

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ciencias Básicas  
Escuela Centroamericana de Geología

*Actualización del Modelo Hidrogeológico de los acuíferos Playa  
Panamá y El Coco, Carrillo, Guanacaste*

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Geología

Pablo Andrés Dormond Sánchez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
Julio, 2021

Tesis sometida y aceptada por el del trabajo final de graduación como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología.

### Tribunal Examinador

MARCO  
BARAHONA  
PALOMO  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por MARCO BARAHONA PALOMO (FIRMA)  
Fecha: 2021.09.14 11:32:04 -06'00'

---

Dr. Marco Barahona Palomo  
Director del Trabajo Final de Graduación

MAXIMILIANO  
GARNIER  
VILLARREAL  
(FIRMA)

Digitally signed by MAXIMILIANO GARNIER VILLARREAL (FIRMA)  
Date: 2021.09.14 13:46:31 -06'00'

---

Dr. Maximiliano Garnier Villarreal  
Integrante del Comité Asesor

SANDRA  
GABRIELA  
ARREDONDO  
OLI (FIRMA)

Digitally signed by SANDRA GABRIELA ARREDONDO LI (FIRMA)  
Date: 2021.10.03 10:31:32 -06'00'

---

M. Sc. Sandra Arredondo Li  
Integrante del Comité Asesor

SYRA  
CARRILLO  
CARRILLO  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por SYRA CARRILLO CARRILLO (FIRMA)  
Fecha: 2021.10.06<sup>®</sup> 07:36:23 -06'00'

---

Lic. Syra Carrillo Carrillo  
Miembro del Tribunal

INGRID VARGAS  
AZOFEIFA  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por INGRID VARGAS AZOFEIFA (FIRMA)  
Fecha: 2021.10.08 14:51:12 -06'00'

---

M. Sc. Ingrid Vargas Azofeifa  
Presidenta del Tribunal

PABLO  
ANDRES  
DORMOND  
SANCHEZ  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por PABLO ANDRES DORMOND SANCHEZ (FIRMA)  
Fecha: 2021.09.07 20:35:51 -06'00'

---

Pablo Andrés Dormond Sánchez  
Postulante

## Dedicatoria

*A Dios, ciencia misteriosa para mí, ciencia que no llego a comprender, ciencia tan alta que yo no la entiendo.*

*A mi madre y a mi abuela, por su apoyo incondicional y su esfuerzo que me permitió crecer y desarrollarme como profesional.*

*A Lucía y el resto de mi familia, piedra angular de mi vida.*

# Agradecimientos

Al Dr. Marco Barahona Palomo quien desde el curso de Hidrogeología logró transmitir en mí su pasión y un deseo por profundizar en esta rama de la geología. También por su apoyo y la motivación recibida en la primera etapa de este proyecto, así como la guía y acompañamiento esenciales para poder transformar una idea en una investigación científica.

Al Dr. Maximiliano Garnier Villarreal, por su acompañamiento durante la investigación, su exigencia e inculcarme la importancia del respaldo numérico y estadístico de la información generada.

A la Máster Sandra Arredondo Li, por su acompañamiento, la transmisión de su conocimiento sobre el área de estudio y orientación durante la investigación.

Al Centro de Investigación de Ciencias Geológicas (CICG) y su director el Dr. Percy Denyer Chavarría por la confianza brindada y hacer posible esta investigación.

A la Dirección de Agua del MINAE que a través de la Lcda. Syra Carrillo Carrillo brindó apoyo logístico y acceso a datos de monitoreo y expedientes de pozos. También a los geólogos Johnny Castro Díaz y Daniel Conejo por su asesoría, conocimiento de la zona y apoyo logístico en campo.

De igual manera le agradezco al Instituto Nacional de Meteorología (IMN), al Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) y al Módulo de Información Oceanográfica del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (MIO-CIMAR), instituciones que facilitaron el acceso a datos e información esenciales para este proyecto.

Al Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología y su encargado, el Máster Jairo García Céspedes por su colaboración en la elaboración de los análisis químicos y enseñanza durante el trabajo de campo.

Especialmente a mi gran amigo y colega Adrián Obando Amador por esas largas conversaciones de análisis y orientación en cuanto a los aspectos hidrogeológicos de esta investigación así como a Juan Pablo Solano Monge por su colaboración para el entendimiento del contexto geológico del área específicamente en cuanto a la Formación Bagaces.

Por último y no menos importante a todos esos amigos y colegas que han estado presentes y han colaborado en las diferentes etapas y aspectos de la investigación como lo son Sebastián Carmona Arias, Federico Rivera Flores, Alejandro Argüello Sáenz, Fabián Soriano Maradiaga, Francisco Chacón Sierra, José Daniel Vargas Bolaños, José María Sequeira, entre muchos otros.

## Resumen

La presente investigación corresponde con la actualización de los modelos hidrogeológicos conceptuales de los acuíferos costeros Playa Panamá y El Coco, el objetivo era conocer el estado actual de ambos ante el crecimiento significativo que ha experimentado el desarrollo turístico en la región de Guanacaste durante los últimos años. Lo anterior mediante la recopilación de la información preexistente, la cuantificación de los parámetros hidráulicos, el análisis de la influencia mareal, el cálculo de la recarga potencial utilizando el método del balance hídrico, el cálculo de la recarga real en el año 2017 y producto de los eventos climáticos extremos Huracán Otto y la Tormenta Tropical Nate mediante el método de la fluctuación de niveles, la caracterización hidrogeoquímica del agua a partir de análisis de iones mayores y por último la determinación de la vulnerabilidad mediante el método DRASTIC.

Ambas cuencas Playa Panamá y El Coco se encuentran dentro de un contexto geológico semejante y, por su cercanía, están sujetas a condiciones climáticas similares. El acuífero principal de cada uno de los sistemas corresponde con los depósitos recientes inconsolidados, ubicados en la parte baja de las cuencas. La recarga de los sistemas acuíferos se da durante la época lluviosa, principalmente durante los meses de mayor intensidad y cantidad de lluvia (septiembre y octubre). Se estima que la recarga potencial total del sistema corresponde con el 25,8% de la precipitación anual para Playa Panamá y el 23% en el sistema acuífero El Coco.

Con base en los datos generados y analizados en esta investigación no se identifican indicios de contaminación por intrusión salina en pozos de abastecimiento público en ninguno de los dos acuíferos y las concentraciones de iones mayores en disolución son inferiores al valor máximo admisible en el reglamento de agua potable vigente. Sin embargo el valor promedio de conductividad eléctrica de ambos acuíferos es superior a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor recomendado por el reglamento de potabilidad vigente en Costa Rica. Por lo tanto, es necesario profundizar y aplicar análisis químicos de iones menores y traza así como métodos geofísicos para identificar la posible variación de ubicación de las zonas de mezcla e intrusión de la misma en ambos acuíferos.

Específicamente en el acuífero Playa Panamá, los valores de las concentraciones de iones mayores producto del muestreo realizado en el 2019 son muy similares a los valores del registro histórico. El pozo CN-246 perteneciente a la ASADA utilizado para abastecimiento público posee valores de conductividad eléctrica de 450 a 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los últimos 5 años. El piezómetro CN-736 presenta valores promedio de conductividad eléctrica (12.91 mS/cm) y salinidad (7.63 PSU) típicos de zona de mezcla.

En cuanto al acuífero El Coco, la concentración de iones mayores medidas en el año 2019 presentan un aumento con respecto al año 2005. El ion calcio aumentó un 29%, magnesio 19%, sodio 30%, potasio 57%, bicarbonato 8%, cloruro 15%, sulfato 58 % y nitrato 56%. A pesar de este aumento en promedio, el ion calcio, magnesio, sodio, potasio y cloruro se encuentran dentro del rango de potabilidad indicado por el reglamento de potabilidad vigente en Costa Rica; el ion sulfato (28.9 (mg/l) y nitrato (19.76 (mg/l) superan el valor recomendado por este reglamento. La conductividad eléctrica también aumentó (548  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), un 25%.

Aproximadamente 15 años posteriores a la elaboración del primer modelo hidrogeológico conceptual de ambas cuencas, se determina que no ha ocurrido una disminución en la recarga producto de los cambios del uso de suelo. El aumento en la concentración del nitrato y el sulfato sugieren que el mal manejo de las aguas residuales, las actividades humanas cotidianas y asociadas al desarrollo en las cuencas ha causado un deterioro de la calidad de agua. Los sectores más cercanos a la costa requieren medidas de gestión y protección del recurso diferenciadas y más rigurosas ya que además de su condición natural de vulnerabilidad, son los sectores con mayor grado de desarrollo turístico y comercial.

**Palabras Clave:** *El Coco, Playa Panamá, hidrogeología, acuífero costero, intrusión salina, influencia mareal, parámetros hidráulicos, recarga potencial, recarga real, hidrogramas de pozos, monitoreo de pozos, índices hidrogeoquímicos, potabilidad, fenómenos climáticos, vulnerabilidad intrínseca, método DRASTIC.*

# Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Justificación .....	1
1.2	Objetivos de la investigación.....	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
1.3	Ubicación del área de estudio .....	3
1.4	Uso del agua subterránea .....	4
1.5	Hipótesis.....	4
1.6	Marco Teórico .....	4
1.6.1	Modelos Hidrogeológicos conceptuales .....	4
1.6.2	Cambio Climático .....	5
1.6.3	Mareas .....	5
1.6.4	Acuíferos costeros .....	6
1.6.5	Intrusión Salina .....	6
1.6.6	Influencia de las mareas en los acuíferos .....	7
1.6.7	Cálculo de Parámetros hidráulicos a partir de la influencia mareal .....	8
1.6.8	Cálculo de la Recarga Real mediante la variación temporal de niveles .....	9
1.6.9	Cálculo de la Recarga Potencial mediante un Balance Hídrico de Suelos.....	10
1.6.10	Caracterización hidrogeoquímica de las aguas .....	12
1.6.11	Determinación de la calidad de agua .....	14
1.6.12	Determinación de la vulnerabilidad del acuífero .....	14
1.7	Metodología .....	16
1.7.1	Revisión de la información disponible .....	16
1.7.2	Procesamiento y comprobación de modelos existentes .....	16
1.7.3	Determinación del flujo del agua subterránea .....	17
1.7.4	Determinación de la recarga potencial de los acuíferos.....	17
1.7.5	Determinación de la recarga real .....	32
1.7.6	Determinación de la calidad de agua.....	35
1.7.7	Determinación de la vulnerabilidad del acuífero.....	39
1.7.8	Variación temporal y correlación entre variables.....	50
1.8	Limitaciones .....	51
2	Climatología .....	52
2.1.1	Precipitación .....	52
2.1.2	Temperatura y Humedad relativa.....	53

2.1.3	Velocidad de Viento y Radiación .....	54
2.1.4	Evapotranspiración Potencial (ETP) .....	54
3	Contexto Geológico .....	56
3.1.1	Complejo de Nicoya (Kn).....	56
3.1.2	Formación Bagaces .....	56
3.1.3	Depósitos Epivolcanoclásticos (NQ-de).....	57
3.1.4	Depósitos Aluviales, Coluviales y de Playa Arenosa (Qal, Qc, Qp) .....	58
4	Contexto Geomorfológico .....	60
4.1.1	Laderas denudacionales de pendiente media (D1) .....	60
4.1.2	Laderas denudacionales de pendiente baja (D2).....	60
4.1.3	Superficies de aplanamiento (D3).....	60
4.1.4	Cerros relictos o residuales (D4) .....	60
4.1.5	Planicie Aluvial (F1) .....	60
4.1.6	Playa (M1).....	60
4.1.7	Cerros aislados (S1).....	60
4.1.8	Meseta (V1) .....	61
5	Sistema Acuífero Playa Panamá .....	63
5.1	Marco Hidrogeológico.....	63
5.1.1	Características de las unidades hidrogeológicas identificadas .....	63
5.1.2	Geometría del acuífero principal (P-1) .....	64
5.2	Infiltración .....	68
5.2.1	Uso de suelo y Capacidad de Infiltración .....	68
5.2.2	Precipitación que se infiltra mensualmente .....	69
5.2.3	Esorrentía .....	70
5.3	Recarga potencial.....	71
5.3.1	Evapotranspiración Real .....	71
5.3.2	Recarga potencial mensual y anual .....	72
5.4	Recarga real.....	75
5.4.1	Cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante el análisis de la influencia mareal .....	75
5.4.2	Comparación de metodologías para el cálculo de transmisividad y la conductividad hidráulica .....	78
5.4.3	Recarga neta anual .....	80
5.4.4	Recarga neta durante la época lluviosa .....	80
5.4.5	Recarga total durante el Huracán Otto.....	81
5.4.6	Recarga total durante la Tormenta Tropical Nate .....	84
5.4.7	Comparación de la recarga real en diferentes periodos.....	86

5.5	Calidad de agua .....	88
5.5.1	Características físicas .....	88
5.5.2	Características microbiológicas .....	107
5.6	Vulnerabilidad del acuífero .....	107
6	Sistema Acuífero El Coco .....	111
6.1	Marco Hidrogeológico.....	111
6.1.1	Características de las unidades hidrogeológicas identificadas .....	111
6.1.2	Geometría del acuífero principal (C-1) .....	111
6.2	Infiltración .....	115
6.2.1	Precipitación que se infiltra mensualmente .....	117
6.2.2	Escorrentía .....	118
6.3	Recarga potencial.....	119
6.3.1	Evapotranspiración Real .....	119
6.3.2	Recarga potencial mensual y anual .....	120
6.4	Recarga real.....	123
6.4.1	Cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante el análisis de la influencia mareal .....	123
6.4.2	Comparación de metodologías para el cálculo de transmisividad y la conductividad hidráulica .....	125
6.4.3	Recarga neta anual .....	125
6.4.4	Recarga neta durante la época lluviosa .....	127
6.4.5	Recarga total durante el Huracán Otto.....	128
6.4.6	Recarga total durante la Tormenta Tropical Nate .....	131
6.4.7	Comparación de la recarga real en diferentes periodos.....	133
6.5	Calidad de agua .....	136
6.5.1	Características físicas .....	136
6.5.2	Características microbiológicas .....	150
6.6	Vulnerabilidad del acuífero .....	152
7	Síntesis del Modelo Conceptual .....	154
8	Conclusiones .....	157
9	Recomendaciones.....	160
10	Bibliografía.....	162
11	Anexos .....	170

## Índice de Tablas

Tabla 1	Pruebas de Infiltración y Resultados obtenidos.....	18
Tabla 2	Coficiente de infiltración por efecto de la pendiente Kp .....	21

Tabla 3 Coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal Kv .....	22
Tabla 4 Datos de densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez utilizados .....	26
Tabla 5 Valores utilizados para el mapa de Profundidad de raíz .....	28
Tabla 6 Constantes de disociación .....	39
Tabla 7 Profundidad del agua (D) .....	40
Tabla 8 Recarga neta (R) .....	41
Tabla 9 Tipo de acuífero (A) .....	42
Tabla 10 Tipo de suelo (S) .....	43
Tabla 11 Topografía (T) .....	45
Tabla 12 Impacto de la zona no saturada (I) .....	46
Tabla 13 Conductividad hidráulica (C) .....	48
Tabla 14 Clasificación del índice de vulnerabilidad DRASTIC .....	49
Tabla 15 Precipitación promedio histórica (1999-2017) Playa Panamá .....	69
Tabla 16 Recarga mensual, Playa Panamá .....	72
Tabla 17 Volumen de Recarga potencial anual, Playa Panamá .....	74
Tabla 18 Análisis comparativo del resultado de la recarga potencial anual .....	75
Tabla 19 Registro histórico de pruebas de bombeo disponible. ....	76
Tabla 20 Cálculo del Coeficiente de almacenamiento en el pozo CN-736 .....	77
Tabla 21 Comparación de Parámetros hidráulicos según método de cálculo, Playa Panamá .....	78
Tabla 22 Valores del cálculo de la recarga neta del año 2017, Playa Panamá .....	80
Tabla 23 Valores del cálculo de la recarga neta de la época lluviosa 2017, Playa Panamá .....	81
Tabla 24 Valores del cálculo de la recarga neta de septiembre y octubre 2017, Playa Panamá .....	81
Tabla 25 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto del Huracán Otto, Playa Panamá .....	84
Tabla 26 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto de la Tormenta Tropical Nate, Playa Panamá .....	86
Tabla 27 Resumen de los resultados obtenidos utilizando el método WTF, Playa Panamá .....	86
Tabla 28 Temperatura del agua subterránea, Playa Panamá .....	88
Tabla 29 Resumen estadístico de las mediciones automáticas, CN-259 .....	96
Tabla 30 Resumen estadístico de las mediciones automáticas, CN-736 .....	96
Tabla 31 Concentraciones de cationes según el registro histórico en el pozo Mercedes (CN-156), Playa Panamá .....	101
Tabla 32 Resultados del muestreo de Julio 2019, Playa Panamá .....	103
Tabla 33 Concentraciones de aniones según el registro histórico en el pozo Mercedes (CN-156), Playa Panamá .....	103
Tabla 34 Resultados del muestreo Julio 2019 .....	105
Tabla 35 Variación temporal de los índices hidrogeoquímicos, CN-156 (Mercedes) .....	106
Tabla 36 Precipitación promedio histórica (1999-2017) El Coco .....	117
Tabla 37 Recarga mensual, El Coco .....	120
Tabla 38 Volumen de Recarga potencial anual, El Coco .....	122
Tabla 39 Registro histórico de pruebas de bombeo disponibles. ....	123
Tabla 40 Cálculo del coeficiente de almacenamiento, CN-741 .....	124
Tabla 41 Cálculo del Coeficiente de almacenamiento, CN-742 .....	125
Tabla 42 Comparación de Parámetros hidráulicos según método de cálculo, El Coco .....	125
Tabla 43 Valores del cálculo de la recarga neta del año 2017, El Coco .....	127
Tabla 44 Valores del cálculo de la recarga neta de la época lluviosa 2017, El Coco .....	127
Tabla 45 Valores del cálculo de la recarga neta de septiembre y octubre 2017, El Coco .....	127
Tabla 46 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto del Huracán Otto, El Coco .....	130
Tabla 47 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto de la Tormenta Tropical Nate, El Coco .....	131
Tabla 48 Temperatura del agua subterránea, El Coco .....	136
Tabla 49 Resumen estadístico de mediciones semestrales conductividad eléctrica, El Coco .....	139
Tabla 50 Resumen estadístico de mediciones automáticas de conductividad eléctrica, El Coco .....	139

Tabla 51 Resumen estadístico de las campañas de muestreo. ....	140
Tabla 52 Resumen estadístico de mediciones automáticas de TDS, El Coco .....	142
Tabla 53 Resumen estadístico de mediciones automáticas de salinidad, El Coco .....	142
Tabla 54 Resumen estadístico de resultados de alcalinidad del registro histórico, El Coco (n=164) .....	143
Tabla 55 Resumen estadístico de resultados de dureza total del registro histórico, El Coco (n=146) .....	143
Tabla 56 Resultados de alcalinidad y dureza, muestreo julio 2019, El Coco .....	144
Tabla 57 Resumen estadístico de la concentración de cationes mayores del registro histórico, El Coco .....	144
Tabla 58 Comparación de resultados de las campañas de muestreo 2005 y 2019, El Coco .....	145
Tabla 59 Tendencia espacial de las concentraciones de cationes, El Coco .....	145
Tabla 60 Resumen estadístico de la concentración de cationes mayores del registro histórico, El Coco .....	147
Tabla 61 Comparación de resultados de las campañas de muestreo 2005 y 2019, El Coco. ....	147
Tabla 62 Tendencia espacial de las concentraciones de aniones, El Coco .....	149
Tabla 63 Comportamiento espacial de los índices hidrogeoquímicos, El Coco .....	149
Tabla 64 Resumen de las propiedades de los acuíferos principales de las cuencas de estudio.....	154

## Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio .....	3
Figura 2 Gráfico esquemático de la metodología de Schosinsky (2006) para el cálculo de la recarga potencial .....	11
Figura 3 Diagrama Piper, tomado de Fetter (2014) .....	13
Figura 4 Interpretación del diagrama Piper, tomado de Appelo & Postma (2005). .....	14
Figura 5 Mapa con ubicación de los pozos según la base de datos del SENARA. ....	16
Figura 6 Mapa de pozos monitoreados mensualmente por la Dirección de Agua .....	17
Figura 7 Ubicación de las pruebas de infiltración utilizadas .....	20
Figura 8 Mapa de la fracción que infiltra por textura del suelo .....	21
Figura 9 Mapa de la fracción que infiltra por efecto de la pendiente .....	22
Figura 10 Mapa del uso de suelo actual .....	23
Figura 11 Mapa de la fracción que infiltra por la cobertura vegetal .....	23
Figura 12 Mapa del coeficiente de infiltración (Ci) .....	24
Figura 13 Mapa del coeficiente de retención de follaje (Cfo) .....	25
Figura 14 Mapa de Ubicación de las Muestras de suelo realizados por Arredondo 2009 y Gómez 2005 .....	27
Figura 15 Mapa de densidad aparente .....	27
Figura 16 Mapa de profundidad de raíces .....	28
Figura 17 Mapa de capacidad de campo (CC) .....	29
Figura 18 Mapa de punto de marchitez (PM) .....	29
Figura 19 Mapa de ubicación de los pozos monitoreados automáticamente .....	33
Figura 20 Mapa de las áreas de influencia de cada pozo .....	35
Figura 21 Campaña de muestreo de aguas y medición de niveles (Julio 2019) .....	36
Figura 22 Mapa de los sitios de muestreo .....	38
Figura 23 Mapa de pozos monitoreados semestralmente (LNA) .....	38
Figura 24 Mapa del factor hidrogeológico D .....	41
Figura 25 Mapa del factor hidrogeológico R .....	42
Figura 26 Mapa del factor hidrogeológico A .....	43
Figura 27 Mapa del factor hidrogeológico S .....	44
Figura 28 Mapa del factor hidrogeológico S para pesticidas .....	44
Figura 29 Mapa del factor hidrogeológico T .....	45
Figura 30 Mapa del factor hidrogeológico T para pesticidas .....	46
Figura 31 Mapa del factor hidrogeológico I .....	47
Figura 32 Mapa del factor hidrogeológico I para pesticidas .....	47
Figura 33 Mapa del factor hidrogeológico C .....	48
Figura 34 Mapa del factor hidrogeológico C para pesticidas .....	49
Figura 35 Esquema de un pozo monitoreado con sensores .....	50
Figura 36 Promedio de precipitación mensual histórico ( 1999-2017) .....	52
Figura 37 Variación temporal de la precipitación anual (mm) y temperatura promedio anual (°C) para el periodo 2010-2018. ....	53
Figura 38 Temperatura (°C) y Humedad Promedio(%) para el periodo 1999-2017. ....	53
Figura 39 Software CROPWAT 8.0, cálculo de ETP .....	55
Figura 40 Comparación de métodos disponibles para el cálculo de ETP mensual .....	55
Figura 41 Mapa geológico de un sector de la hoja Carrillo Norte .....	59
Figura 42 Mapa geomorfológico de un sector de la hoja Carrillo Norte .....	62
Figura 43 Mapa de la red de flujo años 2017 y 2018, Playa Panamá .....	65
Figura 44 Lámina de perfiles, sistema acuífero Playa Panamá .....	66

