Santa Marta	11° 09' 40.33"	74° 13' 07.04"	13	Pilar Díaz Gradados
Pz 52GA	Santa Marta	11° 09' 40.04"	74° 13' 06.57"	13	Andrés Agamez
Pz 54GA	Santa Marta	11° 09' 52.63"	74° 12' 57.98"	24	Félix Boto
Pz 55GA	Santa Marta	11° 09' 52.79"	74° 12' 58.05"	24	Félix Boto
Pz 56GA	Santa Marta	11° 09' 51.51"	74° 12' 54.20"	23	Félix Boto
Pz 57GA	Santa Marta	11° 09' 49.44"	74° 12' 53.45"	22	Félix Boto
Pz 58GA	Santa Marta	11° 09' 54.37"	74° 12' 37.28"	33	Álvaro Terán
Pz 60DJA	Santa Marta	11° 05' 52.53"	74° 13' 04.67"	18	Jaime López
Pz 61DJA	Santa Marta	11° 05' 49.66"	74° 13' 12.10"	10	Enrique Cárdenas
Pz 62DJA	Santa Marta	11° 05' 52.08"	74° 13' 12.36"	10	Enrique Cárdenas
Pz 63DJA	Santa Marta	11° 05' 50.24"	74° 13' 15.45"	1	-
Pz 64DJA	Santa Marta	11° 05' 47.27"	74° 13' 14.15"	3	Oscar Rico
Pz 65DJA	Santa Marta	11° 05' 43.80"	74° 13' 10.50"	7	María López
Pz 66DJA	Santa Marta	11° 05' 51.60"	74° 13' 16.10"	2	Comunitario
Pz 67GA	Santa Marta	11° 08' 59.80"	74° 13' 00.70"	28	-
Pz 68GA	Santa Marta	11° 09' 04.90"	74° 13' 00.70"	27	-

No.	Municipio	Coord. N	Coord. W	Altura GPS	Propietario
Pz 74GA	Santa Marta	11° 11' 34.30"	74° 13' 34.30"	4	Yesid Diazgranados
Pz 75GA	Santa Marta	11° 11' 01.70"	74° 13' 04.90"	13	CAJAMAG
Pz 76GA	Santa Marta	11° 10' 56.61"	74° 13' 01.82"	11	CAJAMAG
Pz 103GA	Santa Marta	11° 07' 35.37"	74° 12' 50.42"	51	Mograteron
Pz 104GA	Santa Marta	11° 07' 28.41"	74° 12' 53.19"	54	EDS Biomax
Pz 105GA	Santa Marta	11° 07' 35.95"	74° 12' 52.13"	50	Sr. Mano
Pz 106GA	Santa Marta	11° 07' 35.94"	74° 12' 50.12"	52	Parqueadero

*Nota.* Suministrado Caracterización básica y del sistema Físicobiótico, CORPAMAG, 2019, (pp. 231-232), POMCA.