<i>Figura 45 Mapa de unidades hidrogeológicas, Playa Panamá</i> .....	67
<i>Figura 46 Mapa de uso de suelo, Playa Panamá</i> .....	68
<i>Figura 47 Mapa de coeficiente de infiltración (Ci), Playa Panamá</i> .....	69
<i>Figura 48 Mapa anual de la precipitación que infiltra en el suelo, Playa Panamá</i> .....	70
<i>Figura 49 Mapa anual de escorrentía, Playa Panamá</i> .....	71
<i>Figura 50 Mapa de evapotranspiración real, Playa Panamá</i> .....	72
<i>Figura 51 Mapa de recarga potencial anual, Playa Panamá</i> .....	73
Figura 52 Recarga potencial promedio por unidad de área, Playa Panamá .....	74
Figura 53 Correlograma entre la marea y el nivel de agua en el pozo CN-736 para los meses de enero a abril (n=2760) .....	75
Figura 54 Hidrograma del pozo CN-736 durante los días 9 al 13 de marzo .....	79
Figura 55 Precipitación registrada en la estación Aeropuerto Daniel Oduber durante el año 2017 .....	80
Figura 56 Precipitación del 24 al medio días del 25 de noviembre 2016 producto del Huracán Otto .....	82
Figura 57 Fluctuación de niveles producto del Huracán Otto, Playa Panamá .....	83
Figura 58 Precipitación en el Aeropuerto Daniel Oduber durante el periodo de mayor intensidad de la Tormenta Tropical Nate .....	84
Figura 59 Fluctuación del Nivel en los puntos de monitoreo durante la Tormenta Tropical Nate, Playa Panamá .....	85
Figura 60 Hidrogramas de los pozos monitoreados durante el año 2017 .....	87
Figura 61 Relación entre la temperatura atmosférica, nivel y temperatura del agua en el pozo CN-736 (n=3412) .....	89
Figura 62 Variación de la temperatura en el pozo CN-246 durante el año 2017 .....	90
Figura 63 Variación de la temperatura en el pozo CN-259 durante el año 2017 .....	90
Figura 64 Comportamiento de la temperatura en el pozo CN-736 (26/3/2017-31/3/2017) .....	91
Figura 65 Correlograma entre el nivel y la temperatura del agua en el pozo CN-736 para marzo 2018 (n=744) .....	92
Figura 66 Comportamiento de la temperatura en el pozo CN-736 durante el año 2017 .....	92
Figura 67 Registro de monitoreo del pozo CN-156, conductividad eléctrica del agua .....	93
Figura 68 Variación del nivel y la conductividad en el pozo CN-259, periodo 1/1/2018 - 30/4/2019 .....	94
Figura 69 Variación de la conductividad eléctrica en el Pozo CN-259 durante la Tormenta Tropical. Nate .....	95
Figura 70 Matriz de correlación de Conductividad, Salinidad y TDS en el pozo CN-259 (n=25358) .....	95
Figura 71 Variación de la conductividad eléctrica en el pozo CN-736 durante el periodo junio 2016 y julio 2018 .....	97
Figura 72 Variación de conductividad, temperatura y nivel estático (20 al 22 de marzo 2018) .....	97
Figura 73 Correlograma entre el nivel y la conductividad eléctrica del agua en el pozo CN-736 para marzo 2018 (n=744) .....	98
Figura 74 Registro de monitoreo del pozo CN-156, pH del agua .....	99
Figura 75 Registro de monitoreo del pozo CN-156, dureza y alcalinidad del agua .....	99
Figura 76 Relación entre mediciones de pH, Dureza y Alcalinidad en el pozo CN-156 (n=6) .....	100
Figura 77 Registro de monitoreo del pozo CN-156, concentración de cationes en el agua .....	102
Figura 78 Registro de monitoreo del pozo CN-156, concentración de aniones en el agua .....	104
Figura 79 Diagrama Piper del registro histórico de análisis de iones mayores, Playa Panamá .....	106
Figura 80 Mapa de vulnerabilidad relativa, Playa Panamá .....	109
Figura 81 Mapa de vulnerabilidad relativa (pesticidas) Playa Panamá .....	110
Figura 82 Mapa de la red de flujo años 2017 y 2018, El Coco .....	113
Figura 83 Lámina de perfiles, sistema acuífero El Coco .....	114
Figura 84 Mapa de unidades hidrogeológicas, El Coco .....	115
Figura 85 Mapa de uso de suelo, El Coco .....	116
Figura 86 Mapa de coeficiente de infiltración, El Coco .....	116
Figura 87 Mapa anual de la precipitación que infiltra en el suelo, El Coco .....	118
Figura 88 Mapa anual de escorrentía, El Coco .....	119
Figura 89 Mapa de evapotranspiración anual, El Coco .....	120

Figura 90 Mapa de recarga potencial anual, El Coco.....	121
Figura 91 Recarga potencial promedio por unidad de área, El Coco.....	122
Figura 92 Comportamiento de la marea e hidrogramas de los pozos CN-741 y CN-742 durante 3 días .....	124
Figura 93 Precipitación del 24 al medio al 25 de noviembre 2016 producto del Huracán Otto .....	128
Figura 94 Fluctuación de niveles en los pozos CN-735, CN-741, CN-742 y CN-743 producto del Huracán Otto.....	129
Figura 95 Fluctuación de niveles en los pozos CN-744 y CN-245 producto del Huracán Otto .....	130
Figura 96 Precipitación del 3 al 7 de octubre 2007 producto de la Tormenta Tropical Nate.....	131
Figura 97 Fluctuación de niveles en los pozos CN-732, CN-741, CN-742 y CN-743 producto de la Tormenta Tropical Nate .....	132
Figura 98 Fluctuación de niveles en los pozos CN-744 y CN-245 producto de la Tormenta Tropical Nate.....	133
Figura 99 Precipitación registrada durante el año 2017 y la fluctuación de niveles en los pozos CN-735 y CN-741 durante el año .....	134
Figura 100 Fluctuación de niveles en los pozos CN-742, CN-743, CN-744 y CN-245 durante el año 2017 .....	135
Figura 101 Variación de la temperatura en los pozos CN-735, CN-741 y CN-742 durante el año 2017 .....	137
Figura 102 Variación de la temperatura en los pozos CN-744 y CN-245 durante el año 2017.....	138
Figura 103 Variación de la conductividad eléctrica en el pozo CN-741 durante el año 2017 .....	141
Figura 104 Variación de la conductividad eléctrica en el pozo CN-72 y CN-245 durante el año 2017 .....	141
Figura 105 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de agua .....	143
Figura 106 Registro de monitoreo del Pozo 4, concentración de cationes en el agua .....	146
Figura 107 Registro de monitoreo del Pozo 4, concentración de aniones en el agua .....	148
Figura 108 Diagrama Piper del registro histórico de análisis de iones mayores, El Coco .....	151
Figura 109 Mapa de vulnerabilidad relativa, El Coco .....	153
Figura 110 Mapa de vulnerabilidad relativa (pesticidas) El Coco .....	153
Figura 111 Esquema del Modelo Conceptual Hidrogeológico. Acuífero Playa Panamá .....	156
Figura 112 Esquema del Modelo Conceptual Hidrogeológico. Acuífero El Coco .....	156

## Lista de siglas y acrónimos

	<b>Significado</b>
ASADA	Asociaciones administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados
AYA	Acueductos y Alcantarillados
CICG	Centro de Investigación en Ciencias Geológicas
CMEMS	Copernicus Marine Service
CN	Hoja topográfica Carrillo Norte
CWERC	Community Water and Energy Resource Center
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
ICT	Instituto Costarricense de Turismo
IDW	Inverse Distance Weighting
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas
MINAE	Ministerio de Ambiente y Electricidad
MINSA	Ministerio de Salud
MIO-CIMAR	Módulo de Información Oceanográfica del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, UCR
MBNS	Metros bajo el nivel del suelo
OK	Ordinary Krigging
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de Naciones Unidas
SENARA	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIMASTIR	Sistema de Monitoreo a Tiempo Real
USGS	United States Geological Service
WTF	Water Table Fluctuation Method

# 1 Introducción

## 1.1 Justificación

El decimoquinto Informe del Estado de la Nación, identificó las principales problemáticas existentes relacionadas con el recurso hídrico y su gestión (Astorga, 2009). Por ejemplo, el crecimiento inmobiliario, turístico, comercial y urbanístico desmedido que no considera la vulnerabilidad del Pacífico Norte ni la disponibilidad real de agua.

En posteriores informes del Estado de la Nación estas problemáticas han vuelto a ser señaladas. Herrera (2017) establece que factores como el crecimiento significativo de zonas urbanas con escasa planificación u ordenamiento territorial, cambios abruptos en el uso de la tierra y su uso intensivo, han generado presión sobre las fuentes de agua disponible.

Previamente, Angulo (2015) agrega como parte de la problemática no contar con mapas hidrogeológicos actualizados. Lo anterior se debe a que no se realizan actualizaciones de los estudios hidrogeológicos donde se utilice como base la condición actual del acuífero y el ambiente.

Según el Instituto Meteorológico Nacional, el Pacífico Norte es una de las zonas de menor riqueza hídrica del país. Esta presenta notables disminuciones del caudal de sus ríos durante la estación seca, que se extiende del mes de diciembre a julio (“Clima de Costa Rica y Variabilidad Climática,” s.f.). Alvarado et al. (2012) proyectan que en esta zona habrá una disminución en las precipitaciones de hasta 15% para el año 2020 y hasta 35% para el año 2050.

Barrantes & Jiménez (2004) reportaron que el 32% de los pozos concesionados se encontraban en la región Chorotega. Cuatro años después, Astorga (2009) establece que, la cuenca de la Península de Nicoya seguía siendo una de las más concesionadas en volumen de agua, corroborando que la principal fuente de abastecimiento de agua en la región son los acuíferos.

Parte de la problemática es que las concesiones se otorgan sin contar con estudios científico-técnicos precisos y actuales, esto acarrea problemas de sobreexplotación de los acuíferos, evidenciado en la disminución de los niveles de agua y en la salinización de pozos por efectos de intrusión salina (Astorga, 2009). La autora, en ese mismo informe, identificó 21 acuíferos costeros de la península por presentar alto riesgo de contaminación salina, entre ellos el acuífero El Coco.

En el año 2010 entra en vigencia el decreto ejecutivo el *Reglamento de registro de pozos sin número y habilitar el trámite de concesión de aguas subterráneas N° 35882-MINAET*, el cual, en su artículo número 8, establece que la Dirección de Agua no recibirá solicitudes de inscripción de pozos y correspondientes solicitudes de concesión de aguas dentro del acuífero El Coco, Playa Panamá y Playa Hermosa. Esto como medida de prevención ante el posible daño de estos acuíferos.

Durante el segundo semestre del año 2016, el medio de comunicación digital La Voz de Guanacaste, reportó que el agua proveniente del acueducto Mercedes (ubicado en Playa Panamá) era ocasionalmente salada y de color café (Cruz, 2016). En la misma publicación, autoridades del AyA confirman que en junio del 2016 se detuvo la operación de varios pozos debido a que presentaban salinización, además, Cruz (2016) menciona que en este mismo año el Ministerio de Salud de Costa Rica (MINSa) encontró niveles altos de cloruro en el agua que abastece la comunidad de Hermosa, lo que es un indicio de posible salinización.

Es importante destacar que SENARA (2016) también posee un mapa en el que delimita los acuíferos aluviales Ocotol, El Coco, Playa Hermosa y Playa Panamá. Además presenta la zonificación de áreas donde no se otorgan permisos de inscripción y perforación de pozos debido a su vulnerabilidad a la intrusión salina.

La presente investigación busca conocer el estado actual de los acuíferos Playa Panamá y El Coco a través de la caracterización hidrogeoquímica, el análisis de la variación de niveles de agua y el cálculo de la recarga, para así poder identificar los posibles cambios que estos han sufrido en los últimos 15 años producto del crecimiento urbano, el cambio del uso de la tierra, el aumento de la demanda, cambio climático (fenómenos naturales, el cambio en las precipitaciones), etcétera. Además de establecer un antecedente sobre el verdadero impacto y la importancia de actualizar los estudios hidrogeológicos.

Estos acuíferos fueron seleccionados debido a que son de gran importancia para el distrito de Sardinal y cuentan con una línea base robusta. El sistema acuífero El Coco cuenta con el estudio hidrogeológico realizado en el 2005 por María Gómez como tesis de Maestría en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología de la Universidad de Costa Rica (Gómez, 2005), el acuífero Playa Panamá cuenta con el estudio hidrogeológico elaborado por Daniel Murillo en el 2007 como tesis de maestría en Geología Ambiental de la Universidad Federal de Paraná (Murillo, 2007), él mismo realizó un segundo estudio para el ICT en el 2008 (Murillo, 2008), y más recientemente el estudio realizado por la hidrogeóloga Sandra Arredondo en el 2009 para conocer la disponibilidad de agua del mismo (Arredondo, 2009).

Esta información, junto con la disponible en la Dirección de Agua del MINAE (inventario y expedientes de los pozos registrados, registros de precipitaciones, datos de monitoreo mensual de niveles, datos de monitoreo horario de niveles, temperatura y conductividad eléctrica de 9 pozos (3 ubicados en Playa Panamá y 6 en El Coco)) y la generada por esta investigación, permite conocer el estado actual de ambos acuíferos e identificar los posibles cambios que estos han sufrido.

El monitoreo horario de niveles y otros parámetros mencionados corresponde al creado por el proyecto del MINAE, llamado SIMASTIR (Sistema de Monitoreo de Agua Subterránea en Tiempo Real), cuyo objetivo es implementar una red nacional de monitoreo automatizada mediante telemetría. Actualmente, el proyecto cuenta con 44 pozos en diferentes acuíferos, de los cuales 9 se encuentran en el área de estudio y son monitoreados desde el 2016.

Contar con este detalle de información sobre la variación de los niveles, permite analizar la influencia de la marea en ambos sistemas y, con base en esto, calcular los parámetros hidráulicos de los acuíferos utilizando la metodología definida por Jacob (1950) y Ferris (1952). Esta ha sido muy utilizada en otros países y recientemente utilizada por Murillo (2017) en el acuífero costero Palmar-Cortés, sin embargo previamente ha sido poco utilizada en Costa Rica. Con la creación y futuro crecimiento de la red nacional de monitoreo automatizada, esta metodología puede tomar mayor importancia para la caracterización de los acuíferos monitoreados.

Además, se aplica la metodología descrita detalladamente por Healy & Cook (2002), utilizada por Mora (1978) y recientemente por Monge (2015) y Alvarado (2018), para calcular la recarga de los acuíferos y utilizar los resultados como complemento a la metodología tradicional de Schosinsky (2006) para el cálculo de la recarga potencial.

## 1.2 Objetivos de la investigación

### 1.2.1 Objetivo General

Actualizar el modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos costeros Playa Panamá y El Coco mediante la caracterización hidrogeoquímica del agua y el cálculo de la recarga, con el propósito de generar información actualizada que sirva para la gestión y aprovechamiento del recurso hídrico.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la información hidrogeológica mediante la cuantificación de los parámetros hidráulicos y la recarga potencial del sistema acuífero para la actualización del modelo conceptual.
- Analizar algunos parámetros físico-químicos que permitan determinar la calidad del agua y la identificación de fuentes potenciales de contaminación, con el fin de conocer el estado actual del recurso hídrico.
- Determinar la variación temporal del flujo y calidad del agua de ambos acuíferos mediante la comparación de los resultados de esta investigación y los modelos hidrogeológicos conceptuales elaborados hace una década, con el fin de valorar la importancia de la actualización de los estudios hidrogeológicos.

### 1.3 Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde con las cuencas hidrográficas de dos acuíferos, el acuífero Playa Panamá y El Coco. Ambas se ubican en el distrito de Sardinal del cantón de Carrillo, en la provincia de Guanacaste (Figura 1).

La cuenca del acuífero Playa Panamá se encuentra a 26 km del centro de la ciudad de Liberia. Abarca un área aproximada de 20 km<sup>2</sup> y sus cuerpos de agua desembocan en el Océano Pacífico en el sector de Bahía Culebra. Sus principales cuerpos de agua superficiales son el Estero Panamá y las quebradas Pita y Rocha. Además se encuentran las quebradas secundarias intermitentes Espavel, Ojoche, Pozo Verde, Laja, Penca, Grande, y Sardino (Arredondo, 2009).

La cuenca del acuífero El Coco se encuentra a 34 km del centro de la ciudad de Liberia. Abarca un área aproximada de 20 km<sup>2</sup> y sus cuerpos de agua desembocan en el Océano Pacífico en el sector de Bahía El Coco. Sus principales cuerpos de agua superficiales son las quebradas Cabo del Hacha, Alcornoque y San Francisco, estas son de carácter intermitente (Gómez, 2005).

Ambas cuencas se encuentran en la hoja topográfica del IGN, Carrillo Norte a escala 1:50 000.

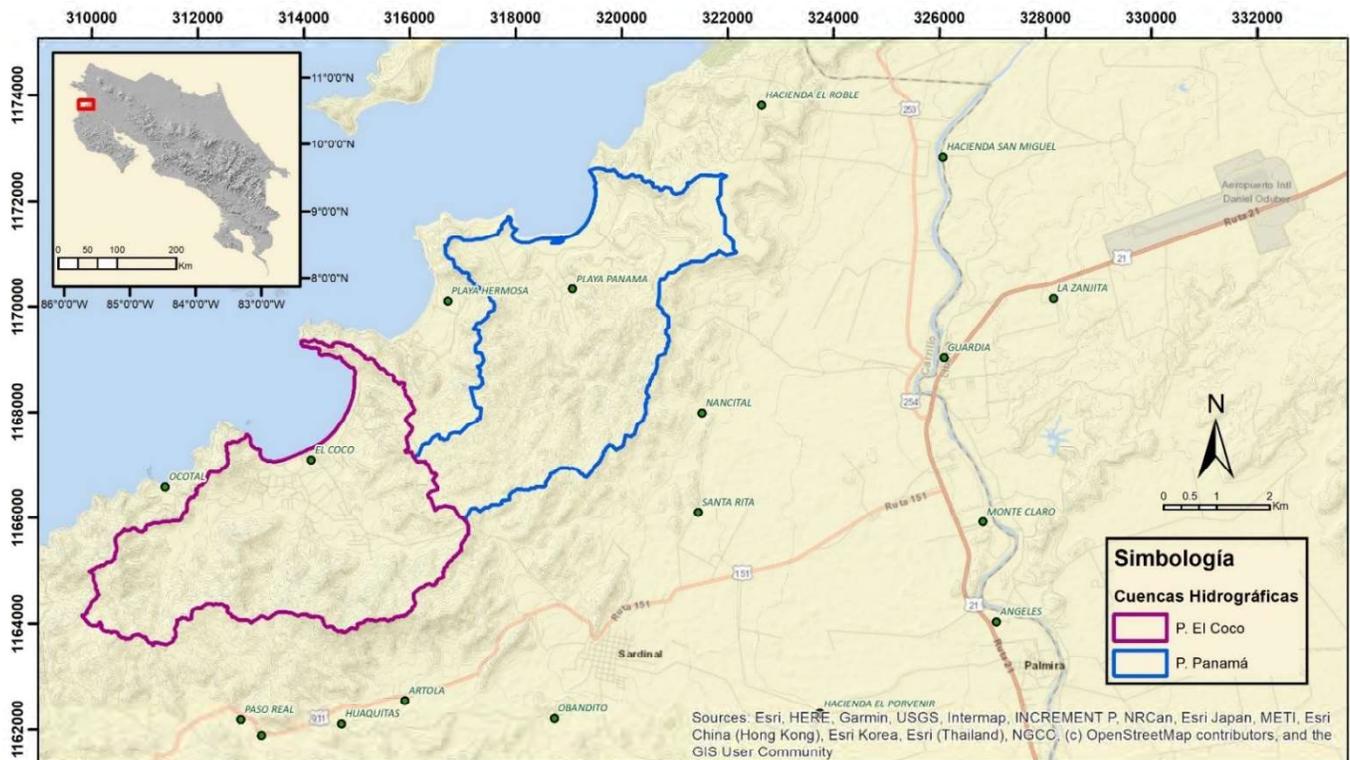


Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio

## 1.4 Uso del agua subterránea

El agua subterránea en el área de estudio es utilizada principalmente para consumo humano, doméstico, turístico y en menor grado, agrícola.

En el caso de Playa Panamá, el abastecimiento de agua potable es realizado a través del acueducto rural (ASADA), el cual cuenta con un único pozo para sus aproximadamente 400 habitantes. Ante la necesidad de mejorar el suministro y el riesgo de salinización del acuífero, en febrero del año 2020, se oficializó el convenio entre esta entidad, el Instituto Costarricense de Turismo (ICT) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en el cual este último se compromete a aportar a la ASADA agua proveniente del acueducto Trancas-Papagayo para garantizar el acceso a agua potable a toda la comunidad y favorecer la recuperación del acuífero Playa Panamá (“Convenio de AyA, ICT y ASADA garantizará agua a Playa Panamá,” 2020).

En El Coco la situación es muy similar, el abastecimiento de agua potable es realizado a través del acueducto perteneciente al AyA ubicado en esta misma cuenca. Este acueducto cuenta con un campo de 4 pozos, sin embargo ante el riesgo de intrusión salina debido al sobreuso del acuífero durante años de sequía, el AyA desarrolló un proyecto para distribuir agua proveniente del acueducto Sardinal a esta comunidad (“Nuevo acueducto Sardinal-El Coco-Ocotol beneficiará a 34.000 personas en Carrillo,” 2019).

En ambas comunidades varias familias, tiendas comerciales y centros turísticos cuentan con pozos propios. El agua proveniente de estos pozos es utilizada principalmente para riego, limpieza y actividades recreativas del turismo.

## 1.5 Hipótesis

En los últimos 15 años, los cambios de precipitación y temperatura debido a la variabilidad climática en el Pacífico Norte, los cambios en el uso del suelo debido al crecimiento turístico y desarrollo en la región han provocado una reducción en la recarga y deterioro de la calidad del agua. Este último asociado a la intrusión salina y el aumento de posibles fuentes de contaminación.

## 1.6 Marco Teórico

### 1.6.1 Modelos Hidrogeológicos conceptuales

Un modelo de aguas subterráneas pretende representar las características esenciales de un sistema de aguas subterráneas. Estos se realizan considerando que el entendimiento de las leyes básicas de física, química y biología que describen el flujo y transporte de agua subterránea y una descripción del sistema acuífero en estudio permiten cuantificar la representación de las relaciones causa y efecto de este. A su vez el entendimiento cuantitativo de estas relaciones permite realizar pronósticos (Alley, Reilly, & Franke, 1999).

Custodio & Llamas (1996), Todd & Mays (2005) y Fetter (2014) coinciden en que los modelos conceptuales que describen las condiciones actuales de un sistema acuífero, son considerados estáticos y son la base de modelos dinámicos como lo son los modelos físicos, analógicos y numéricos.

Roscoe Moss (1990) establece que un modelo hidrogeológico conceptual debe incluir la estimación de parámetros de las formaciones como transmisividad, capacidad de almacenamiento, gradiente hidráulico, límites físico que condicionan el régimen de flujo. El autor menciona la importancia de contar con información sobre las actividades humanas que pueden afectar o influir en el modelamiento.

### 1.6.2 Cambio Climático

El calentamiento global actual inició hace 150 años, pero ha aumentado en las últimas seis décadas, provocando cambios en el clima del planeta. Como consecuencia de lo anterior, se han documentado derretimiento de glaciares, aumento del nivel del mar, incremento del vapor de agua en la atmósfera, cambios en las temperaturas de los océanos, entre otros (Wuebbles et al., 2017).

Según Wuebbles et al. (2017), el pronóstico del comportamiento a futuro de las precipitaciones es complicado, sin embargo, es posible observar una tendencia clara a que estas aumentarán en las áreas más húmedas y disminuirán en las áreas más secas. Además, aumentos y disminuciones en la frecuencia, duración y magnitud de los eventos meteorológicos extremos como olas de frío, de calor, tormentas, ciclones, etcétera.

Lo anterior concuerda con los escenarios de Cambio Climático regionalizados para Costa Rica realizados por Alvarado et al. (2012), donde pronostican aumentos de precipitación de 15% para el 2020 y 35% para el 2050 en la vertiente del Caribe y en la Fila Costeña, y disminución de precipitación en rangos similares en la vertiente del Pacífico. Los autores establecen que este patrón es similar a largo plazo (2080), pero en menor magnitud.

La afectación de los acuíferos producto del cambio climático es una realidad. Murillo (2017) realizó una modelación numérica de un acuífero costero ubicado en el Pacífico sur del país, en tres escenarios distintos. El actual como parte de la calibración, el pronosticado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para el año 2050 y el pronosticado para el año 2100. Identificó aumentos del nivel del mar de 30 cm en el 2050 y 1 m en el 2100 con respecto al nivel actual e incluso una disminución de la recarga de 4% para el año 2050 y 1 o 2% en el 2100 con respecto al 2050.

### 1.6.3 Mareas

Las mareas son un fenómeno global, ya que son el resultado del balance de fuerzas de atracción gravitacional de la luna y el sol que actúan sobre la Tierra. A pesar de lo muy estudiadas que están estas fuerzas que las causan, el movimiento oscilatorio producido en el cuerpo de agua resulta complicado de modelar, ya que depende de gran manera del tamaño y la profundidad de la cuenca (Schureman, 1958).

Este balance de fuerzas anteriormente mencionado, al igual que las fuerzas centrífugas de las órbitas, cambian constantemente según la ubicación relativa de la Luna, la Tierra y el Sol. Este cambio produce una variación ordenada en las mareas y genera frecuencias y fases de oscilación (también llamadas constantes armónicas) que permiten la predicción de las mareas con precisión (Murillo, 2001).

Existen diferentes métodos para el cálculo y predicción de mareas, sin embargo, el método del Análisis de los Armónicos de las Mareas (también llamado Descomposición de los armónicos), descrito detalladamente por Schureman (1958), es el utilizado por científicos como base para la programación y automatización del cálculo. Como por ejemplo lo hacen Cardona et al. (2002) y Pawlowicz, Beardsley, & Lentz (2002).

Las mareas en las zonas costeras no dependen únicamente de las fuerzas gravitacionales y centrífugas, sino que responden también a la variabilidad del fondo oceánico y de la propagación de las mismas hacia aguas más someras como olas o la combinación de olas (Pawlowicz et al., 2002). Debido a esta variabilidad, es importante realizar estudios y modelos locales.

En el caso de Costa Rica, Gutiérrez & Soley (1988) y Murillo (1990) realizaron a nivel país, la descripción y predicción de las mareas.

Posteriormente, Murillo (1991) describe la circulación de las mareas en el Golfo de Nicoya, las cuales están dominadas por la componente armónica  $M_2$  (Semidiurna lunar principal) que tiene un período de 12,42 horas y una amplitud de poco más de un metro. Esto varía según se adentran en el golfo y pierden energía. Según Murillo (2001), las características de las mareas en todo el Litoral Pacífico son similares a las del Muelle Nacional Puntarenas a pesar de este encontrarse dentro del Golfo de Nicoya.

Las mareas son siempre cambiantes y tienden a aumentar o disminuir diariamente. Murillo (2001) señala la importancia de conocer varios términos para poder analizar este cambio en las alturas: el nivel medio de las aguas, que corresponde con la altura promedio del mar, y el nivel de sicigias, que es el nivel medio de las bajamares extremas o mayores.

En la costa pacífica norte de Costa Rica, las mayores mareas se dan en marzo-abril debido, en parte, a los vientos que en estos meses tienen un componente norte fuerte. Estas mareas grandes suceden de nuevo alrededor de setiembre-octubre de cada año. Durante la marea baja, la altura de las mareas puede quedar por debajo del nivel de Sicigias, por lo tanto aparecen en las tablas con valores negativos (Murillo, 2001).

Según Murillo (2001), el estudio de estas grandes ondas hidráulicas con longitudes de cientos de kilómetros y períodos de varias horas, es de gran importancia para la navegación marítima, la pesca, el manejo de puertos, el diseño de construcciones costeras y marinas, el turismo y en los últimos años para su uso como fuerza motriz de turbinas generadoras de energía.

#### 1.6.4 Acuíferos costeros

Fetter (2014) define un acuífero como una unidad geológica que tiene la capacidad de almacenar y transmitir agua a velocidades lo suficientemente rápidas para suministrar cantidades razonables a los pozos. El departamento de aguas subterráneas del servicio geológico estadounidense (USGS) detalla más esta definición. Se refiere a un acuífero como una formación, parte de una formación o un grupo de formaciones geológicas que contienen suficiente material saturado y permeable para producir cantidades significativas de agua en pozos y manantiales ("USGS Groundwater Information," 2016).

El acuífero y sus propiedades dependen directamente de las características de la roca o material que lo constituye como la porosidad, el rendimiento específico, la conductividad hidráulica, la permeabilidad. Sin embargo, también dependen de su entorno (el nivel de agua, etcétera.), incluyendo las características de las unidades geológicas próximas. Por ejemplo, según Todd & Mays (2005), cuando el acuífero está sobreyacido o subyacido por unidades geológicas que se comportan como impermeables, puede producir confinamiento.

La mayoría de los acuíferos costeros, son producto de la erosión del continente y del depósito de los sedimentos provenientes del mismo. Por consecuencia, generalmente son acuíferos porosos constituidos por una o varias unidades geológicas con variedades granulométricas y con diferentes grados de consolidación.

Alrededor del 70% de la población mundial habita en zonas costeras, esto implica una gran necesidad de servicio de agua potable. En los últimos tiempos, con el incremento en la contaminación de las aguas superficiales, el agua subterránea ha tomado una importancia mayor para el abastecimiento de las poblaciones. Los acuíferos costeros han resultado indispensables para los habitantes del área, sin embargo, son altamente sensibles a perturbaciones antropogénicas (Cheng & Ouazar, 2004).

Los acuíferos de las costas costarricenses del Pacífico norte son de vital importancia para el abastecimiento de la población, así como actividades turísticas y la agroindustria.

Según Arellano & Vargas (2001), estos generalmente están formados por depósitos aluviales que contienen gravas y arenas muy permeables, la recarga proviene de las zonas altas de las montañas, pero también de los ríos. En cuanto a la descarga natural, esta se da a través de los manantiales o la descarga directa hacia al mar. Identificaron 24 acuíferos de espesores entre 5 y 30 m, con transmisividades de 2,5 a 2200 m<sup>2</sup>/día y con pozos de producción variable de 0,08 a 20 l/s, definen un potencial de producción moderado.

#### 1.6.5 Intrusión Salina

Vrba & Lipponen (2007) definen la vulnerabilidad natural o intrínseca en función únicamente de los factores hidrogeológicos, o sea las características de un acuífero, el suelo que lo sobreyace y el material geológico no saturado. La vulnerabilidad específica corresponde con el riesgo de contaminación de los acuíferos provocado por las actividades humanas, ya sean por el uso que se les da o por los contaminantes (Vrba & Zaporozec, 1994).

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos costeros incluye un factor especial, su conexión hidráulica con el mar. Bocanegra & Custodio (1994) describen una transición difusa entre el agua dulce continental que descarga al mar y el agua de mar, aclaran que también puede producirse de manera puntual a través de rasgos litorales o heterogeneidades del medio.

La interacción entre el agua dulce y salada tiene dos procesos que Bocanegra & Custodio (1994) describen como uno donde las aguas tienden a mezclarse lentamente y otro mencionado como un “lavado” donde los procesos de transporte evacúan la salinidad al mar. Los autores enfatizan en que un estado estacionario ocurre únicamente cuando ambos procesos se encuentran en equilibrio.

Por esta razón, toda modificación en el flujo de agua dulce que descarga al mar genera una situación de transición donde cambia la penetración del agua salada y crece el espesor de la zona de mezcla hasta llegar nuevamente a un equilibrio; este proceso puede durar desde meses hasta miles de años, dependiendo de la dimensión y la permeabilidad del medio (Bocanegra & Custodio, 1994).

Arellano & Vargas (2001) realizan un estudio general y sientan la base para futuros estudios en los acuíferos costeros de la Península de Nicoya, en este mencionan que los acuíferos Playa Panamá, Hermosa, El Coco, Potrero, Brasilito y Jicaral están amenazados por la sobreexplotación y por consecuencia la intrusión salina. Encuentran indicios de intrusión en El Coco, Brasilito y playa Carmen e instan a corroborar sus resultados. Para el caso de playa Grande recomiendan aumentar la recarga del acuífero y disminuir la salinidad.

Arias & Vargas (2003) y Arias (2007) utilizaron métodos geofísicos para estudiar la intrusión salina en acuíferos de la costa pacífica. De igual manera, Murillo (2007) realizó ensayos de resistividad y análisis físico-químicos para delimitar la intrusión salina en el acuífero Playa Panamá. Posteriormente Murillo, Da Rosa Filho, & Chemas Hindi (2007) complementaron el análisis en esta playa utilizando métodos electromagnéticos.

Recientemente, Murillo (2017) identificó mediante valores de conductividad y análisis químicos la intrusión salina en las zonas más cercanas a la costa del acuífero Palmar Cortés, en el cantón de Osa. González (2017) concentró su investigación en la determinación de la interfase agua dulce y salada en el acuífero aluvial Puerto Jiménez en Puntarenas.

#### 1.6.6 Influencia de las mareas en los acuíferos

Ferris (1952) es el primero en abordar la propagación de las ondas senoidales producto de la oscilación mareal hacia los acuíferos costeros. Establece que entre mayor es la distancia a la costa, la amplitud de la onda decrece y aumenta el tiempo de arribo. Esto es comprobado por Raubenheimer, Guza, & Elgar (1999), en las zonas más lejanas a la costa, la fluctuación del nivel de agua es menor, con tiempos de arribo mayores y son atenuadas y pasan a ser asimétricas.

El modelo se hace para acuíferos confinados, sin embargo, el autor indica que es aplicable para un acuífero costero siempre y cuando el punto esté suficientemente alejado de la costa como para poder desprestigiar el flujo vertical, o cuando la fluctuación cíclica es pequeña en comparación con el espesor de la zona saturada del acuífero.

Nielsen (1991) detalla más el modelo matemático, lo que permitió identificar que la pendiente de la playa es un factor por considerar a la hora de determinar la influencia de las mareas en el acuífero. El autor indica que, en este caso, el comportamiento de las fluctuaciones de nivel no es senoidal, sino que sube abruptamente y desciende lentamente.

Luego de una investigación con base en el monitoreo de piezómetros, Erskine (1991) establece que la transmisión de la oscilación de presión es más rápida en las áreas que tienen mayor permeabilidad y en la parte más profunda de los acuíferos.

El modelo numérico elaborado por Ataie-Ashtiani, Volker, & Lockingtonb (1999) prueba que esta influencia provoca que el agua de mar intruya más y a su vez genere un engrosamiento en la interfase agua dulce- agua salada

con respecto a cómo sería sin la presencia de las mareas. Los autores identificaron que el cambio en esta interfase tiene mayor efecto en la parte superior del acuífero (cercana al nivel freático) que en la zona más profunda. Este fenómeno es mayor en las playas con menor pendiente, ya que es producto de la infiltración superficial del agua salada.

Robinson, Li & Barry (2007), a partir de un modelo numérico, estudiaron el efecto del empuje de la marea sobre un acuífero costero. En la investigación identificaron que, si se toma en cuenta la influencia de la marea, la forma de la cuña de intrusión salina varía con respecto al modelo convencional. Esta variación depende de la amplitud de las ondas producto de la propagación y de la cantidad de descarga del acuífero al mar.

La respuesta del acuífero a la presión ejercida por las mareas, según lo demostrado en los modelos de Kong et al. (2015) y Kong et al. (2013), se ve influenciada de manera significativa por el flujo vertical y horizontal en la zona no saturada y zona de ascenso capilar. El ascenso capilar intensifica el efecto, pero cuanto mayor sea el espesor de la zona vadosa, mayor es la atenuación y el retraso del arribo de las ondas inducidas por la marea.

Levanon, Shalev, Yechieli & Gvirtzman (2016) proponen un modelo conceptual, que apoya lo anteriormente mencionado, donde la influencia mareal se ve atenuada por el flujo en la zona no saturada e incluso identifican que el efecto capilar no solo influye en el nivel freático del acuífero, sino que también en las fluctuaciones de salinidad en la interfase agua salada-agua dulce. En esta interfase se determinó que el retraso del efecto mareal es mayor para la fluctuación de la salinidad que para el cambio del nivel de agua.

Utilizando sensores enterrados en la zona vadosa para medir la conductividad eléctrica y una red de monitoreo de pozos, Levanon, Yechieli, Gvirtzman & Shalev (2017) corroboraron que el flujo en zonas no saturadas condiciona la fluctuación del nivel. Esto lo hicieron al ver que el tiempo de los cambios de la conductividad registrado en los sensores enterrados era mayor que el registrado en los pozos. Esta diferencia es producto de que dentro de un pozo existe un flujo vertical más efectivo que el flujo que sucede en la zona vadosa.

La influencia o efecto de las mareas en los acuíferos costarricenses ha sido poco estudiada. Recientemente, en el acuífero aluvial Puerto Jiménez en Puntarenas, González (2017) realizó mediciones en pozos antes y después de realizarles pruebas de bombeo, en marea baja y marea alta, donde no se identificó cambios que se pudieran asociar a las mareas. La autora recomienda iniciar el monitoreo del acuífero con mediciones de nivel y análisis químicos en época seca y lluviosa con marea alta o baja.

En el acuífero costero Palmar-Cortés, Murillo (2017) realizó un monitoreo de niveles utilizando sensores de presión en varias perforaciones. En los registros observó variaciones estacionales y oscilaciones senoidales relacionadas con el efecto de las mareas, los puntos de mayor efecto de mareas se asocian a una mayor transmisividad del medio. El autor utilizó los registros de las perforaciones donde se veía con claridad el efecto mareal para calcular la transmisividad del acuífero utilizando el método de la respuesta mareal, que será descrito a continuación. Los resultados se mantuvieron en el rango que es esperable.

#### 1.6.7 Cálculo de Parámetros hidráulicos a partir de la influencia mareal

Jacob (1950) y Ferris (1952) son los pioneros del uso de las fluctuaciones cíclicas del nivel de agua para determinar la transmisividad de un acuífero confinado o semiconfinado. Posteriormente, Carr & Van der Kamp (1969) amplían el método, lo modifican y los resultados obtenidos los comparan con datos de pruebas de bombeo. Los autores determinan que los resultados entre ambos métodos son concordantes.

Los modelos asumen un acuífero homogéneo, isótropo, de espesor constante, con flujo horizontal, que cumple con la ley de Darcy, que se encuentra conectado hidráulicamente al mar donde la diferencia de densidades no tiene un efecto y que la oscilación de la marea es senoidal.

A partir de estos modelos realizados por Jacob (1950), Ferris (1952) y Nielsen (1991) se derivan las siguientes ecuaciones, que son una simplificación. Estas también son las que Todd & Mays (2005), Cheng & Ouazar (2004) y Fetter (2014) utilizan para explicar la influencia mareal en sus libros de Hidrogeología.

A pesar de que Ferris (1952) establece que el modelo es aplicable a los acuíferos libres cuando su espesor es mucho mayor al tamaño de las fluctuaciones del nivel, son Jha, Kamii & Chikamori (2003) quienes aclaran que pueden ser utilizadas cuando la razón entre la fluctuación y el espesor saturado del acuífero es menor que 0,02.

La eficiencia mareal se define como la diferencia entre la amplitud de las ondas senoidales de la marea y la amplitud de la oscilación del nivel de agua producto de la marea, según Todd & Mays (2005) mide la incompetencia de las capas confinantes a resistir los cambios de presión. Se representa con la siguiente formula:

$$\Delta h = \Delta h_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right)$$

Donde  $\Delta h$  es la variación del nivel de agua en el acuífero respecto al nivel medio,  $\Delta h_0$  es la amplitud de la oscilación de la marea,  $x$  es la distancia entre el mar y la medición,  $t_0$  es el periodo de la marea,  $S$  el coeficiente de almacenamiento y  $T$  la transmisividad del acuífero.

El retraso de la oscilación del nivel de agua respecto a la oscilación mareal ( $R$ ), en inglés *Time Lag*, está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}}$$

Millham & Howes (1995) realizaron una comparación entre varios métodos convencionales para determinar la Conductividad Hidráulica ( $K$ ) de acuíferos costeros someros. Entre los estudiados destacan las pruebas *Slug* y el método descrito anteriormente. Los autores establecen que el método a recomendar varía según la escala de trabajo ya que la respuesta mareal representa un valor de  $K$  más general (integra más posibles heterogeneidades) del acuífero en comparación con las pruebas *Slug*, que brindan un valor de  $K$  considerado como local.

El método ha sido utilizado en múltiples estudios de acuíferos costeros fuera del país (Turner, Coates, & Acworth 1997, Raubenheimer et al. 1999, Sánchez Ú. et al. 2013, Nieto López, Navarro, & Mudarra Martínez 2016, Jha & Kamii 2009, Fakir & Razack 2003) con resultados positivos.

También se ha realizado en casos en que el acuífero está conectado hidráulicamente a cuerpos de agua como ríos o lagos como lo hicieron Jha, Jayalekshmi, Machiwal, Kamii & Chikamori (2004). Trefry & Bekele (2004) utilizaron el método para realizar la caracterización estructural de un acuífero de una isla en Australia.

### 1.6.8 Cálculo de la Recarga Real mediante la variación temporal de niveles

La recarga es un dato de vital importancia para cualquier modelo de flujo de aguas subterráneas o de transporte de contaminantes. Existe gran variedad de métodos para la estimación de la recarga, varían entre diferentes escalas de tiempo, espacio, dificultad y costo (Healy & Cook, 2002).

El método *Water Table Fluctuation* (WTF) es una de las técnicas clásicas más utilizadas para la estimación de la recarga de un acuífero, únicamente requiere conocer el coeficiente de almacenamiento y contar con datos de monitoreo de niveles. Se basa en la premisa que los incrementos en el nivel de agua subterránea en un acuífero inconfinado se deben al arribo de agua producto de la recarga (Healy & Cook, 2002).

Healy & Cook (2002) recalcan que la aplicación de esta técnica es más apropiada en acuíferos someros con cambios bruscos en su nivel de agua, además, debido a que la recarga varía según diversos factores como la geología, elevación, pendiente, vegetación y otros; es recomendable que los pozos de monitoreo utilizados estén dispersos en el acuífero y sean representativos.

$$R = S_y \left( \frac{\Delta h}{\Delta t} \right)$$

Donde:

$R$  = Recarga

$S_y$  = Coeficiente de almacenamiento

$h$  = Altura del nivel de agua

$t$  = Tiempo

Los autores señalan, entre las principales limitaciones del método, que no todas las precipitaciones generan fluctuaciones claras o apreciables en el monitoreo, por lo tanto, se dificulta su aplicación. Además, cuando la tasa de recarga es similar a la tasa de descarga del sistema, en los hidrogramas no se reflejan aumentos de nivel.

Además, el cálculo se realiza en puntos específicos de observación y posteriormente se promedian, sin embargo, la recarga varía substancialmente en una cuenca debido a diferencias de altura, geología, pendiente, vegetación, entre otros. Entre los principales retos del método es el cálculo de la capacidad específica del acuífero y la identificación de la causa de las fluctuaciones del nivel.

Las fluctuaciones de nivel observadas pueden ser generadas por diferentes factores y no necesariamente son producto de la recarga. Por ejemplo, cambios en el uso de la tierra, extracción, infiltración, cambios en la evapotranspiración, precipitación, cambios en la presión barométrica, entre otros (Healy & Cook, 2002).

Esta metodología fue aplicada de manera exitosa por Mora (1978) y recientemente por Monge (2015) y Alvarado (2018).

#### 1.6.9 Cálculo de la Recarga Potencial mediante un Balance Hídrico de Suelos

La metodología propuesta por Schosinsky (2006) es la más utilizada para el cálculo de la recarga potencial e incluso es de carácter obligatorio para documentos de Evaluación del Recurso Hídrico que le sean presentados al MINAE.

El autor establece que la recarga a un acuífero se da cuando la cantidad de agua infiltrada es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y satisfacer la evapotranspiración de las plantas, por lo tanto, considera que el cálculo debe ser multifactorial. En consecuencia, primero es necesario realizar un balance hídrico de suelos.

Según Schosinsky (2006) para el balance del suelo, se requiere conocer

1. La infiltración mensual generada por la lluvia: Calculada a partir del coeficiente de infiltración, la precipitación mensual y la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje.
2. Capacidad de Campo, Punto de marchitez: Obtenidos a partir de análisis de laboratorio de muestras de suelo.
3. Profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua de la vegetación en el área.
4. La evapotranspiración potencial y real.
5. La humedad del suelo y a final del mes

Por último, se utilizan los resultados obtenidos anteriormente para determinar de manera mensual si la cantidad de lluvia infiltrada durante el mes fue la suficiente para generar recarga potencial y finalmente es posible determinar la cantidad de recarga potencial anual mediante la sumatoria de los 12 meses del ciclo hidrológico.

En la Figura 2 se presenta un esquema general sobre esta metodología.

# Recarga potencial al acuífero

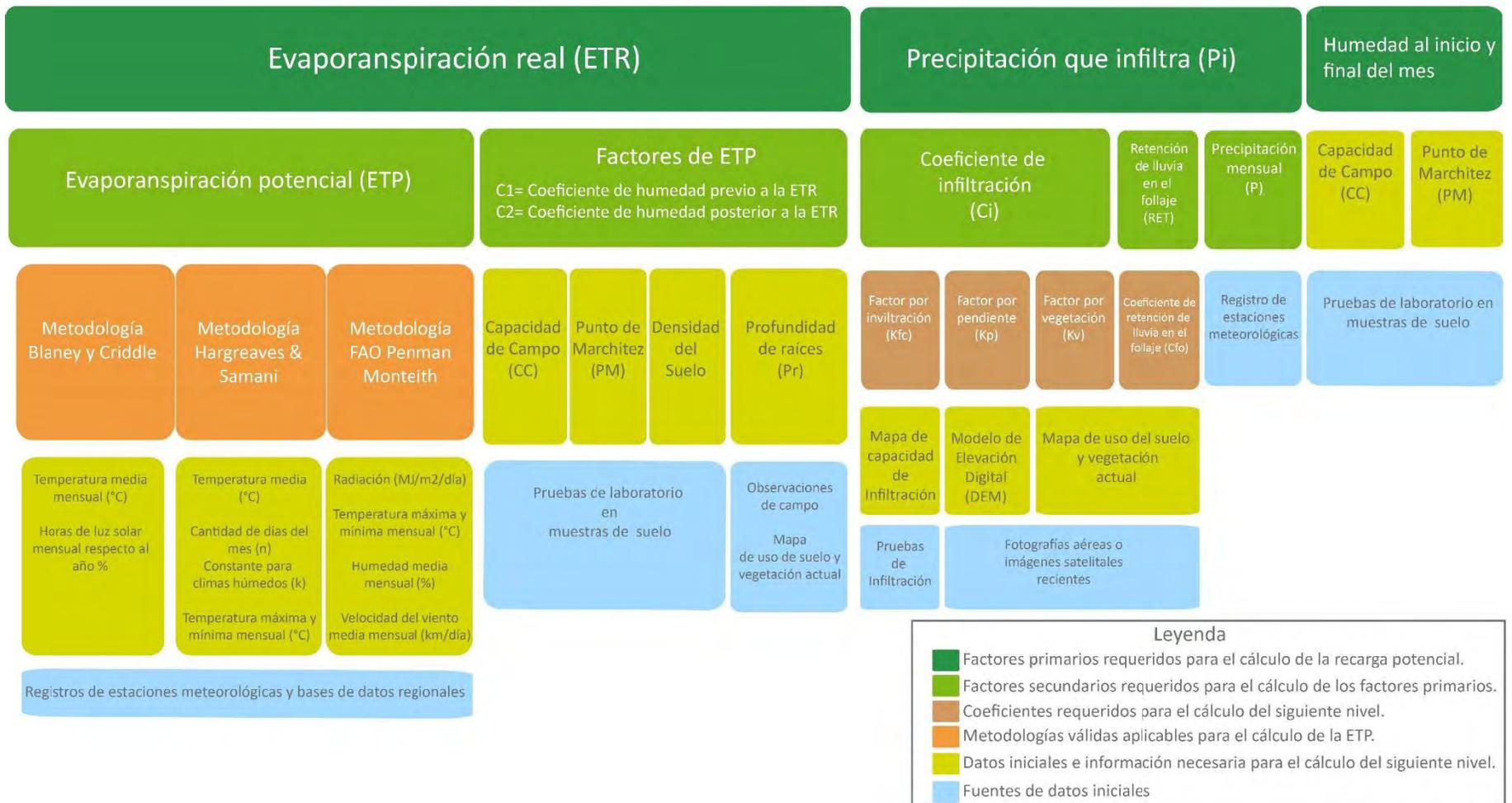


Figura 2 Gráfico esquemático de la metodología de Schosinsky (2006) para el cálculo de la recarga potencial

#### 1.6.10 Caracterización hidrogeoquímica de las aguas

El agua pura no existe en la naturaleza, por lo que su definición teórica no es adecuada para describir el estado en el que se encuentra habitualmente, ya que al ser un solvente, posee gran capacidad de incorporar sustancias al estar en contacto con los terrenos (Custodio & Llamas, 1996). El autor establece que esta capacidad de disolver materiales es mayor en caso de las aguas subterráneas ya que existen mayor cantidad de superficies de contacto, lentas velocidades de circulación y mayor temperatura y presión, entre otras. Lo anterior es la razón por la cual, generalmente, las concentraciones salinas son superiores en aguas subterráneas que en aguas superficiales.

Custodio & Llamas (1996) definen la conductividad eléctrica como la capacidad de un agua para conducir electricidad y es de gran importancia para el estudio de las aguas subterráneas ya que aumenta según la temperatura, el contenido de iones disueltos y la salinidad. Por lo anterior y la practicidad para medirla, la conductividad eléctrica es utilizada como un primer indicador de la calidad y estado del agua subterránea. Esta es directamente proporcional a la totalidad de sólidos disueltos (TDS) medida en mg/L y a la salinidad medida en PSU.

El Potencial de Hidrógeno (pH) es utilizado como indicador de la acidez y basicidad del agua, además, según Boulding & Ginn (2004) influye en la solubilidad y reactividad de los componentes químicos presentes en el agua, el intercambio iónico y la hidrólisis. En cuanto a la capacidad de amortiguamiento de un cuerpo de agua para neutralizar ácidos y bases y así mantener un valor de pH estable es conocida como alcalinidad (USGS,2020).

El USGS (2020) define las aguas duras como agua con alta cantidad de minerales disueltos y coinciden con Sathy et al. (2016), quienes establecen que la dureza total depende principalmente de la cantidad de cationes metálicos divalentes, de los cuales el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son los más abundantes.

Según Fetter (2014), más del 90% de los sólidos disueltos en el agua subterránea se pueden atribuir a 8 iones,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ . Estos se encuentran en concentraciones mayores a 1 mg/L. Debido a que la concentración de 6 de estos 8 iones se puede determinar a través de análisis directos y la de los dos restantes ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ) se puede determinar a partir de la temperatura, pH y conductividad eléctrica, el análisis de ellos es el primer paso para la caracterización hidrogeoquímica del agua.

El análisis de iones que suelen presentarse en concentraciones menores a 0.1 mg/L suele depender del propósito de la investigación, por ejemplo, el hierro, nitrato, fluoruro, estroncio y boro son incluidos comúnmente en estudios que buscan conocer la química del agua (Fetter, 2014).

La presentación de los resultados de concentraciones de aniones y cationes mayores se puede hacer a través de tablas o utilizando diagramas que permiten una mejor visualización e identificación de tendencias en los resultados.

Piper (1944) definió un diagrama trilineal múltiple como una herramienta efectiva para la segregación e interpretación de datos analíticos para estudios de proveniencia de constituyentes disueltos en el agua. Según este sistema, se tienen al menos 6 clasificaciones hidrogeoquímicas visibles en la Figura 3.

Appelo & Postma (2005) elaboraron una guía basada en el diagramado de composiciones promedio de agua dulce, salada y su mezcla, con el fin de facilitar la identificación de procesos de intrusión salina y salinización utilizando este diagrama (Ver Figura 4).

Además del análisis de la concentración de cada parámetro e iones ya mencionados, se pueden estudiar las relaciones entre los iones disueltos, ya que pueden guardar relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores o incluso indicar una característica específica del agua (Custodio & Llamas, 1996).

Las relaciones entre iones se utilizan según el propósito de la investigación, entre las más utilizadas se encuentran  $\text{rMg/rCa}$ ,  $\text{rNa/rCl}$ ,  $\text{rK/rNa}$ ,  $\text{rCl/rHCO}_3$ ,  $\text{rSO}_4/\text{rCl}$  y el Índice de Intercambio de bases (ICB). Según Castillo &

Morell (1988), este último indica el sentido e intensidad de los procesos de intercambio iónico y se calcula con la siguiente fórmula:

$$ICB = \frac{(rCl) - (rNa + rK)}{rCl}$$

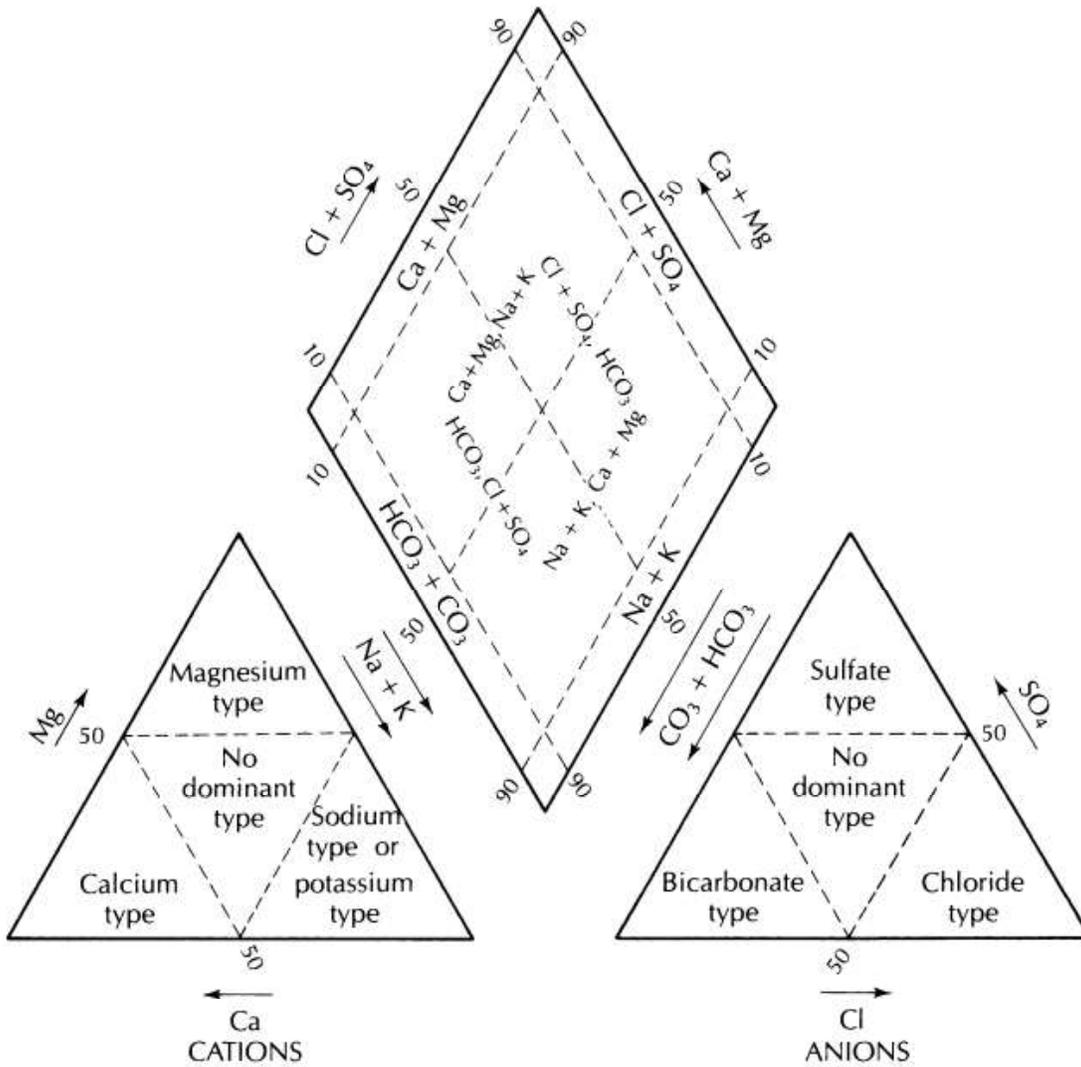


Figura 3 Diagrama Piper, tomado de Fetter (2014)

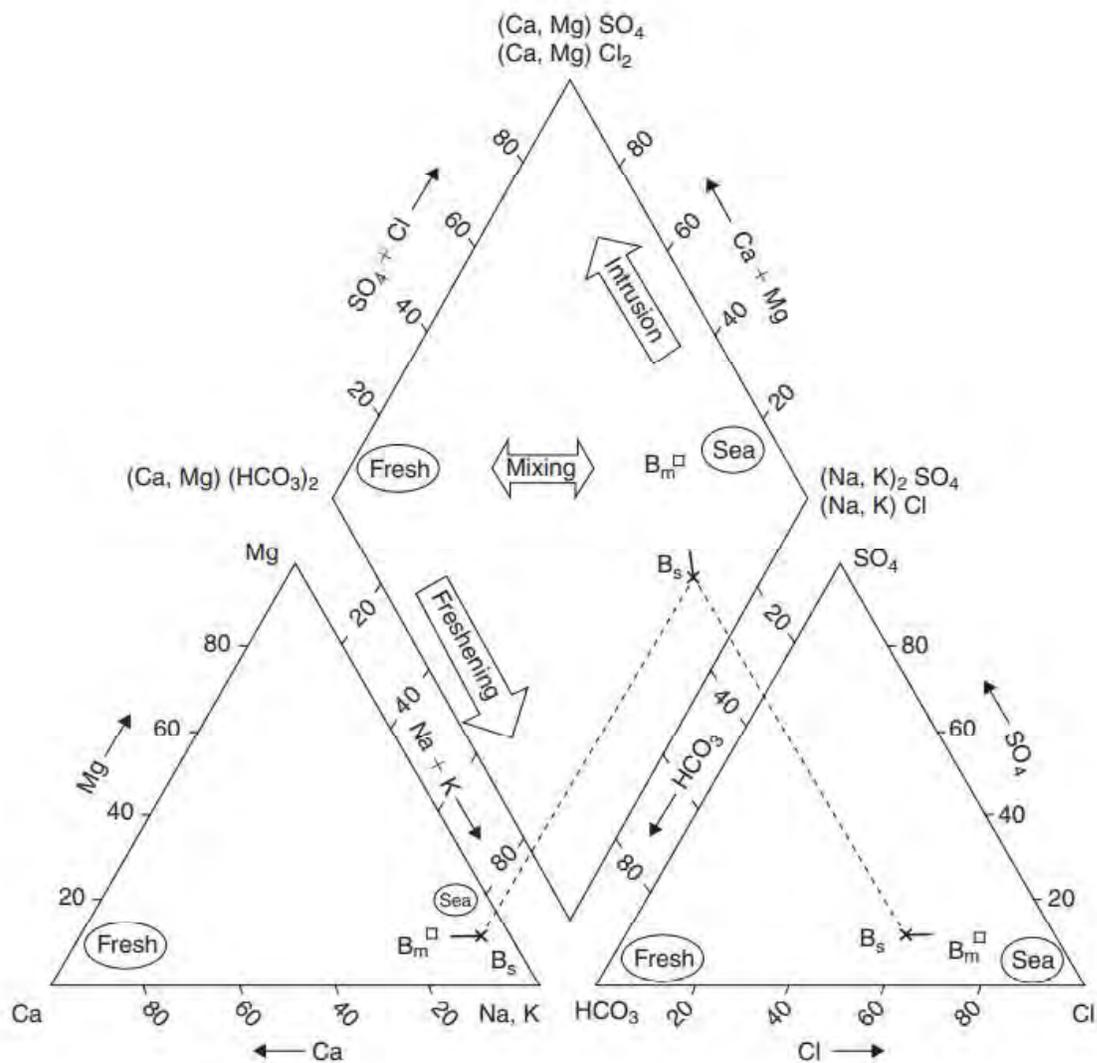


Figura 4 Interpretación del diagrama Piper, tomado de Appelo & Postma (2005).

#### 1.6.11 Determinación de la calidad de agua

La calidad de un agua queda definida por su composición, y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización (Custodio & Llamas, 1996).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) posee una normativa de potabilidad del agua como una referencia internacional. En el caso de Costa Rica, la normativa vigente es la presentada en el decreto n° 32327-S publicado el 3 de mayo del año 2005. Este establece los niveles máximos que deben tener aquellos componentes o características del agua que pueden representar un riesgo para la salud de la comunidad e inconvenientes para la preservación de los sistemas de abastecimiento de agua en beneficio de la salud pública (MINSa, 2005).

#### 1.6.12 Determinación de la vulnerabilidad del acuífero

Como se definió anteriormente la vulnerabilidad natural o intrínseca está basada únicamente en las características propias de un acuífero. Existen variedad de métodos basados en la sumatoria o el producto de los factores hidrogeológicos contemplados, destacan principalmente el método GOD y el método DRASTIC.

El método GOD, propuesto por Foster & Hirata (1991), toma en cuenta 3 factores que generalmente están disponibles o son fácilmente recolectados. Estos son el grado de confinamiento hidráulico (G), la ocurrencia del estrato sobreyacente (O) y la distancia al nivel del agua subterránea (D). Los autores definen una clasificación para cada factor y sus respectivos valores, estos son multiplicados entre sí y se obtiene el índice de vulnerabilidad del acuífero, este varía entre 1 (vulnerabilidad extrema) y 0 (vulnerabilidad nula). Los autores recomiendan la elaboración de los mapas del índice de vulnerabilidad y que en estos sean incluidos los datos básicos hidrogeológicos que fueron utilizados, además, aclaran que este es un primer paso en la evaluación del riesgo de contaminación y no debe ser utilizado para contaminantes móviles persistentes que no experimentan una retención o transformación durante su transporte en el subsuelo (Foster & Hirata, 1991).

En cuanto al método DRASTIC, propuesto por Aller et al. (1987), contempla 7 factores. Estos son la profundidad del agua subterránea (D), tasa de recarga (R), tipo de acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), impacto en la zona no saturada (I) y la conductividad hidráulica (C) del acuífero. En este, como lo describe detalladamente Agüero & Pujol (2000), cada uno de los factores posee una clasificación del 1 al 10 la cual, posteriormente, es ponderada según la importancia de cada factor. El método contempla dos escenarios para los factores de ponderación, uno para contaminantes pesticidas y para no pesticidas debido a que los primeros son más persistentes en el ambiente y menos volátiles (Agüero & Pujol, 2000).

Seguido a la ponderación, los 7 factores son sumados para obtener el índice DRASTIC, el cual entre más alto su valor mayor es la probabilidad de contaminación del agua subterránea. Es importante mencionar que este método está diseñado para brindar un valor numérico relativo que por sí solo no posee un significado intrínseco (Aller et al, 1987). El valor numérico debe utilizarse como guía o parámetro de comparación dentro del acuífero en cuestión e incluso con el resultado de la aplicación de este método en otras localidades cercanas o en otras regiones con condiciones similares (Aller et al, 1987).

Aller et al. (1987) define el método como una herramienta para determinar la vulnerabilidad a la contaminación, capaz de identificar sitios en los cuales existe alta sensibilidad a la contaminación. Enfatizan que esta herramienta debe considerarse como fase preliminar y de gran utilidad para la toma de decisiones y gestión territorial, así como la priorización de áreas de monitoreo de los acuíferos. Este no reemplaza estudios específicos de contaminación y calidad del agua subterránea.

Polemio et al. (2009), tras una comparación entre estos y otros métodos, recomiendan la aplicación del método GOD en mapas regionales o en áreas con altos contrastes de vulnerabilidad. Los autores describen DRASTIC como un método ideal para mapas locales o mapas regionales siempre y cuando se cuente con el detalle de información requerida ya que la cantidad de factores que contempla producen resultados con mayor detalle y capacidad de zonificación.

La manera más común para realizar la validación de estos métodos es a través de la comparación de los mapas de vulnerabilidad resultantes con la ocurrencia real de contaminantes comunes en el agua (Ghazavi & Ebrahimi, 2015). Los autores sugieren que el análisis de la correlación entre los resultados de ambos métodos y la distribución espacial de la concentración del ion nitrato en el acuífero es un parámetro adecuado para validar ambos métodos, además, identificaron una mayor correlación entre el resultado del método DRASTIC y la concentración real de nitrato que entre el método GOD y la concentración de nitrato en la cuenca.

Lo anterior es concordante con los resultados obtenidos por Voudouris et al. (2010), ya que obtuvieron alta correlación entre las zonas identificadas como de alta vulnerabilidad por el método DRASTIC con las zonas del acuífero con mayor concentración de ion nitrato.

## 1.7 Metodología

### 1.7.1 Revisión de la información disponible

Se realizó una revisión de la información existente y disponible del área de investigación. Iniciando con las imágenes de satelitales de acceso libre como lo son Landsat 7, Landsat 8 y Sentinel, también fotos aéreas, metadatos de la cartografía (ríos, curvas de nivel, carreteras, etcétera), estudios geológicos e hidrogeológicos que se han realizado en ambos acuíferos, expedientes de las concesiones para extracción de manantiales pétreos, expedientes e informes de perforación de los pozos, mapas de uso de la tierra, meteorología, mareas, registros de monitoreo de pozos así como documentos oficiales y decretos relacionados con la gestión del recurso hídrico.

### 1.7.2 Procesamiento y comprobación de modelos existentes

Una vez revisada la información relevante, se integró en bases de datos y se utilizaron sistemas de información geográfica (SIG) para su georreferenciación, representación y fotointerpretación. Esta última fue clave para corroborar información e identificar cambios en el uso de la tierra y fuentes posibles de contaminación.

El contexto geológico propuesto en investigaciones previas fue actualizado según el modelo propuesto por Denyer et al. (2019) y, como insumo adicional, se revisó a detalle la base de datos de expedientes de pozos de SENARA (ver Figura 5) y la información disponible en los expedientes de la Dirección de Agua del MINAE. A partir de esta información, se elaboraron los perfiles hidrogeológicos. El contexto geomorfológico fue actualizado utilizando la información topográfica oficial del IGN a escala 1:10 000, 1: 25 000 y 1: 50 000 y el contexto geológico y estructural actual.

Durante la visita al campo, se realizó la comprobación de la ubicación de pozos y medición de datos como profundidad del agua subterránea, coordenadas, entre otros.

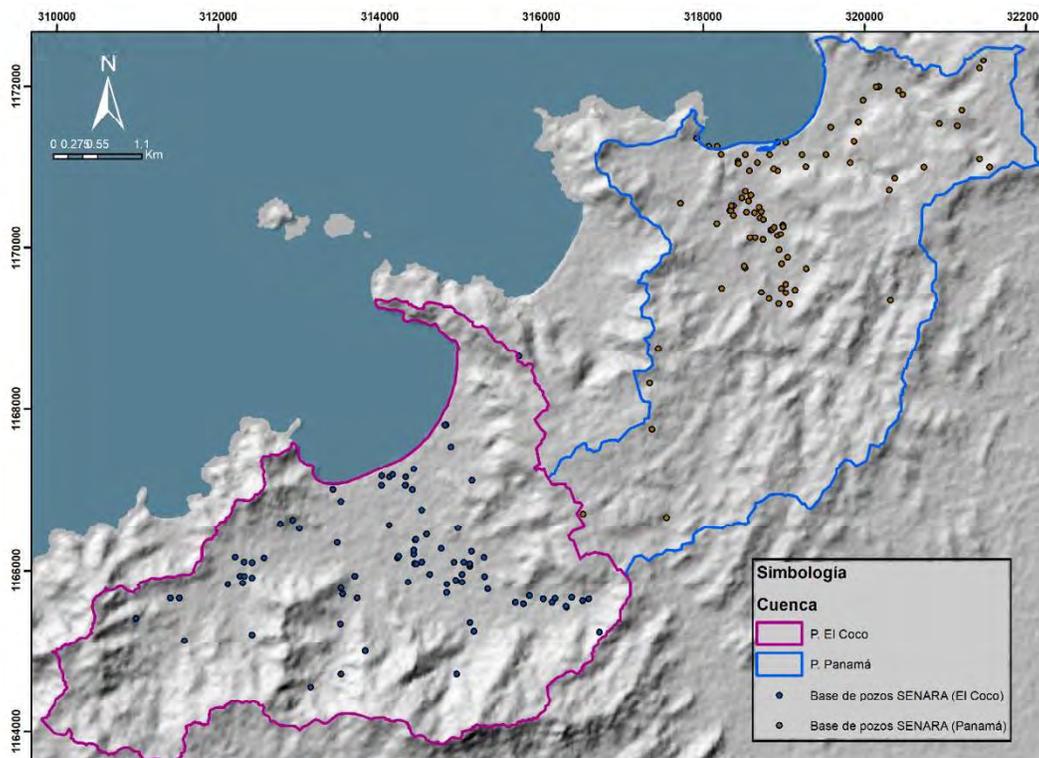


Figura 5 Mapa con ubicación de los pozos según la base de datos del SENARA.

### 1.7.3 Determinación del flujo del agua subterránea

Una vez definido el modelo geológico, se procedió a trazar la red de flujo y la actualización de las líneas equipotenciales del acuífero. Para esto se tomaron los datos de niveles estáticos y dinámicos disponibles en el registro de monitoreo mensual de pozos de la Dirección de Agua. Este monitoreo inició en el año 2010, sin embargo, para el trazo de las líneas equipotenciales se utilizaron los datos disponibles del año 2017 y 2018.

Al aplicar métodos de interpolación como Krigging e IDW, las líneas equipotenciales y dirección de flujo generadas presentaban un comportamiento errático e incongruente con el modelo geológico y topografía de la cuenca. Por esta razón se descartó el trazado automático y se procedió a realizar un trazado manual de las líneas equipotenciales. El gradiente hidráulico fue calculado a partir de las líneas equipotenciales definidas y la distancia entre ellas.

Es importante resaltar que la definición de la dirección de flujo y las líneas equipotenciales se restringió a la extensión del acuífero presente en los depósitos aluviales recientes, ya que como se observa en la Figura 6 los pozos se encuentran mayoritariamente sobre los depósitos aluviales recientes y no se cuenta con una cantidad y densidad suficiente para realizarlo en otras unidades hidrogeológicas. El detalle de cada uno de estos pozos se presenta como anexo del documento.

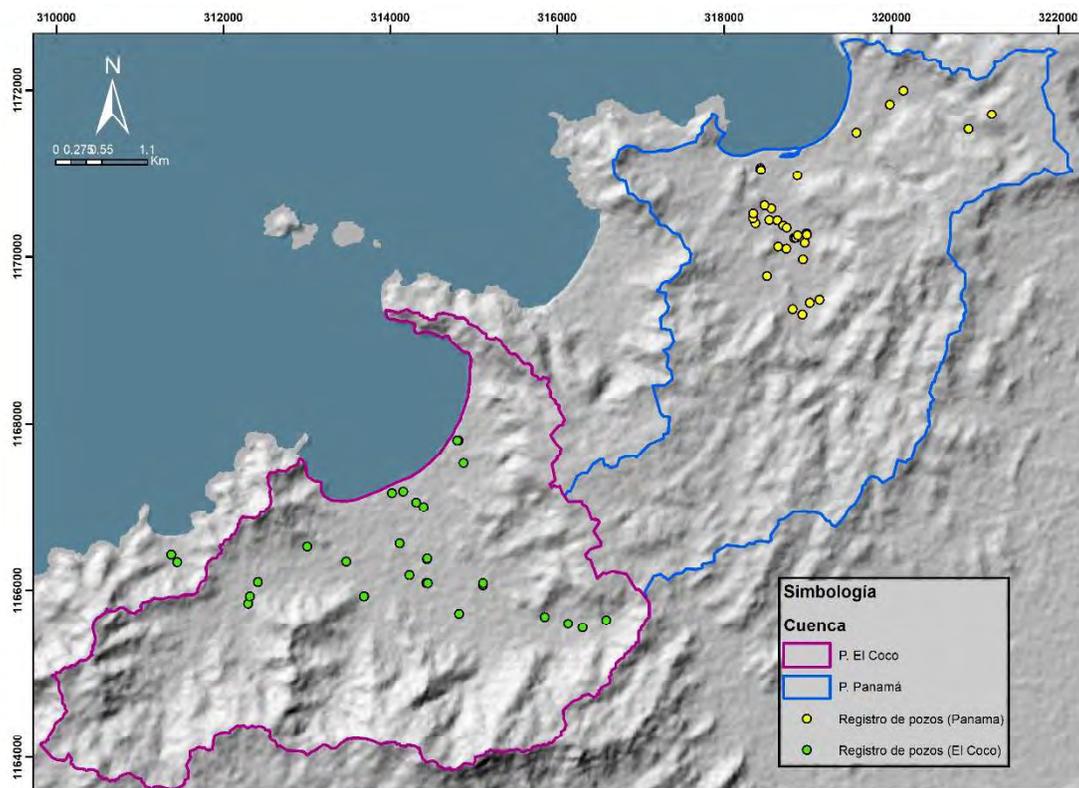


Figura 6 Mapa de pozos monitoreados mensualmente por la Dirección de Agua

### 1.7.4 Determinación de la recarga potencial de los acuíferos

Para la estimación de la recarga potencial de ambos acuíferos, se realizó el cálculo del balance hídrico siguiendo la metodología propuesta por Schosinsky (2006). Este cálculo se realizó utilizando la herramienta "Álgebra de mapas" del software ArcGIS, la cual permitió obtener un mapa de recarga potencial con resolución de 1 m<sup>2</sup>.

Para aplicar esta metodología se requieren datos como la capacidad de infiltración y el factor por infiltración, que se obtienen a través de pruebas de infiltración, la capacidad de campo, punto de marchitez,

densidad del suelo, que se obtienen mediante análisis de laboratorio de los suelos. Estos datos se obtuvieron de pruebas realizadas en estudios previos.

Otros parámetros como la profundidad de raíces, factor por pendiente y factor por vegetación, se obtuvieron a través de fotointerpretación y el uso de sistemas de información geográfica para la elaboración del Modelo de Elevación Digital. La precipitación media se obtuvo a partir de la información del Instituto Meteorológico Nacional.

#### 1.7.4.1 Cálculo de la Infiltración

La infiltración de la lluvia en el suelo es influenciada principalmente por tres factores: la textura del suelo, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal. La suma de estos factores se conoce como el coeficiente de infiltración (Ci), este es utilizado por Schosinsky (2006) para determinar la precipitación que infiltra mensualmente. ONU (1972) define la siguiente ecuación:

$$Si (Kfc + Kp + Kv) > 1, Ci = 1$$

$$Si (Kfc + Kp + Kv) \leq 1, Ci = Kfc + Kp + Kv$$

Ci= Coeficiente de infiltración

Kfc= Fracción que infiltra por textura del suelo

Kp= Fracción que infiltra por efecto de la pendiente

Kv= Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

##### 1.7.4.1.1 Fracción que infiltra por textura del suelo (Kfc)

Schosinsky & Losilla (2000) presentan la siguiente ecuación:

Si  $f_c$  se encuentra entre 16 y 1568 mm/día:  $Kfc = 0.267 \ln(f_c) - 0.000154f_c - 0.723$

Si  $f_c$  es menor a 16 mm/día:  $Kfc = 0.0148f_c/16$

Si  $f_c$  es mayor que 1568 mm/día:  $Kfc = 1$

Donde  $f_c$  es la permeabilidad del suelo saturado en los primeros 30 centímetros de profundidad. Para este estudio se utilizaron las pruebas de infiltración realizadas anteriormente para estudios hidrogeológicos en el área de estudio. En la Tabla 1 se presentan las pruebas utilizadas y en la Figura 7 su ubicación.

Tabla 1 Pruebas de Infiltración y Resultados obtenidos

Código	Método	Referencia	$f_c$ (mm/día)	Kfc
Nr 11	Doble Anillo	Gómez (2005)	96.5	0.482207
Nr 8	Doble Anillo	Gómez (2005)	4370	1
Nr 13	Doble Anillo	Gómez (2005)	144	0.581764
Nr 9	Doble Anillo	Gómez (2005)	287	0.743884
Nr 6	Doble Anillo	Gómez (2005)	96	0.480897
Nr 5	Doble Anillo	Gómez (2005)	2064	1
Nr 7	Doble Anillo	Gómez (2005)	335.5	0.778104
Nr 3	Doble Anillo	Gómez (2005)	1150	0.981587
IPPM 11	Doble Anillo	Murillo (2007)	203.04	0.66441
IPPM 12	Doble Anillo	Murillo (2007)	9067.68	1
IPPM 10	Doble Anillo	Murillo (2007)	4105.44	1
IPPM 9	Doble Anillo	Murillo (2007)	5627.52	1
IPPM 13	Doble Anillo	Murillo (2007)	128.16	0.553089
IPPM 8	Doble Anillo	Murillo (2007)	1573.92	1

IPPM 7	Doble Anillo	Murillo (2007)	95.04	0.478361
IPPM 15	Doble Anillo	Murillo (2007)	133.92	0.56394
IPPM 2	Doble Anillo	Murillo (2007)	177.12	0.631936
IPPM 6	Doble Anillo	Murillo (2007)	512.64	0.86402
IPPM 14	Doble Anillo	Murillo (2007)	393.12	0.811548
IPPM 1	Doble Anillo	Murillo (2007)	133.92	0.56394
IPPM 16	Doble Anillo	Murillo (2007)	195.84	0.655879
IPPM 19	Doble Anillo	Murillo (2007)	3169.44	1
IPPM 17	Doble Anillo	Murillo (2007)	2062.08	1
IPPM 4	Doble Anillo	Murillo (2007)	322.56	0.769595
IPPM 20	Doble Anillo	Murillo (2007)	3242.88	1
IPPM 5	Doble Anillo	Murillo (2007)	316.8	0.765671
IPPM 21	Doble Anillo	Murillo (2007)	2723.04	1
IPPM 3	Doble Anillo	Murillo (2007)	317.808	0.766364
IPPM 22	Doble Anillo	Murillo (2007)	987.84	0.965977
IPPM 18	Doble Anillo	Murillo (2007)	6042.24	1
SA-1	Lefranc	Arredondo (2009)	112.81	0.52139
SA-2	Lefranc	Arredondo (2009)	111.04	0.517441
SA-3	Lefranc	Arredondo (2009)	248.68	0.71152
SA-4	Lefranc	Arredondo (2009)	248.68	0.71152
SA-5	Lefranc	Arredondo (2009)	187.89	0.646039
SA-6	Lefranc	Arredondo (2009)	218.49	0.681612
SA-7	Lefranc	Arredondo (2009)	95.12	0.478574
SA-8	Lefranc	Arredondo (2009)	188.8	0.647189
SA-9	Lefranc	Arredondo (2009)	112.81	0.52139
SA-10	Lefranc	Arredondo (2009)	267.45	0.728058
SA-11	Lefranc	Arredondo (2009)	211.76	0.674295
SA-12	Lefranc	Arredondo (2009)	6361.73	1
SA-13	Lefranc	Arredondo (2009)	122.74	0.542386
SA-14	Lefranc	Arredondo (2009)	191.28	0.650291
SA-15	Lefranc	Arredondo (2009)	72.68	0.410187
SA-16	Lefranc	Arredondo (2009)	68140.56	1
SA-17	Lefranc	Arredondo (2009)	277.31	0.736206
SA-18	Lefranc	Arredondo (2009)	265.72	0.726591
SA-19	Lefranc	Arredondo (2009)	142.62	0.579406
SA-20	Lefranc	Arredondo (2009)	2425.56	1
SA-21	Lefranc	Arredondo (2009)	35124.16	1
SA-22	Lefranc	Arredondo (2009)	255.54	0.717729
SA-23	Lefranc	Arredondo (2009)	667.31	0.910603

Posterior a la recopilación de las pruebas de infiltración realizadas por Arredondo (2009), Gómez (2005) y Murillo (2007) y al cálculo de la permeabilidad del suelo saturado, se creó el mapa de permeabilidad del suelo. Para esto fue necesario utilizar la interpolación, se contemplaron dos métodos diferentes. *Ordinary Kriging* (OK) e *Inverse Distance Weighting* (IDW) que según Villatoro et al. (2008) son los métodos más utilizados en estudios de análisis de variación espacial.

Schloeder, et al. (2001) mencionan que la diferencia entre ambos radica en cómo se calcula el peso asignado a cada dato ya que ambos métodos suponen que las predicciones son una combinación lineal de los datos disponibles.

Para el caso del OK, el peso de cada dato es calculado por el método buscando que el porcentaje de error promedio del modelo sea 0 y la varianza sea mínima. En cambio IDW fija el peso de cada dato con una relación inversa a la distancia (Schloeder et al. ,2001).

Según Villatoro et al. (2008) el OK brinda un análisis con mayor fundamento estadístico y su aplicación es más común cuando la intensidad del muestreo es mayor, sin embargo cuando el distanciamiento entre sitios de muestreo es muy grande se dificulta su aplicación. En estos casos los autores recomiendan el IDW.

Lo anterior es coincidente con lo establecido por Kravchenko (2003) quien demostró que la precisión de ambos métodos depende de la naturaleza de los datos. Cuando se cuenta con gran cantidad y densidad de datos ambos métodos generan información coincidente y confiable, sin embargo ante una escasez de datos y mala distribución espacial, el IDW se desempeña mejor.

Tras la aplicación de ambos métodos, la interpolación realizada con el IDW fue la que generó un mejor resultado. Cuando se aplicó el OK, la cantidad de datos de capacidad de infiltración disponibles no permitió encontrar los parámetros y configuración necesaria para la elaboración del variograma requerido para aplicar el método. El resultado de la interpolación utilizada para la investigación se presenta en la Figura 8.

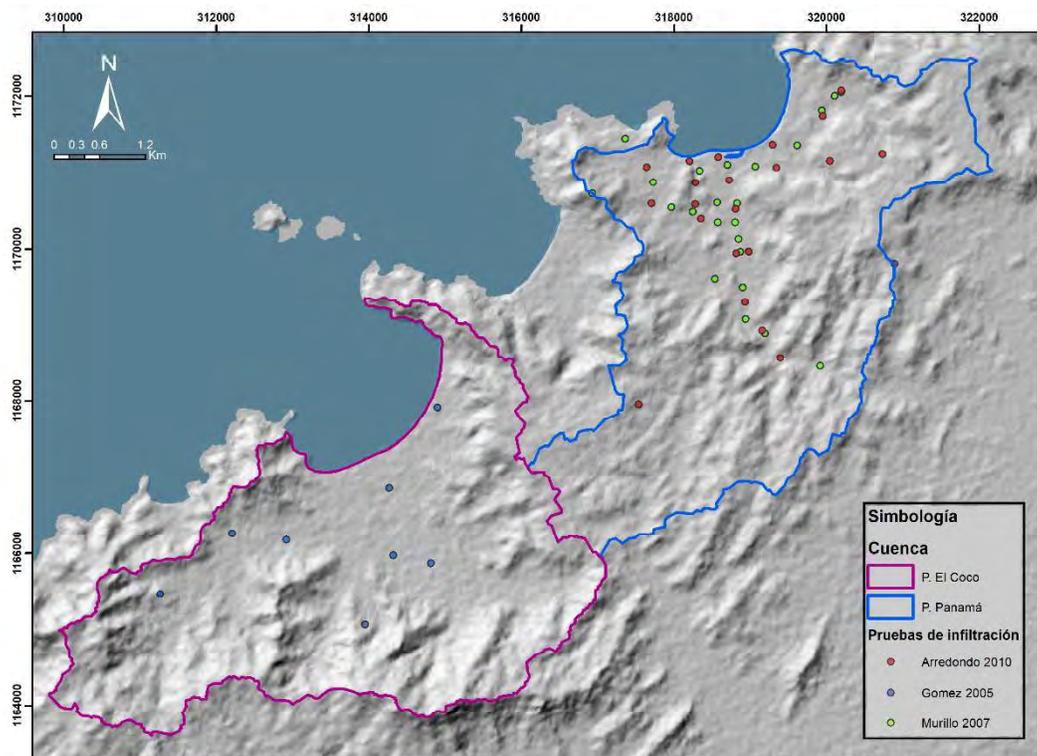


Figura 7 Ubicación de las pruebas de infiltración utilizadas

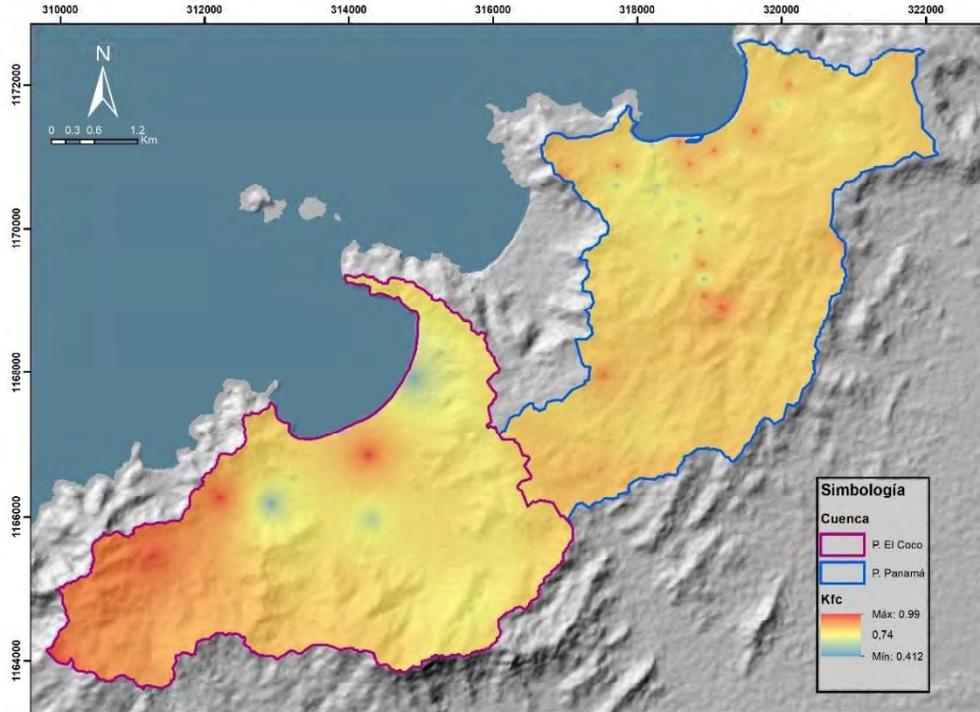


Figura 8 Mapa de la fracción que infiltra por textura del suelo

#### 1.7.4.1.2 Fracción que infiltra por efecto de pendiente (Kp)

Para la elaboración del mapa de la fracción que infiltra por efecto de la pendiente ( ver Figura 9), es necesario contar con un mapa de pendiente del terreno. Este fue elaborado utilizando como base las curvas de nivel 1:10000 del IGN y, posteriormente, reclasificando según la Tabla 2 con los valores estipulados por Schosinsky & Losilla (2000) y aplicando la modificación realizada por Alvarado (2018) a los rangos del porcentaje de pendiente.

Tabla 2 Coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente Kp

Clasificación	Pendiente	Kp
Muy plana	0.02%-0.3%	0.3
Plana	0.3%-1%	0.2
Algo plana	1%-2%	0.15
Promedio	2%-7%	0.1
Fuerte	Mayor que 7%	0.06

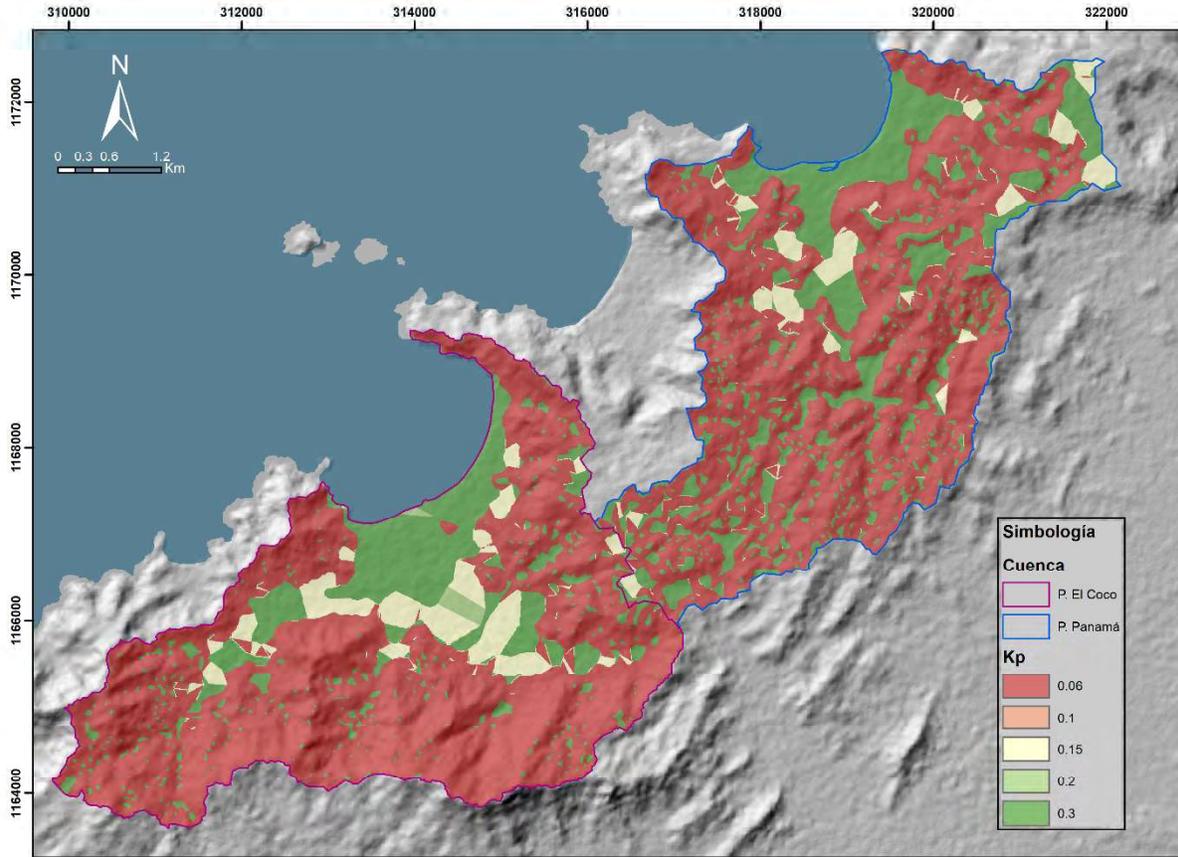


Figura 9 Mapa de la fracción que infiltra por efecto de la pendiente

#### 1.7.4.1.3 Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (Kv)

Primeramente, se realizó un mapa del uso de suelo actual a partir de la foteointerpretación de fotos aéreas de Google Earth (tomadas el 1/4/2018) y de las imágenes satelitales de Bing integradas en el software ArcGIS (tomadas el 11/8/2017), con la intención de poder analizar los cambios en el color de la vegetación entre la época lluviosa y seca, así como lo observado en campo (ver Figura 10).

Una vez elaborado el mapa de uso de suelo actual, se reclasificó para crear el Mapa de la fracción que infiltra por la cobertura vegetal (Ver Figura 11), tomando como base los valores de la Tabla 3 definidos por Schosinsky & Losilla (2000) para la fracción que infiltra por la cobertura vegetal. A las áreas clasificadas como infraestructura se les asignó un valor de 0.09, debido a que estas de igual manera cuentan con áreas verdes y árboles aislados. En cuanto al estuario, se le asignó un valor de 0 ya que no cuenta con cobertura vegetal.

Tabla 3 Coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal Kv

Cobertura vegetal	Kv
Cobertura con zacate menos del 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.1
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.2
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

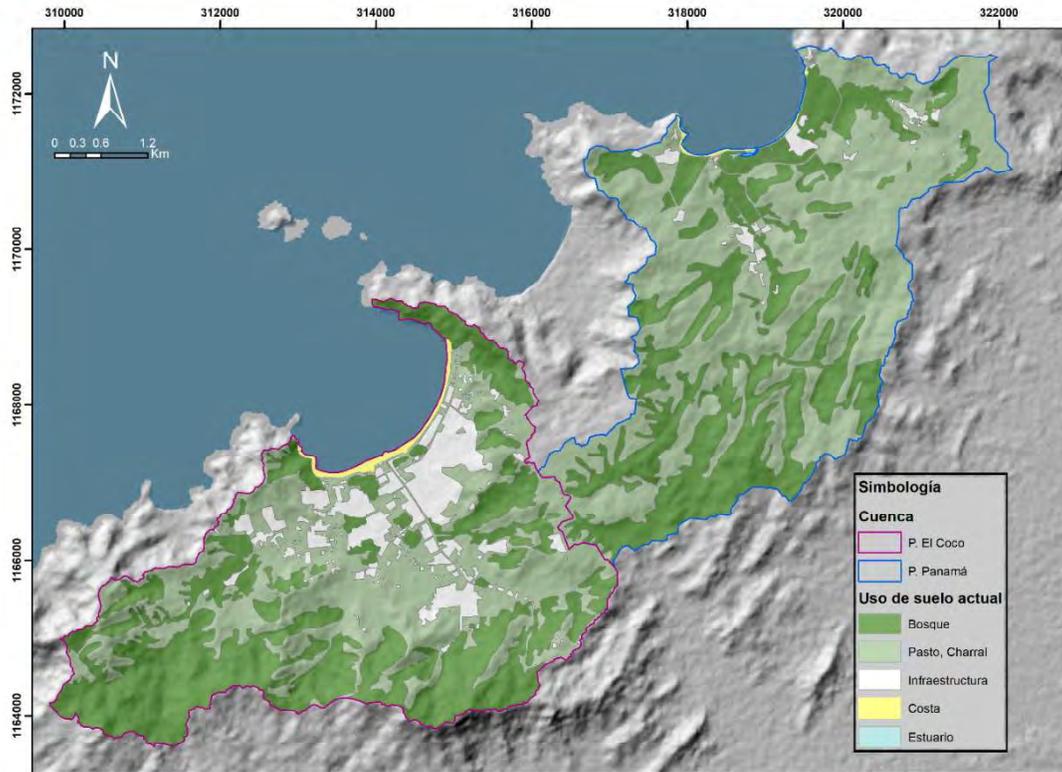


Figura 10 Mapa del uso de suelo actual

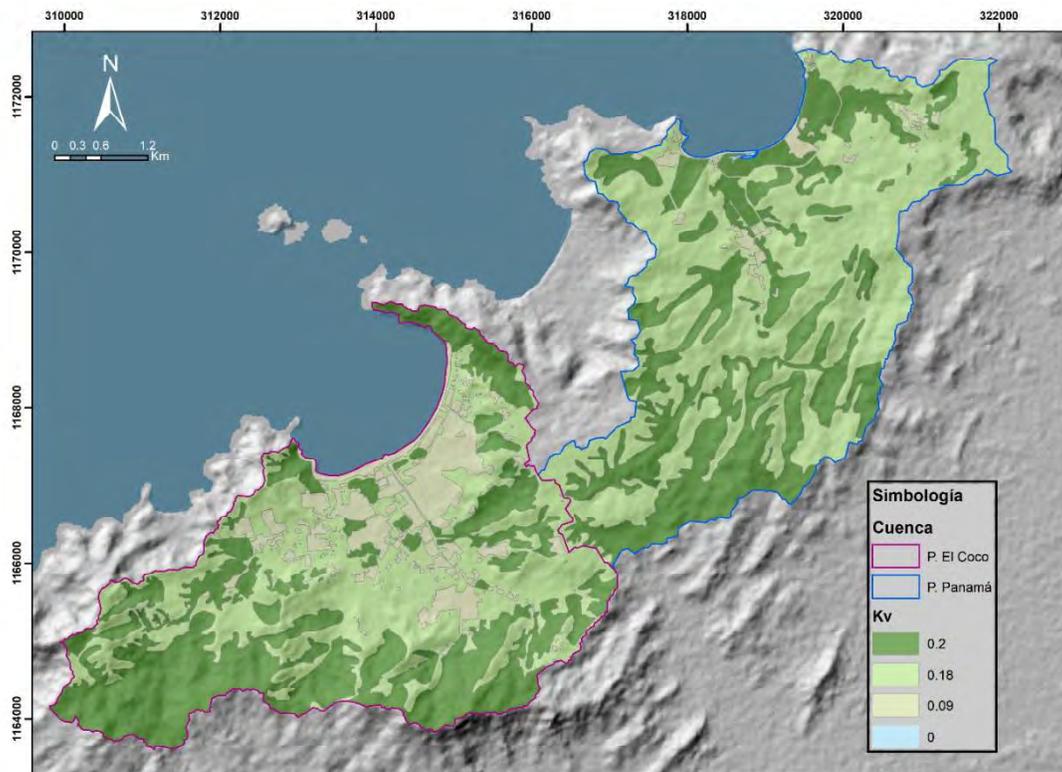


Figura 11 Mapa de la fracción que infiltra por la cobertura vegetal

Para el cálculo de los siguientes factores de la metodología se utilizó la herramienta de álgebra de mapas de ArcGIS. Esta permite realizar operaciones algebraicas utilizando mapas e imágenes en formato ráster. Para esto fue necesario adaptar las fórmulas definidas por Schosinsky (2006) al lenguaje de la herramienta, los caracteres entrecorriados corresponden con el nombre del archivo ráster que posee la información de cada factor de la ecuación.

#### 1.7.4.1.4 Coeficiente de infiltración (Ci)

Para el cálculo del coeficiente de infiltración se utilizó la fórmula definida por ONU (1972) adaptada al lenguaje de la herramienta:

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc \text{ es mayor de } 1, Ci = 1$$

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc \text{ es menor o igual a } 1, \text{ entonces } Ci = Kp + Kv + Kfc$$

Una vez adaptada se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Con}("kfc" + "kp" + "kv" \leq 1, ("kfc" + "kp" + "kv"), 1)$$

De esta manera se obtiene un mapa de coeficiente de infiltración para toda el área de estudio con la misma resolución de los mapas utilizados para su cálculo (ver Figura 12).

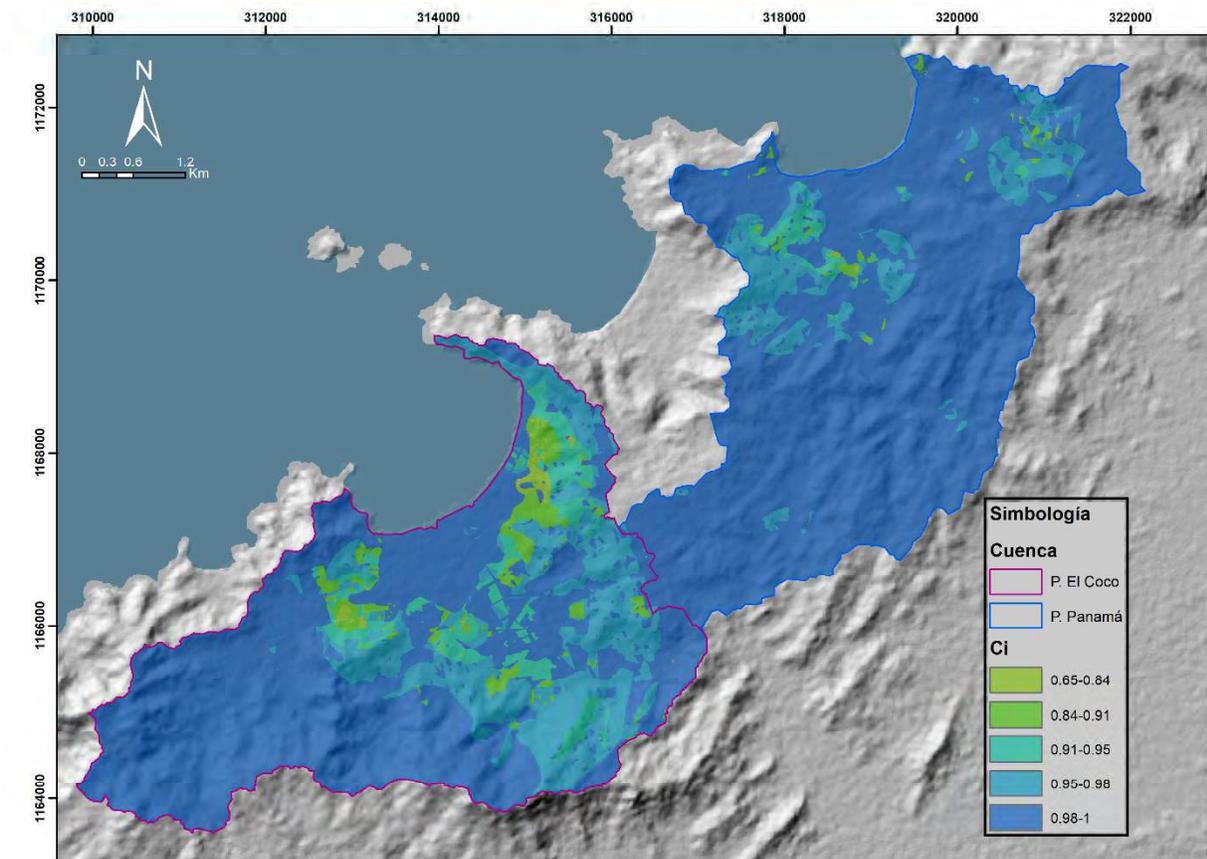


Figura 12 Mapa del coeficiente de infiltración (Ci)

#### 1.7.4.1.5 Cálculo de la infiltración pluvial mensual

Para determinar la cantidad de lluvia que infiltra mensualmente se debe considerar: la precipitación mensual (P), la fracción de lluvia interceptada por el follaje (RET) y el coeficiente de infiltración (Ci) (Schosinsky, 2006).

$$\text{Precipitación que infiltra mensualmente en el suelo } (P_i) = (C_i) * (P - RET)$$

#### 1.7.4.1.5.1 Fracción de lluvia interceptada por el follaje (RET)

Schosinsky & Losilla (2000) consideran que las lluvias menores a 5 mm mensuales no generan infiltración ya que son retenidas por el follaje. Considerando esto y a Linsley et al. (1982), Schosinsky (2006) define el coeficiente de retención de follaje como el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, con un valor de 0.20 para bosques densos y 0.12 para otros. Se utilizó el mapa de uso de suelo actual (Figura 10) para reclasificarlo según los valores mencionados y se obtuvo el Mapa del Coeficiente de retención de follaje Cfo (Ver Figura 13).

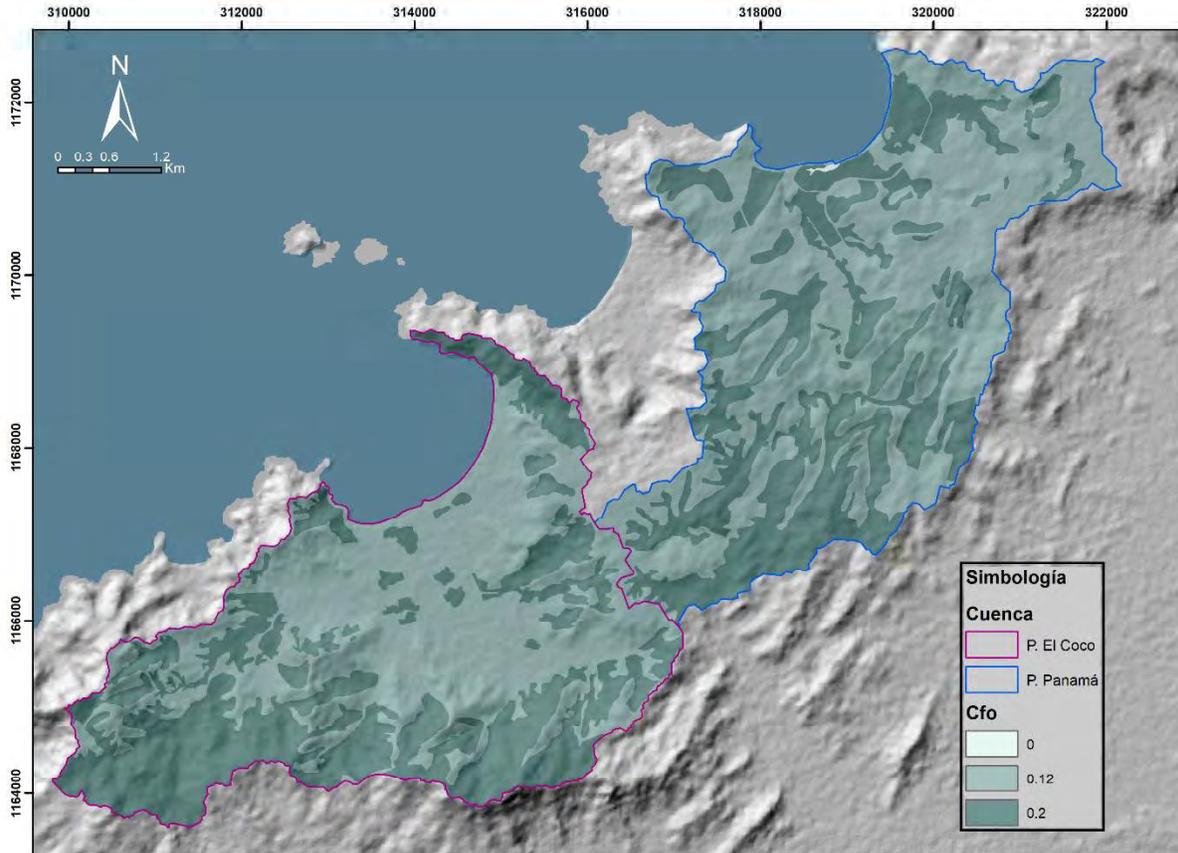


Figura 13 Mapa del coeficiente de retención de follaje (Cfo)

Una vez obtenido el Cfo se procedió a calcular la retención de lluvia en el follaje utilizando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Si } P < 5 \text{ mm/mes, } RET &= P \\ \text{Si } P * Cfo &\geq 5 \text{ mm/mes, } RET = P * Cfo \\ \text{Si } P > 5 \text{ mm/mes y } P * Cfo < 5 \text{ mm/mes, } RET &= 5 \end{aligned}$$

La cual fue adaptada para aplicarse en la herramienta de álgebra de mapas para cada uno de los meses del año y obtener un mapa de la Fracción de lluvia interceptada por el follaje para cada uno de los 12 meses:

$$\text{Con}("P" <= 5, "P", \text{Con}("P" * "cfo" >= 5, "P" * "cfo", \text{Con}(("P" > 5) \& ("P" * "cfo" < 5), 5)))$$

Seguidamente, se procedió a realizar el cálculo de la precipitación que infiltra en el suelo en cada mes del año, utilizando el mapa del Coeficiente de infiltración (Figura 12) y el mapa de la fracción de lluvia interceptada por el follaje correspondiente, mediante la siguiente fórmula:

$$("ci") * ("P" - "Ret")$$

#### 1.7.4.1.6 Cálculo de la escorrentía superficial

La escorrentía superficial es la fracción de la lluvia mensual que no es retenida por el follaje ni se infiltra en el suelo. Schosinsky (2006) utiliza la siguiente ecuación:

$$ESC = P - RET - Pi$$

Este cálculo fue realizado para cada uno de los 12 meses y analizado de manera anual aplicando la suma de todos los meses. Para esto se utilizó la expresión lo en la calculadora de mapas:

$$"P" - "Ret" - "Pi"$$

#### 1.7.4.2 Cálculo de la recarga potencial

Para elaborar un balance de suelo es necesario conocer, además de la infiltración mensual al suelo, la densidad aparente, la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez del suelo, también la profundidad aproximada de las raíces (Schosinsky, 2006).

##### 1.7.4.2.1 Densidad aparente

Para la cuenca de El Coco, se tomaron los datos generados en la investigación de Gómez (2005), y los de Arredondo (2009), para la cuenca de Playa Panamá (Ver Tabla 4 y Figura 14). Estos fueron obtenidos en campo utilizando la metodología del cilindro de volumen conocido y se encuentran dentro del rango sugerido por Schosinsky (2006) para cada tipo de suelo. A partir de esta información, se procedió a interpolar los datos utilizando el método de Inverse Distance Weighting (Figura 15). Los datos generados por Murillo (2007) fueron utilizados como referencia, pero no se incluyeron en la interpolación debido a que se desconoce las coordenadas de los muestreos.

##### 1.7.4.2.2 Capacidad de Campo y Punto de Marchitez

Estos se obtienen a través de análisis de muestras de suelo en un laboratorio. Para este estudio se utilizaron los resultados de los análisis de muestras de suelo realizados en investigaciones anteriores (Ver Tabla 4), la ubicación de los muestreos se presenta en la Figura 14.

Tabla 4 Datos de densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez utilizados

Código	Referencia	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	CC%	PM%
M-1	Arredondo 2009	1.11	30.65	21.84
M-2	Arredondo 2009	1.15	35.77	22.65
M-3	Arredondo 2009	1.01	38.44	22.77
M-4	Arredondo 2009	1.58	29.61	22.57
M-5	Arredondo 2009	1.08	32.65	21.96
M-6	Arredondo 2009	1.31	30.55	22.09
M-7	Arredondo 2009	1.19	39.14	23.15
M-8	Arredondo 2009	1.09	29.67	22.27
M-9	Arredondo 2009	1.06	38.44	22.98
M-10	Arredondo 2009	0.98	26.51	20.19
Cog-5	Gómez 2005	1.29	33.43	16.99
Cog-6	Gómez 2005	1.29	32.36	17.6
Cog-9	Gómez 2005	1.29	35.06	18.47
Cog-11	Gómez 2005	1.29	36.37	18.56
Cog-14	Gómez 2005	1.34	34.72	18.45
Cog-7	Gómez 2005	1.34	25.49	16.61

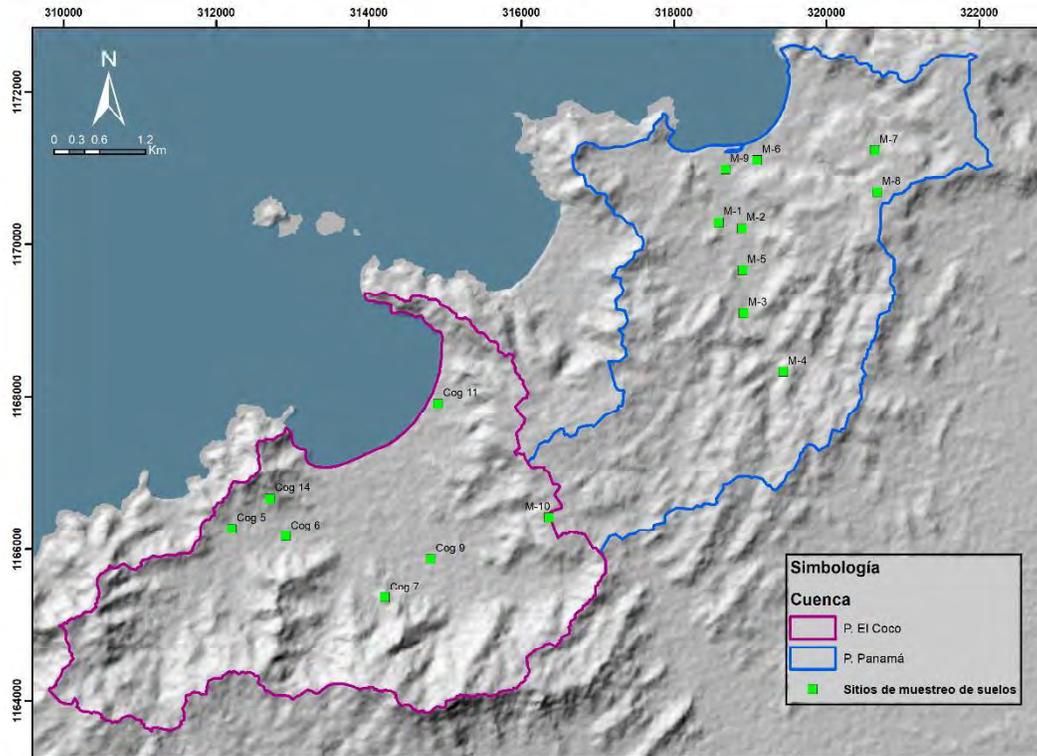


Figura 14 Mapa de Ubicación de las Muestras de suelo realizados por Arredondo 2009 y Gómez 2005

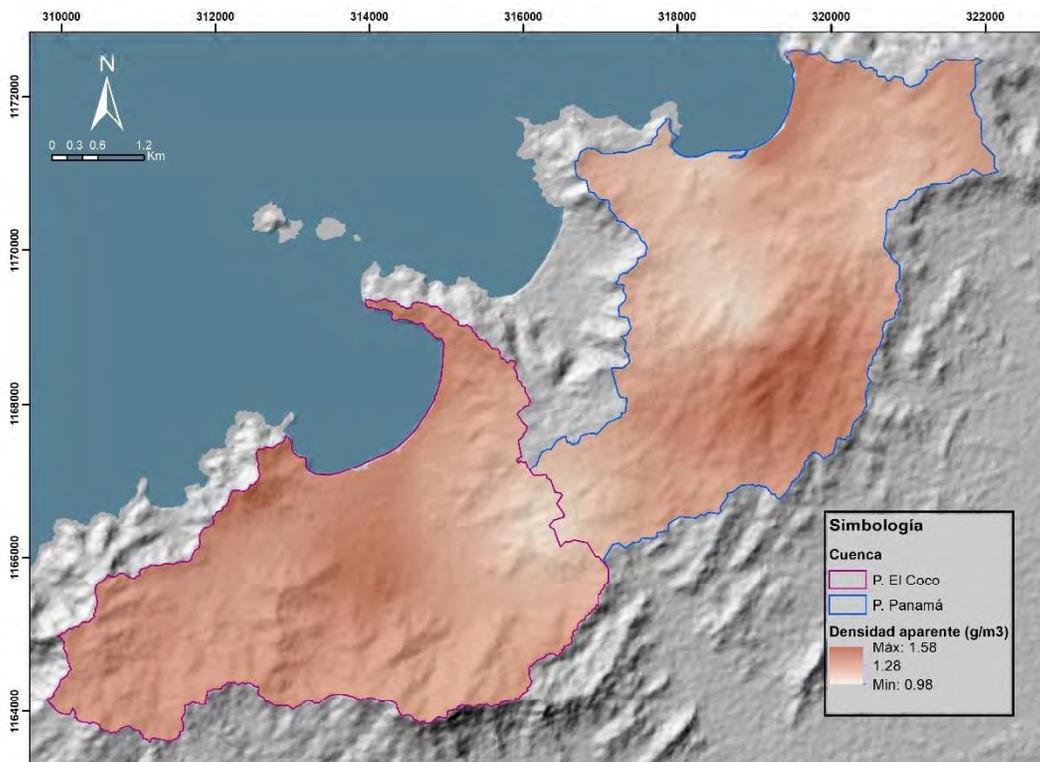


Figura 15 Mapa de densidad aparente

Los valores de capacidad de campo y punto de marchitez presentados en la Tabla 4 están dados en porcentaje de humedad, por lo tanto fueron convertidos a milímetros de agua, se utilizó la ecuación sugerida por Schosinsky (2006):

$$mm \text{ de agua} = \frac{(\% \text{ de humedad} * \text{densidad aparente} * \text{profundidad de raíces})}{100}$$

Para esto, se procedió a elaborar un mapa de profundidad de raíces (Figura 16) utilizando el mapa de uso de suelo actual (Figura 10) reclasificado utilizando la Tabla 5. La profundidad de raíz utilizada para cada tipo de vegetación fue seleccionada utilizando como criterio los valores sugeridos por Schosinsky (2006), los valores utilizados por Gómez (2005), Murillo (2007), Arredondo (2009) en el área de estudio, y en investigaciones similares a la presente como lo son Corrales (2017), Obando (2017) y Alvarado (2018).

Tabla 5 Valores utilizados para el mapa de Profundidad de raíz

Cobertura Vegetal	Profundidad de raíz (mm)
Bosque	2000
Pasto	500
Infraestructura	300
Sin cobertura (costa y estuario)	0

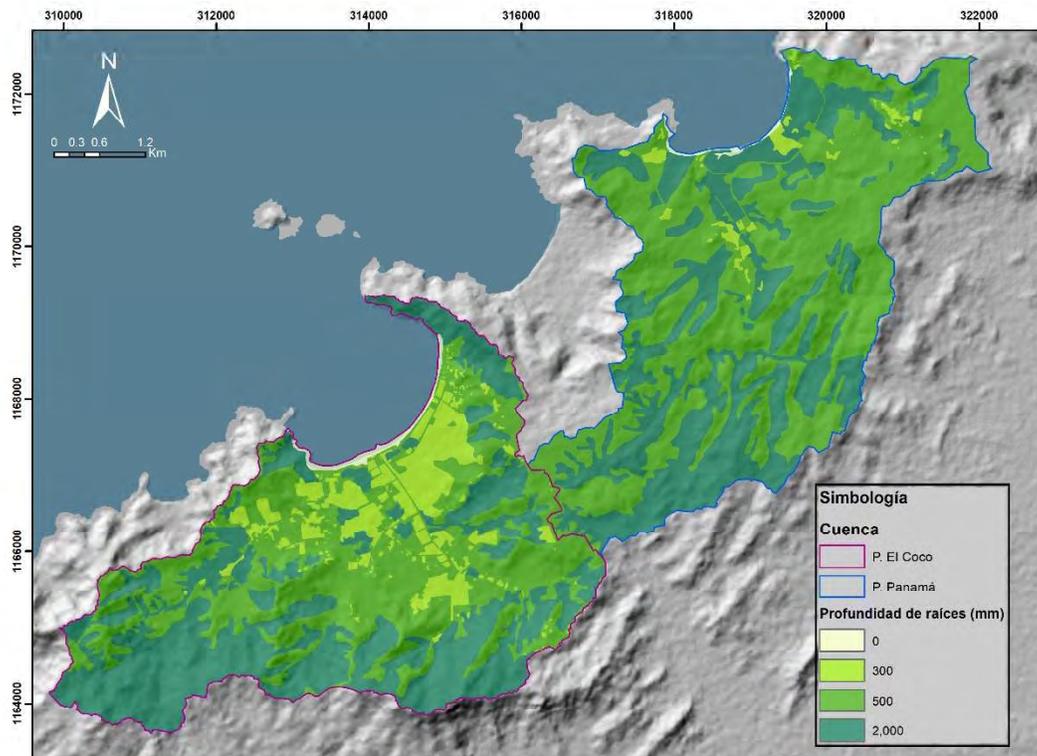


Figura 16 Mapa de profundidad de raíces

En la herramienta de calculadora de rásters, se introdujeron las siguientes ecuaciones para generar el mapa de capacidad de campo (Figura 17) y el mapa de punto de marchitez (Figura 18) respectivamente.

$$("cc\%" * "dens\_ap" * "prof\_raiz\_mm") / 100$$

$$("pm\%" * "dens\_ap" * "prof\_raiz\_mm") / 100$$

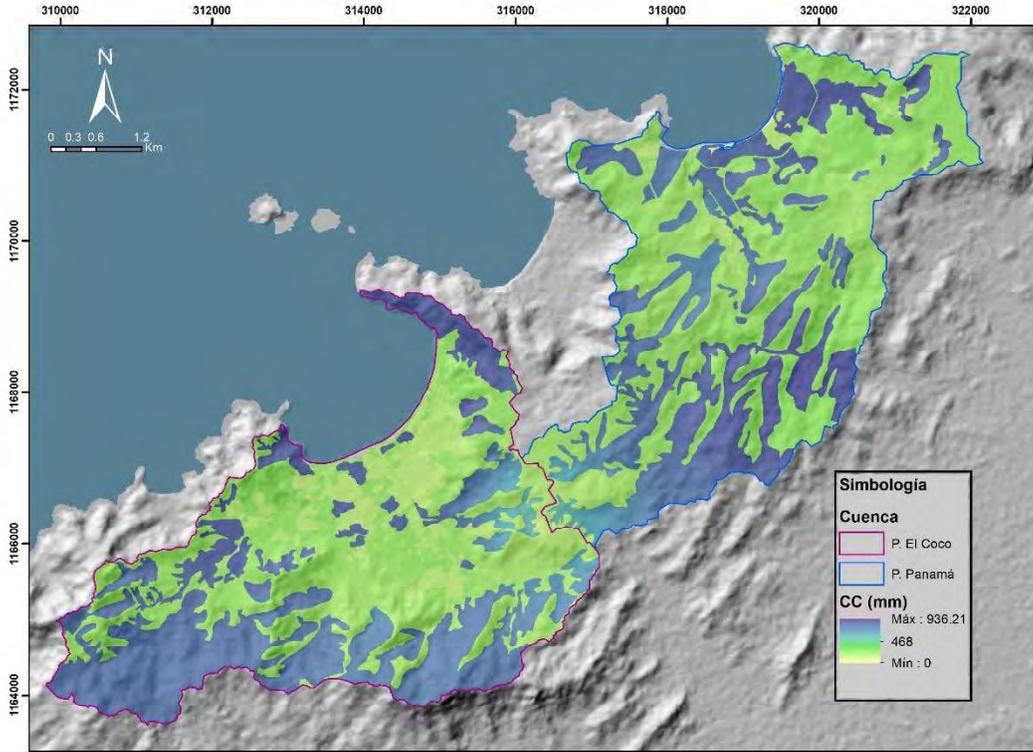


Figura 17 Mapa de capacidad de campo (CC)

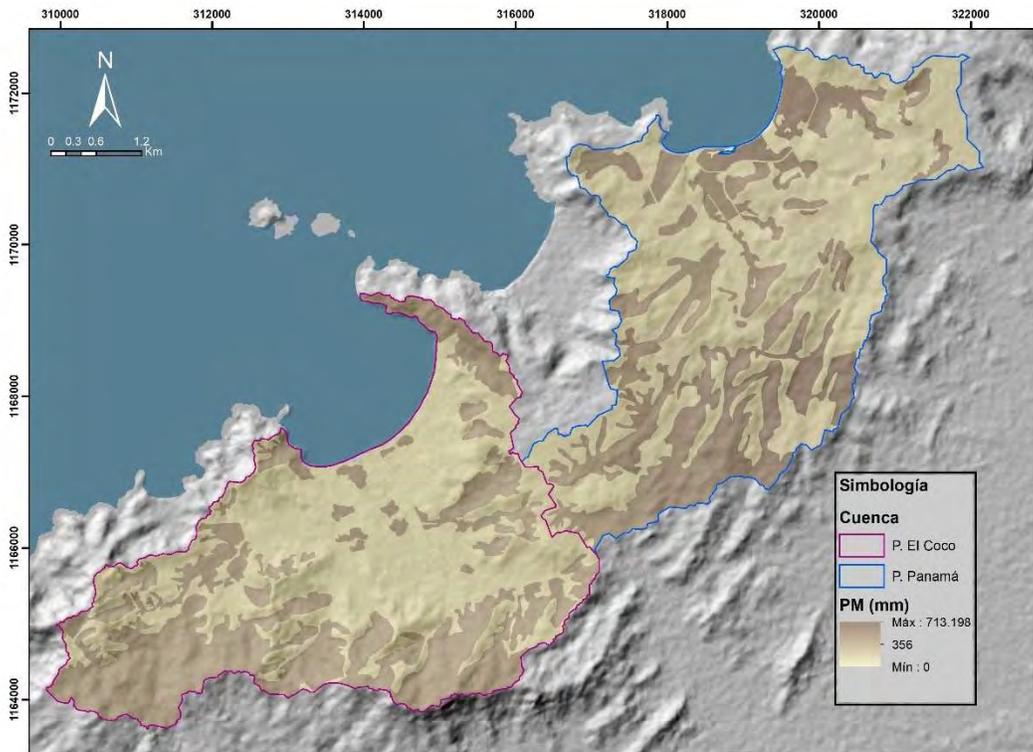


Figura 18 Mapa de punto de marchitez (PM)

### 1.7.4.2.3 Coeficientes de Humedad

#### 1.7.4.2.3.1 C1

Al iniciar un mes, el suelo tiene una humedad inicial (Hsi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) viene a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no se considera la evapotranspiración, el coeficiente de humedad al final del mes está dado por (Schosinsky, 2006):

$$C1 = \frac{(Hsi - PM + Pi)}{(CC - PM)}$$

Donde:

C1= Coeficiente de humedad al final del mes antes de ocurrir la evapotranspiración.

Hsi= Humedad al inicio del mes (mm)

PM= Punto de marchitez (mm)

Pi= Precipitación que infiltra (mm)

CC= Capacidad de campo (mm)

Para realizar el cálculo, es necesario conocer la humedad del suelo al inicio de cada mes. En caso de no contar con esta información, Schosinsky (2006) sugiere que el cálculo de la recarga inicie a partir de un mes en el que se pueda asumir que la humedad del suelo inicial sea igual a la capacidad de campo del suelo. Esta asunción es correcta al seleccionar un mes que le precedan varios meses en que la precipitación fue mayor que la evapotranspiración potencial mensual. En Costa Rica, esto sucede generalmente para el mes de noviembre, último mes de la época lluviosa.

Se inició el cálculo de la recarga al acuífero utilizando noviembre como el primer mes, tomando la capacidad de campo del suelo como la humedad del suelo inicial. Para los siguientes meses, el valor de la humedad inicial es igual a la humedad final del mes anterior. En la herramienta álgebra de mapas se utilizó la siguiente ecuación:

$$("Hsi" - "pm\_mm" + "Pi") / ("cc\_mm" - "pm\_mm")$$

Como el valor del C1 no puede ser mayor que uno ni menor que cero, el resultado del proceso anterior fue reclasificado utilizando:

$$\text{Con}("c1" < 0,0, \text{Con}("c1" < 1, "c1", 1))$$

#### 1.7.4.2.3.2 C2

Definido por Schosinsky (2006) como el coeficiente de humedad al final del mes después de que ocurre la evapotranspiración. Para su cálculo es necesario conocer la Evapotranspiración potencial real (ETR1), esta se calculó de la siguiente manera:

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

Una vez adaptada para utilizarse en la herramienta de álgebra de mapas:

$$"c1" * "etp"$$

Generado el mapa de la evapotranspiración potencial real se procedió a calcular el C2 utilizando la ecuación:

$$C2 = \frac{(Hsi - PM + Pi - ETR1)}{(CC - PM)}$$

Expresada de la siguiente manera en el lenguaje de la herramienta álgebra de mapas:

$$("hsi" - "pm\_mm" + "pi" - "ETR1") / ("cc\_mm" - "pm\_mm")$$

Al igual que el C1, este coeficiente no puede ser menor que cero ni mayor que uno, por lo tanto, el resultado es reclasificado utilizando:

$$\text{Con}("c2" < 0,0,\text{Con}("c2" < 1,"c2",1))$$

#### 1.7.4.2.4 Humedad Disponible

Corresponde con la humedad que pueden tomar las raíces de las plantas para evapotranspirar y está dada por la siguiente ecuación (Schosinsky, 2006):

$$HD \text{ (mm/mes)} = Hsi + Pi - PM$$

Esta fue calculada para cada mes, la ecuación se expresa de la siguiente manera en el lenguaje de la herramienta álgebra de mapas:

$$"hsi" + "Pi" - "pm\_mm"$$

#### 1.7.4.2.5 Evapotranspiración Real

Schosinsky (2006) presenta la siguiente ecuación para determinar la evapotranspiración que realmente ocurre según la humedad disponible en el suelo:

$$Si \left( \frac{C1 + C2}{2} \right) * ETP \leq HD \rightarrow ETR = \left( \frac{C1 + C2}{2} \right) * ETP$$

$$Si \left( \frac{C1 + C2}{2} \right) * ETP > HD \rightarrow ETR = HD$$

Esta fue calculada para cada mes, la ecuación se expresa de la siguiente manera en el lenguaje de la herramienta álgebra de mapas:

$$\text{Con}(((("c1" + "c2") / 2) * "etp" <= "hd"),((("c1" + "c2") / 2) * "etp", "hd"))$$

#### 1.7.4.2.6 Humedad del suelo a final de mes

Por último, para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes (Hsf), esta no puede ser mayor que la capacidad de campo (Schosinsky, 2006). Se obtiene a partir de las siguientes condiciones:

$$Si (HD + PM - ETR) < CC \rightarrow Hsf = HD + PM - ETR$$

$$Si (HD + PM - ETR) > CC \rightarrow Hsf = CC$$

Este sistema de ecuaciones se expresa de la siguiente manera en el lenguaje de la herramienta álgebra de mapas:

$$\text{Con}("hd" + "pm\_mm" - "etr" <= "cc\_mm", "hd" + "pm\_mm" - "etr", "cc\_mm"))$$

La humedad del suelo final (Hsf) es igual a la humedad inicial (Hsi) del mes que le precede. Esto se aplicó para todos los meses excepto para el mes con el que se inicia la metodología, en este caso noviembre.

#### 1.7.4.2.7 Recarga potencial al acuífero

Según Schosinsky (2006), la recarga al acuífero ocurre si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y, además, satisfacer la evapotranspiración de las plantas. Esta se calcula con la siguiente ecuación:

$$Rp = Pi + Hsi - Hsf - ETR$$

Esta fue calculada para cada mes, la ecuación se expresa de la siguiente manera en el lenguaje de la herramienta álgebra de mapas:

$$"pi" + "hsi" - "hsf" - "etr"$$

Posteriormente, se procedió a sumar los mapas de recarga potencial de los 12 meses para generar el mapa de recarga potencial anual.

### 1.7.5 Determinación de la recarga real

Scanlon, Healy, & Cook (2002) expresan que la incertidumbre asociada a los diferentes métodos para el cálculo de la recarga es grande, por lo tanto, es una necesidad aplicar varias técnicas para aumentar la fiabilidad de las estimaciones de la recarga.

Las técnicas basadas en datos de aguas superficiales y zonas no saturadas proporcionan estimaciones del potencial de recarga, mientras que las que se fundamentan en datos de aguas subterráneas proporcionan estimaciones de la recarga real (Scanlon et al., 2002).

Para la estimación de la recarga real de ambos acuíferos, se analizaron hidrogramas de pozos y se aplicó la metodología conocida en inglés como Water Table Fluctuation method (WTF) descrita por Healy & Cook (2002).

Esta metodología utiliza la fluctuación de niveles de los pozos y el tiempo que transcurre entre las mismas. Morgan & Stolt (2004) y Delin et al. (2007) han determinado que entre menor es la frecuencia de monitoreo, mayor es la subestimación de la recarga. Señalan que debe aplicarse preferiblemente cuando se cuenten con frecuencias de monitoreo semanales o mayores.

Tomando en cuenta lo anterior y que, según los resultados de las investigaciones anteriores aplicadas en ambos acuíferos, la recarga ocurre durante la época lluviosa y principalmente en los meses donde el suelo alcanza la mayor humedad se procedió a aplicar la metodología en diferentes escalas de tiempo para observar la variación de los resultados y el grado de subestimación del método.

Se inició con el rango más amplio (año 2017 completo), luego este se redujo únicamente a los 7 meses de la época lluviosa (mayo-noviembre), posteriormente se limitó a los dos meses de mayor intensidad de precipitaciones (setiembre y octubre). Por último, se utilizaron las precipitaciones intensas ocasionadas por dos eventos climáticos extremos (Huracán Otto y Tormenta Tropical Nate) que ocurrieron en periodos de tiempo que se encuentran dentro del rango que otros autores como Morgan & Stolt (2004) y Delin et al. (2007) consideran ideal.

Esta se aplicó en cada uno de los 9 pozos que cuentan con monitoreo automático (Ver Figura 19) para calcular la recarga neta del año 2017 y la recarga total producto de los eventos climáticos el Huracán Otto (21 al 26 de noviembre 2016) y la tormenta tropical Nate (4 al 9 de octubre 2017).

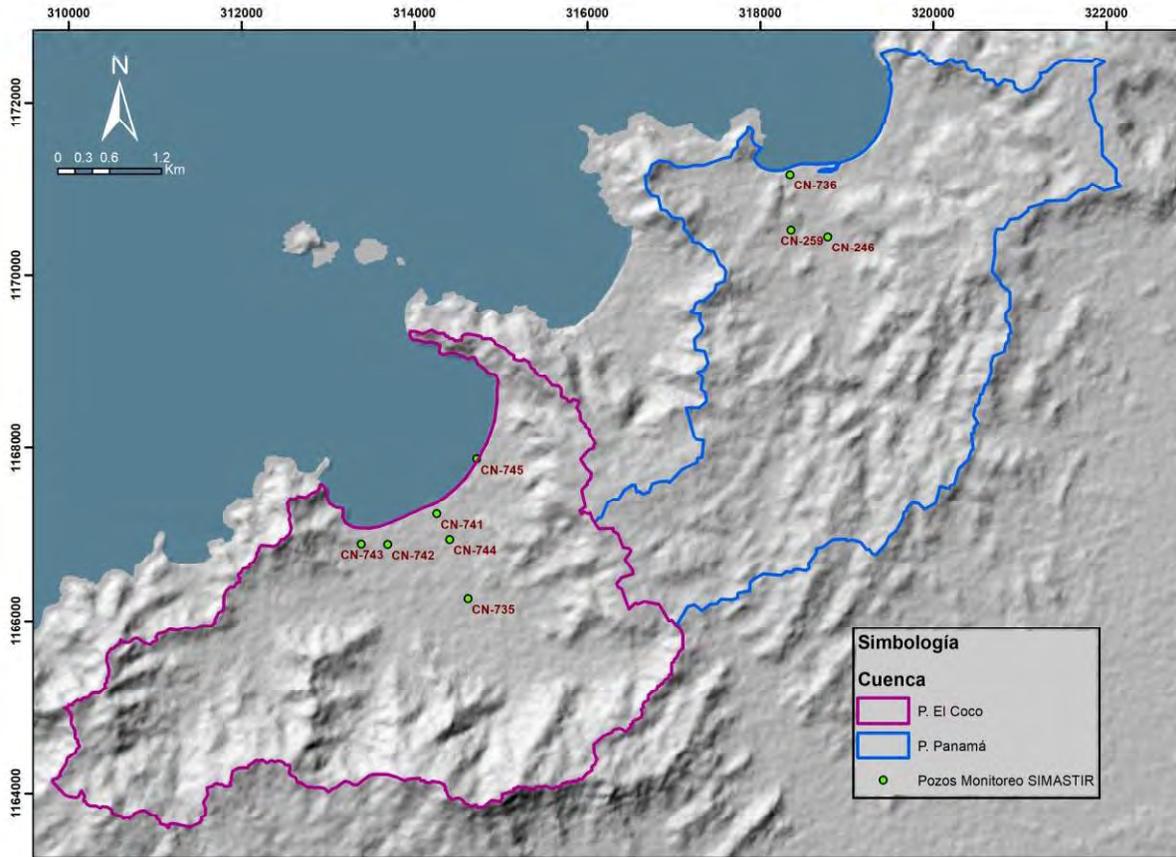


Figura 19 Mapa de ubicación de los pozos monitoreados automáticamente

Como se mencionó previamente, esta metodología parte del supuesto que estas fluctuaciones de nivel se deben únicamente por la recarga y descarga del acuífero. Sin embargo, estas pueden estar relacionadas a otros factores como cambios en la presión atmosférica, la presión ejercida por las mareas en el acuífero, bombeo del pozo, abatimiento causado por bombeo de pozos cercanos, entre otros. Por lo tanto, se procedió a analizar la causa de las fluctuaciones para determinar donde era correcto aplicarla.

#### 1.7.5.1 Cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante el análisis de la influencia mareal

Para la aplicación del método de fluctuación de niveles es necesario conocer el coeficiente de almacenamiento, este tradicionalmente se obtiene a través del análisis de pruebas de bombeo con un pozo testigo. Sin embargo, esta técnica no ha sido utilizada en el sistema acuífero El Coco y únicamente para un pozo del sistema acuífero Playa Panamá. Por lo tanto, se empleó la técnica de la eficiencia mareal y el retraso mareal para el cálculo del coeficiente de almacenamiento para cada sistema acuífero.

La eficiencia mareal se define como la diferencia entre la amplitud de las ondas senoidales de la marea y la amplitud de la oscilación del nivel de agua producto de la marea, según Todd & Mays (2005), mide la incompetencia de las capas confinantes a resistir los cambios de presión. Se representa con la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta h}{\Delta h_0} = \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right)$$

Donde la eficiencia mareal (EM) es igual a  $\frac{\Delta h}{\Delta h_0}$ ,  $\Delta h$  es la variación del nivel de agua en el acuífero respecto al nivel medio,  $\Delta h_0$  es la amplitud de la oscilación de la marea,  $x$  es la distancia entre el mar y la medición,  $t_0$  es el periodo de la marea,  $S$  el coeficiente de almacenamiento y  $T$  la transmisividad del acuífero.

El retraso de la oscilación del nivel de agua respecto a la oscilación mareal (R), en inglés *Time Lag*, está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{t_0 S}{\pi T}}$$

Ambas metodologías se aplicaron utilizando los datos horarios de mareas y nivel de agua en los pozos monitoreados, se escogió el mes de marzo del año 2017 y el mes de marzo del año 2018 ya que en la costa pacífica norte es durante este mes que ocurren las mayores mareas (Murillo, 2001). Se aplicó para las cuatro semanas del mes, obteniendo 8 mediciones para cada pozo seleccionado.

#### 1.7.5.2 Cálculo de la recarga neta anual

Para el cálculo de la recarga neta del año 2017, se tomó el valor del nivel de agua al inicio del año y al final del año, el coeficiente de almacenamiento para todo el acuífero definido anteriormente y se obtiene la recarga neta.

Posteriormente, se asignó un área de influencia a cada punto de monitoreo utilizando como base la metodología de polígonos de Thiessen, más adelante, se tomaron en cuenta factores como la red de flujo, topografía y disposición de las formaciones geológicas. Debido a que los puntos de monitoreo se encuentran principalmente ubicados en los acuíferos principales, el área de influencia no se extiende a las partes montañosas de la cuenca (ver Figura 20).

Estas áreas se utilizaron para calcular el volumen de recarga neto del año. Además, se tomó la cantidad de lluvia anual en milímetros y se multiplicó por el área en superficie del acuífero para conocer el volumen de agua llovida y el porcentaje de esta que fue recargado. En el año 2017, según los datos de la estación Aeropuerto Daniel Oduber del IMN, en total llovió 2007.9 mm/m<sup>2</sup>.

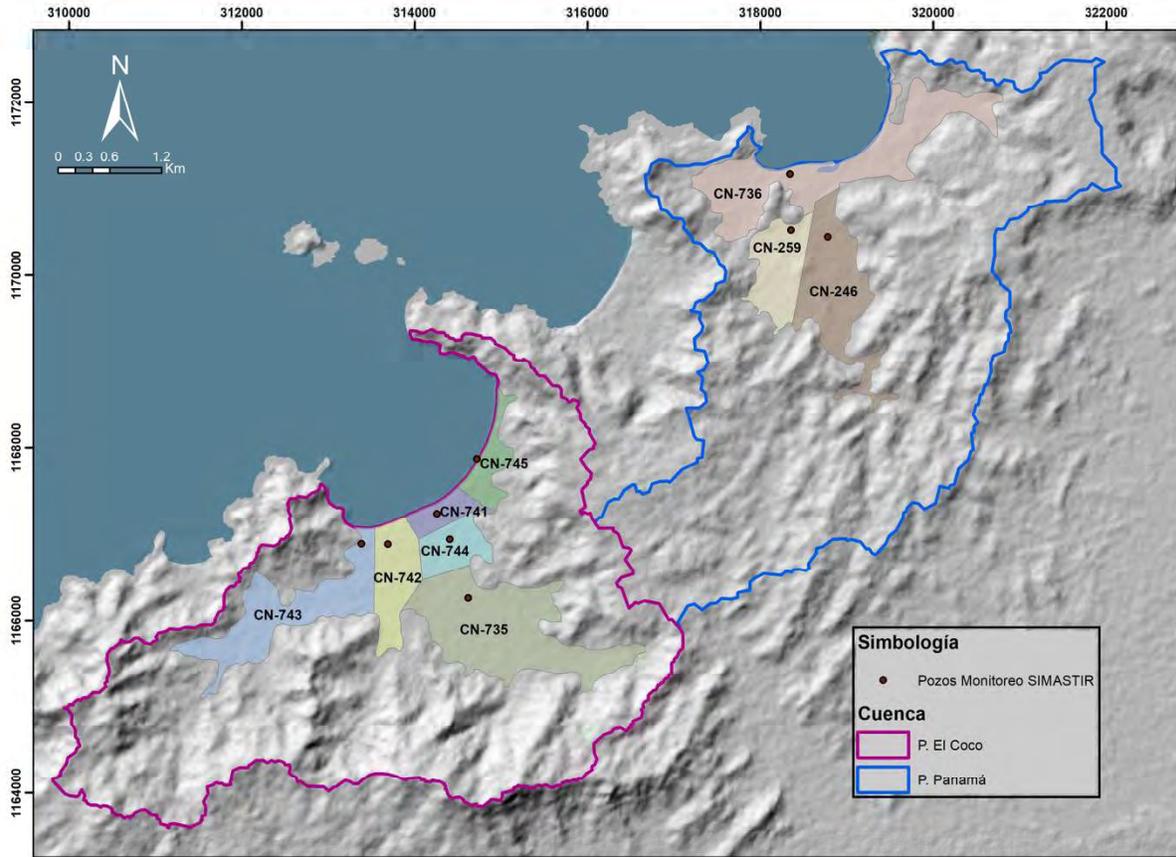


Figura 20 Mapa de las áreas de influencia de cada pozo

### 1.7.5.3 Cálculo de la recarga neta durante la época lluviosa

Se siguió el mismo procedimiento utilizado para el cálculo de la recarga neta anual, se tomó como el primer día de la época lluviosa el 1 de mayo y como último el 30 de noviembre del 2017. Durante la época lluviosa de ese año se registraron 1936.4 mm de lluvia, aproximadamente el 96% del total de ese año. Septiembre y octubre se caracterizan por ser los meses más lluviosos del año según el comportamiento histórico, en el año 2017 registraron el 47% de la precipitación del año (936.6 mm).

### 1.7.5.4 Cálculo de la recarga total durante el Huracán Otto y la Tormenta Tropical Nate

Se siguió el mismo procedimiento utilizado para el cálculo de las recargas netas. El periodo de cálculo fue definido a partir de la información oficial disponible del IMN sobre ambos eventos climáticos extremos y los registros de precipitación de la estación meteorológica Aeropuerto Daniel Oduber.

## 1.7.6 Determinación de la calidad de agua

### 1.7.6.1 Descripción del Muestreo

Para poder caracterizar geoquímicamente y conocer la calidad del agua actual de ambos acuíferos se hizo una campaña de muestreo de agua, durante la cual se realizaron mediciones electroquímicas in situ (temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, Salinidad, Resistividad y oxígeno disuelto) ( ver Figura 21 A y C). Se tomaron muestras representativas de agua para realizar análisis ex situ como la determinación de la alcalinidad (realizada el mismo día del muestreo, ver Figura 21 D.) y la determinación de las concentraciones de iones mayores en laboratorio (  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  ) (ver Figura 21 E).

Las muestras se almacenaron en botellas comerciales de polietileno (ver Figura 21 B) y se conservaron refrigeradas en todo momento, durante la campaña de muestreo utilizando hielera y refrigerador.

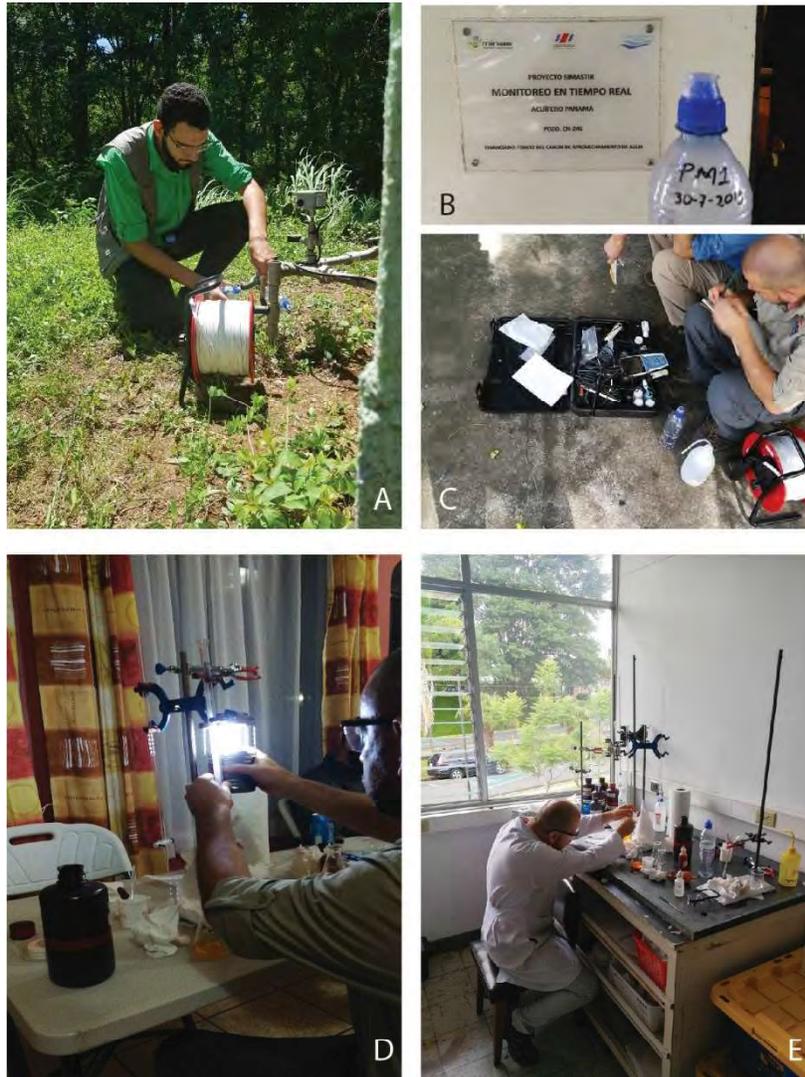


Figura 21 Campaña de muestreo de aguas y medición de niveles (Julio 2019)

Para la elaboración de la red de muestreo se consideró la ubicación y distribución espacial de los puntos, el armado de cada pozo, su profundidad y que preferiblemente fuera bombeado durante el muestreo o que hubiese sido bombeado recientemente. Sin embargo, factores como la dificultad de acceso al pozo, la imposibilidad de inserción del equipo de muestreo (bailer), el estado de abandono de varios pozos de abastecimiento público y el desuso de los pozos domésticos, condicionaron el muestreo.

En total, se hicieron 13 mediciones electroquímicas in situ y 11 análisis de iones mayores en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología.

Primeramente la muestra PM-1 fue tomada en el pozo CN-246 perteneciente a la ASADA de Playa Panamá, este abastece aproximadamente a 490 habitantes y es bombeado durante 8 horas al día. La muestra se realizó directamente de la salida de agua y el pozo había estado en producción horas antes de la visita, sin embargo no fue purgado.

La muestra PM-2 fue tomada en el pozo perteneciente a Programas Americanos Fletcher del Pacífico Ltda. Es bombeado 6 horas al día y su uso principal corresponde con el riego de la finca agrícola. Al momento de la toma de la muestra el pozo no fue bombeado ni purgado, había estado en producción la noche anterior y la muestra corresponde con agua almacenada.

En cuanto a la muestra PM-3, fue realizada en el pozo CN-744, este se encontraba correctamente protegido y según el propietario es bombeado regularmente, pero con mayor frecuencia durante la época seca para el riego de la propiedad. Para la toma de la muestra el pozo fue bombeado, sin embargo no fue purgado en su totalidad.

La muestra PM4 fue realizada en un pozo artesanal abandonado ubicado a 5 metros del pozo artesanal CN-745 donde se realizó la muestra PM5. Para esta fue necesario utilizar el bailer y repetir la recolección en 4 ocasiones registrando los resultados in situ previo a la recolección de la muestra para los análisis de laboratorio, este pozo no fue purgado para las mediciones. En otra mano, la muestra PM5 realizada en el pozo CN-745, fue tomada del agua almacenada en el tanque del pozo, según el propietario el pozo es utilizado para riego y uso doméstico pero no para consumo, este es bombeado diariamente y había estado en producción horas antes del muestreo.

La muestra PM6, fue tomada en el pozo artesanal CN-743 que según el propietario es utilizado para consumo y riego, es bombeado diariamente durante 5 horas por día, al momento de la muestra el pozo se encontraba en producción sin embargo no fue purgado en su totalidad previo a la recolección.

La muestra PM7, fue tomada en el pozo artesanal CN-742, utilizado diariamente para actividades domésticas y riego durante el verano. Para la toma de muestra el pozo fue bombeado durante unos minutos previo a la recolección pero no fue purgado en su totalidad.

La muestra PM8, fue tomada en el pozo artesanal CN-741, la toma de esta muestra fue realizada utilizando el bailer y el pozo no fue purgado ya que, este pozo se encontraba abandonado debido a que las condiciones del agua según el encargado no eran buenas.

La muestra PM9, fue tomada en un pozo artesanal que no se encuentra registrado, este no contaba con bomba y no es utilizado regularmente, para la recolección de la muestra se utilizó el bailer. Este pozo se encontraba aproximadamente a 40 m de distancia del pozo CN-342 al desarrollo Los Almendros de Ocotlán, en este pozo perforado se tomó la muestra PM10, cuenta con un sistema de bombeo automático para mantener siempre lleno el tanque de almacenamiento. El agua de este pozo es utilizada para riego y turismo, al momento del muestreo el pozo se encontraba en producción y la muestra fue tomada directamente de la salida del agua del pozo hacia el tanque.

Por último, la muestra PM11 fue recolectada en el pozo perforado CN-523, este al momento de la visita se encontraba abandonado y no contaba con bomba por lo tanto no fue posible purgarlo y la muestra fue tomada haciendo uso del bailer.

Además de esta campaña de muestreo, se tuvo acceso a resultados de análisis de calidad de agua presentes en los expedientes de pozos, facilitados por la Dirección de Agua del MINAE, e investigaciones previas en ambos sistemas acuíferos como la de Gómez (2005), Murillo (2007) y Arredondo (2009). Por último, el Laboratorio Nacional de Aguas facilitó el acceso a los resultados de los análisis físico químicos y microbiológicos, realizados del 2008 al 2019 en ambos acuíferos, como parte de su red de monitoreo semestral en la región.

En la Figura 22 y Figura 23 se presenta la distribución espacial de los sitios de muestreo y pozos de monitoreo.

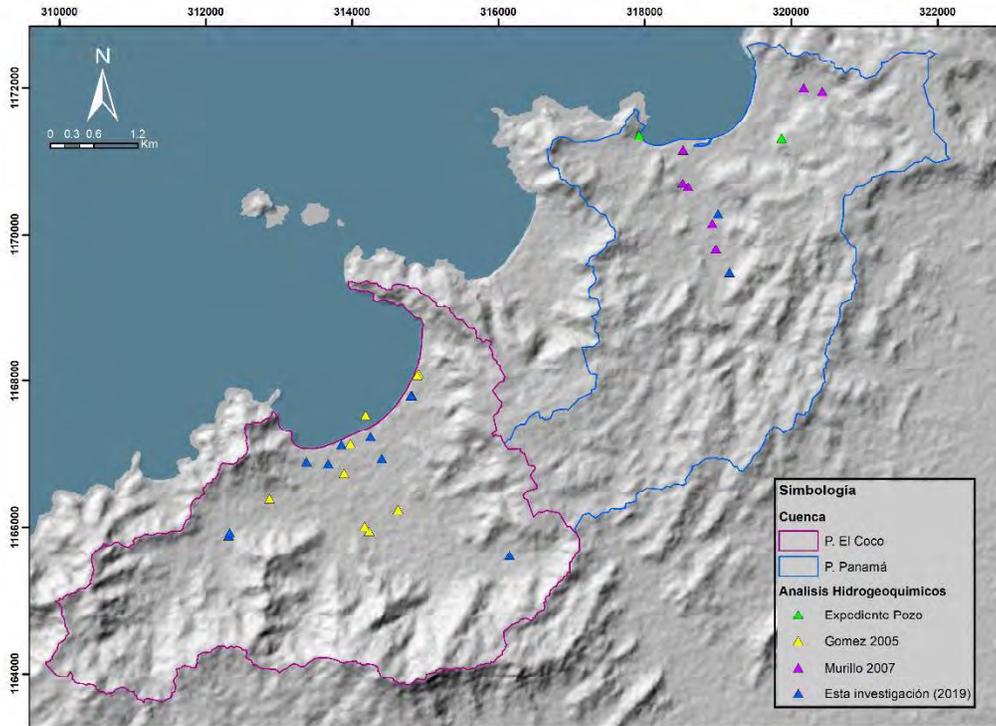


Figura 22 Mapa de los sitios de muestreo

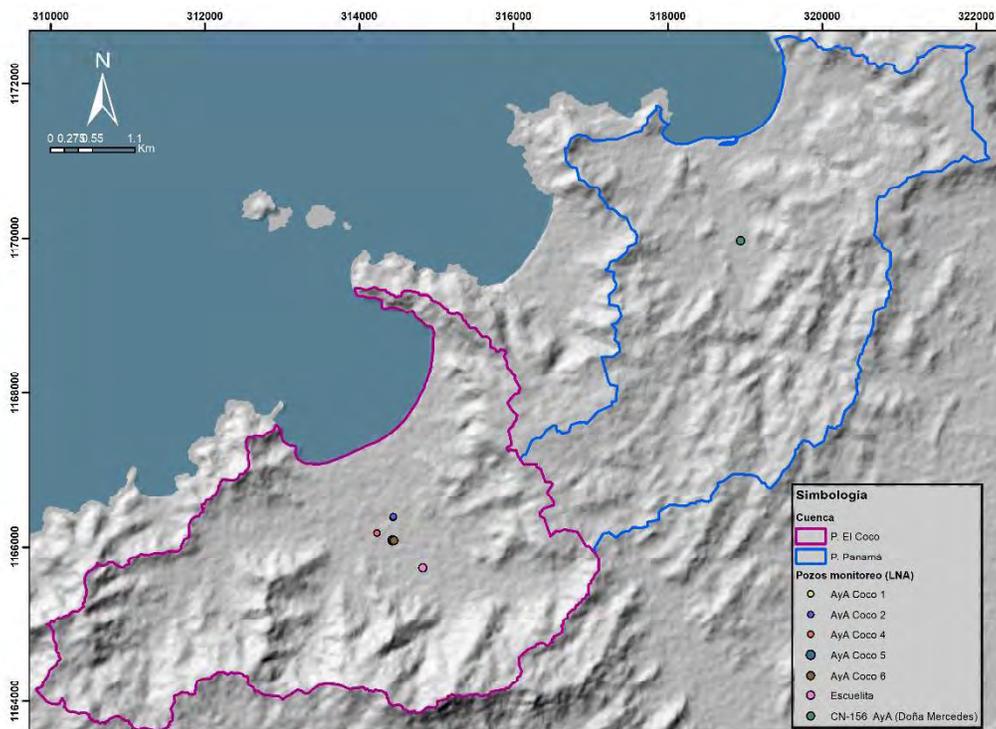


Figura 23 Mapa de pozos monitoreados semestralmente (LNA)

### 1.7.6.2 Control de Calidad

Se procedió a utilizar el cálculo del balance iónico de las muestras como herramienta de control de calidad y selección de los análisis. Esta comprobación se basa en el principio de la electroneutralidad del agua, según Appelo & Postma (2005), es un método de verificación válido para determinar la precisión de un análisis de iones mayores.

Según Custodio & Llamas (1983), el error admisible de un análisis depende de la concentración y del tipo de agua. Establece que, para valores de conductividad de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  el error admisible corresponde con 10% y, para valores de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , corresponde con 8%. Tomando en consideración el rango de conductividad de los análisis a los que se tuvo acceso, se descartaron todos los análisis cuyo balance iónico presentó un error mayor al 10%.

### 1.7.6.3 Base de Datos utilizada

Anexo al documento, se presenta la base de datos donde se muestran todos los análisis disponibles según cada acuífero, punto de monitoreo, fecha de muestreo y los iones cuyas concentraciones fueron determinadas en cada análisis. Para todos los análisis que no presentaban directamente un valor de la concentración de carbonatos y bicarbonatos, se procedió a utilizar las siguientes fórmulas propuestas por Sawyer, McCarty, & Parkin (2003):

$$\text{Alk } \text{CO}_3^{-2} = \frac{\text{Alk}_{\text{Total}} + (5000 \times [\text{H}_3\text{O}^+]) - (5000 \times \left[ \frac{K_w}{[\text{H}_3\text{O}^+]} \right])}{1 + \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{2 \times K_{a2}}}$$

$$\text{Alk } \text{HCO}_3^{-2} = \frac{\text{Alk}_{\text{Total}} + (5000 \times [\text{H}_3\text{O}^+]) - (5000 \times \left[ \frac{K_w}{[\text{H}_3\text{O}^+]} \right])}{1 + \frac{2 \times K_{a2}}{[\text{H}_3\text{O}^+]}}$$

Para la aplicación de estas fórmulas se utilizaron los valores de ambas constantes de disociación para la temperatura ambiente (25°) y presión atmosférica (ver Tabla 6). Además, es necesario conocer la concentración de iones hidronio  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  calculada a partir del potencial de Hidrógeno de cada muestra:  $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$ .

Tabla 6 Constantes de disociación

Constante de disociación	Temperatura 25°, Presión 1atm
$K_w$	$1 \times 10^{-14}$
$K_{a2}$	$1 \times 4,8^{-11}$

Los resultados obtenidos se analizaron e interpretaron utilizando el Reglamento de Calidad de Agua Potable del (MINSa, 2005), índices hidrogeoquímicos y el diagrama Piper. Además, se compararon los resultados con los resultados de análisis realizados anteriormente por otros autores y el Laboratorio Nacional de Aguas para identificar posibles variaciones temporales en la calidad del agua.

### 1.7.7 Determinación de la vulnerabilidad del acuífero

Se procedió a utilizar el método DRASTIC, propuesto por Aller et al. (1987), por considerarse más completo y tomar en cuenta más características hidrogeológicas del acuífero que el método GOD. Se aplicó únicamente al acuífero principal ubicado en los depósitos aluviales de ambas cuencas ya que es donde se cuenta con el detalle de información necesario para los siete factores, además, fue aplicado utilizando los sistemas de información geográfica ArcGIS y QGIS, en los cuales se preparó un mapa en formato ráster para cada uno de los siete factores. Posteriormente, se utilizó la herramienta *Raster Calculator* para realizar la sumatoria.

A continuación, se presenta la fórmula utilizada para generar el mapa de vulnerabilidad:

$$D_r * D_w + R_r * R_w + A_r * A_w + S_r * S_w + T_r * T_w + I_r * I_w + C_r * C_w$$

Donde el subíndice r corresponde con el valor seleccionado según la clasificación elaborada por Aller et al. (1987) y el subíndice w con el factor de ponderación. El cálculo fue realizado dos veces, uno para contaminantes no pesticidas y otro para pesticidas. Para la selección de la clasificación de cada factor, fue utilizada la propuesta por Aller et al. (1987) y otros trabajos como Voudouris et al. (2010), Lathamani et al. (2015), Ghazavi & Ebrahimi (2015), Moghaddam et al. (2018) Agüero & Pujol (2000) y Castro (2010), que fueron consultados como guía; en especial este último por ser una aplicación en un acuífero aluvial en Costa Rica.

La metodología hace una diferenciación entre el DRASTIC para cualquier contaminante y DRASTIC cuando el contaminante es un pesticida. La diferencia entre ambos métodos radica en el valor de los factores de ponderación de cada uno de 4 de los 7 factores hidrogeológicos, el tipo de suelo, la topografía, el impacto en la zona no saturada y la conductividad hidráulica (Aller et al., 1987).

Para esta investigación se procedió a la aplicación del método para ambos escenarios, cuando el contaminante es un pesticida y cuando no. Por esta razón se presentan dos mapas para los factores cuya ponderación varía según el contaminante y dos mapas finales (uno para cada escenario) para cada acuífero.

#### 1.7.7.1 Factores hidrogeológicos (DRASTIC)

##### 1.7.7.1.1 Profundidad del agua subterránea (D)

Corresponde con la profundidad del nivel estático, este fue determinado a partir de las líneas equipotenciales definidas utilizando el registro del monitoreo de niveles de los años 2017 y 2018. Esta información fue reclasificada según la Tabla 7 tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 7 Profundidad del agua (D)

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Clasificación <math>D_r</math></b>
0-1.5	10
1.5-4.6	9
4.6-9.1	7
9.1-15.2	5
15.2-22.9	3
22.9-30.5	2
> 30.5	1
<b>Ponderación</b>	
<b>Tipo de contaminante</b>	<b>Factor de ponderación <math>D_w</math></b>
Pesticida	5
No pesticida	5

A partir del producto de la clasificación  $D_r$  y el factor de ponderación  $D_w$  se tiene el mapa del primer factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 24).

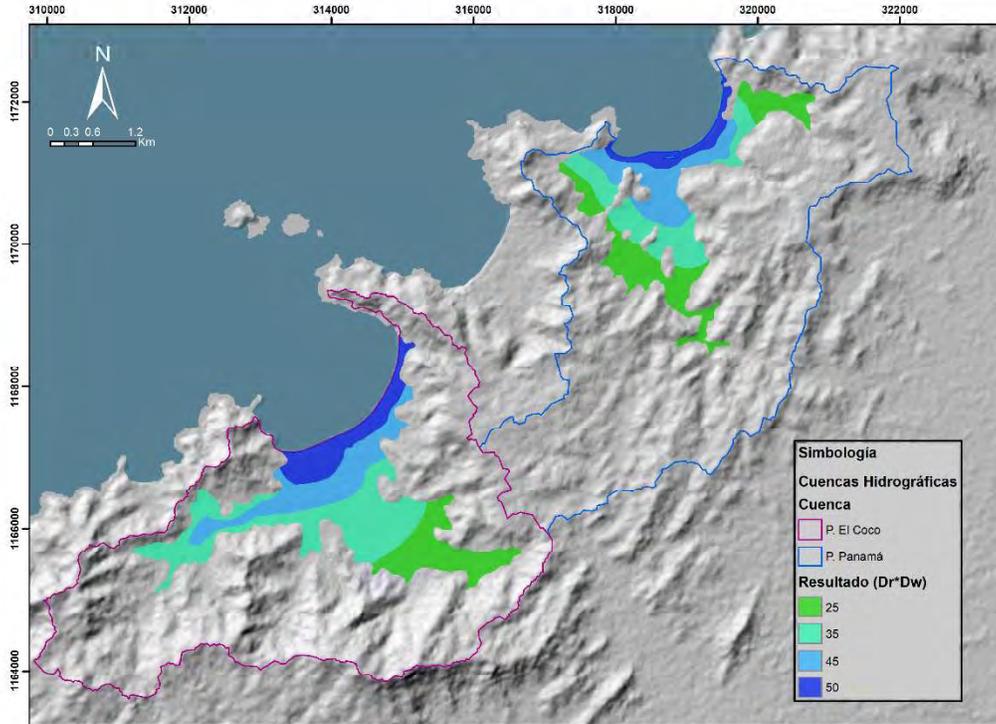


Figura 24 Mapa del factor hidrogeológico D

#### 1.7.7.1.2 Tasa de recarga (R)

Para la elaboración del segundo mapa, se reclasificó el mapa de recarga potencial anual calculado mediante la metodología de Schosinsky (2006), para la reclasificación se utilizó la Tabla 8 Recarga neta (R) tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 8 Recarga neta (R)

Recarga (mm)	Clasificación $R_r$
0-50	1
50-103	3
103-178	6
178-254	8
>254	9
Ponderación	
Tipo de contaminante	Factor de ponderación $R_w$
Pesticida	4
No pesticida	4

A partir del producto de la clasificación  $R_r$  y el factor de ponderación  $R_w$  se tiene el mapa del segundo factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 25).

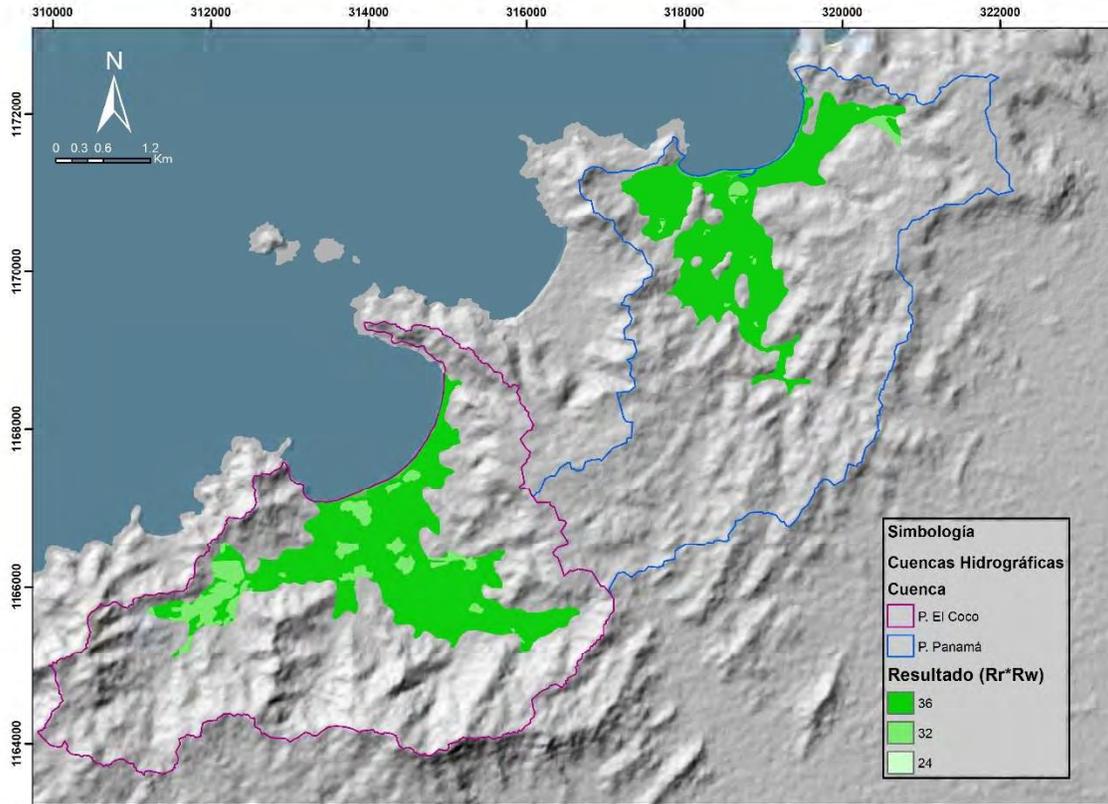


Figura 25 Mapa del factor hidrogeológico R

### 1.7.7.1.3 Tipo de acuífero (A)

Para la clasificación según el medio acuífero se utiliza la información disponible sobre las características litológicas de ambos depósitos recientes y se reclasifican según la Tabla 9 tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 9 Tipo de acuífero (A)

Tipo de acuífero	Rango de clasificación $A_r$	Valor típico $A_r$
Lutita masiva	1-3	2
Metamórfica/ígneas	2-5	3
Metamórfica/ígneas meteorizadas	3-5	4
Till glacial	4-6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5-9	6
Arenisca masiva	4-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Arena o grava	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Caliza kárstica	9-10	10
Ponderación		
Tipo	Ponderación $A_w$	
Pesticida	3	
No pesticida	3	

A partir del producto de la clasificación  $A_r$  y el factor de ponderación  $A_w$  se tiene el mapa del tercer factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 26).

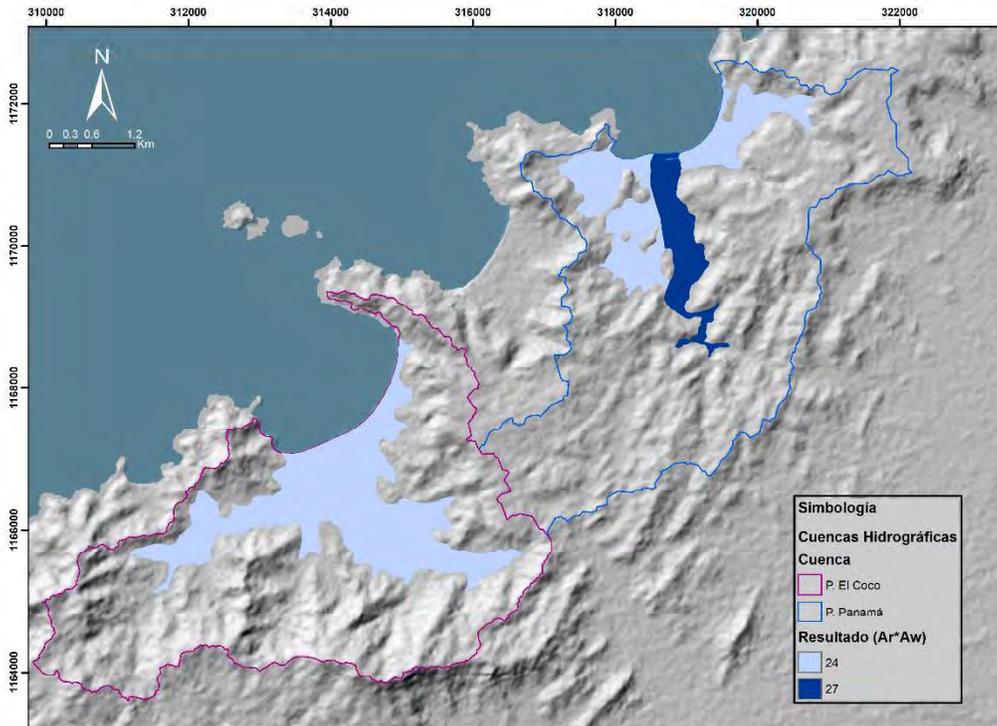


Figura 26 Mapa del factor hidrogeológico A

#### 1.7.7.1.4 Tipo de suelo (S)

Para la clasificación según el medio del suelo se utiliza la información disponible sobre las características litológicas de ambos depósitos recientes y se clasifican según la Tabla 10 tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 10 Tipo de suelo (S)

Tipo de suelo	Clasificación $S_r$
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiercol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1
Ponderación	
Tipo de contaminante	Factor de ponderación $S_w$
Pesticida	5
No pesticida	2

A partir del producto de la clasificación  $S_r$  y el factor de ponderación  $S_w$  se tiene el mapa del cuarto factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 27 y Figura 28).

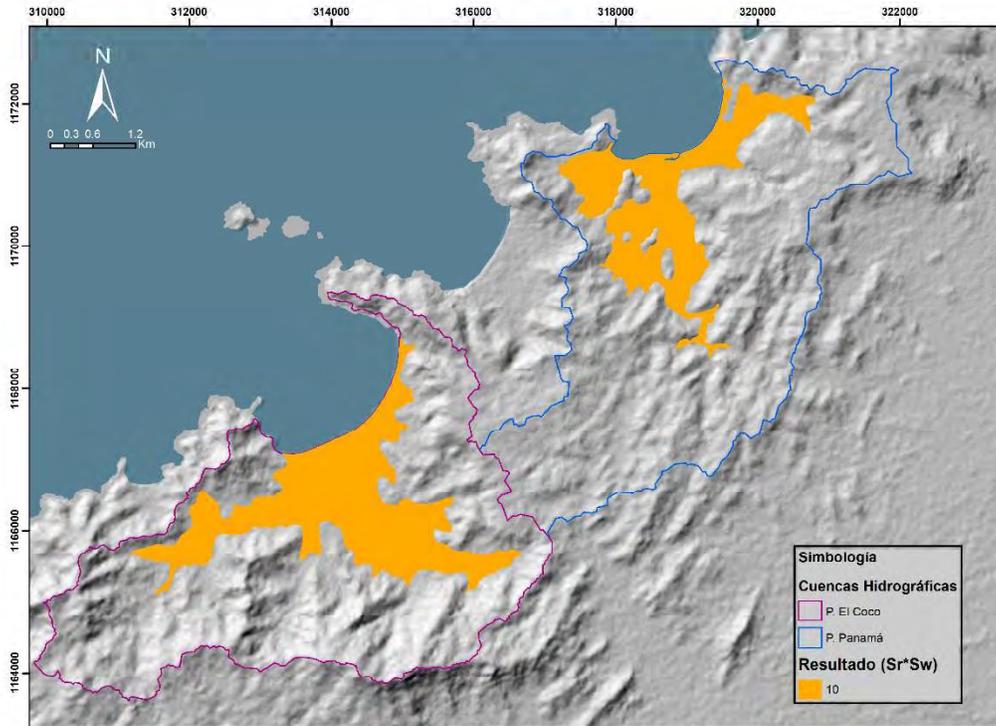


Figura 27 Mapa del factor hidrogeológico S

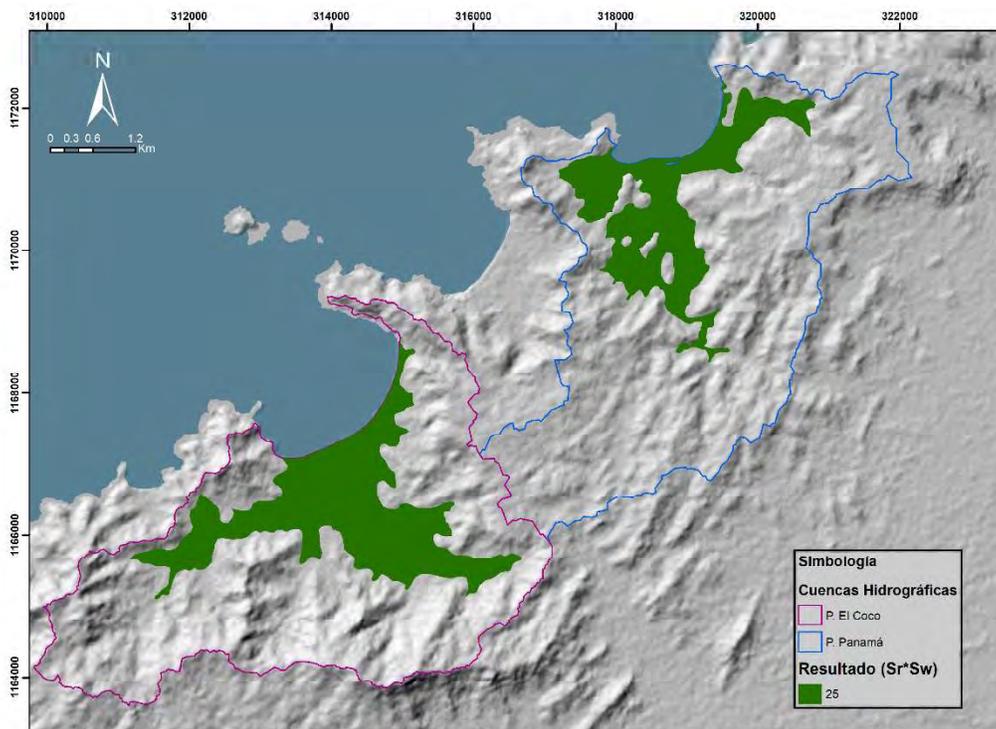


Figura 28 Mapa del factor hidrogeológico S para pesticidas

### 1.7.7.1.5 Topografía (T)

Para la clasificación según la pendiente del terreno se reclasificó el mapa de pendientes elaborado para el cálculo de la recarga potencial, para esto se utilizó la Tabla 11 tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 11 Topografía (T)

Pendiente (%)	Clasificación $T_r$
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Ponderación	
Tipo	Factor de ponderación $T_w$
Pesticida	3
No pesticida	1

A partir del producto de la clasificación  $T_r$  y el factor de ponderación  $T_w$  se tiene el mapa del quinto factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 29 y Figura 30).

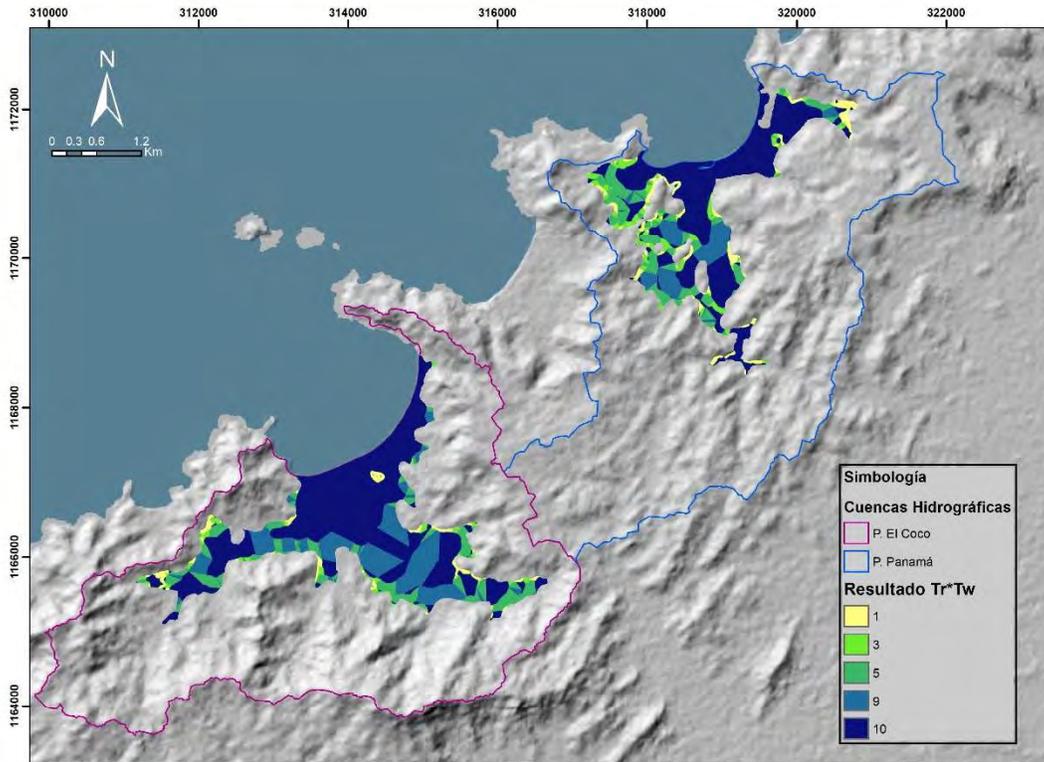


Figura 29 Mapa del factor hidrogeológico T

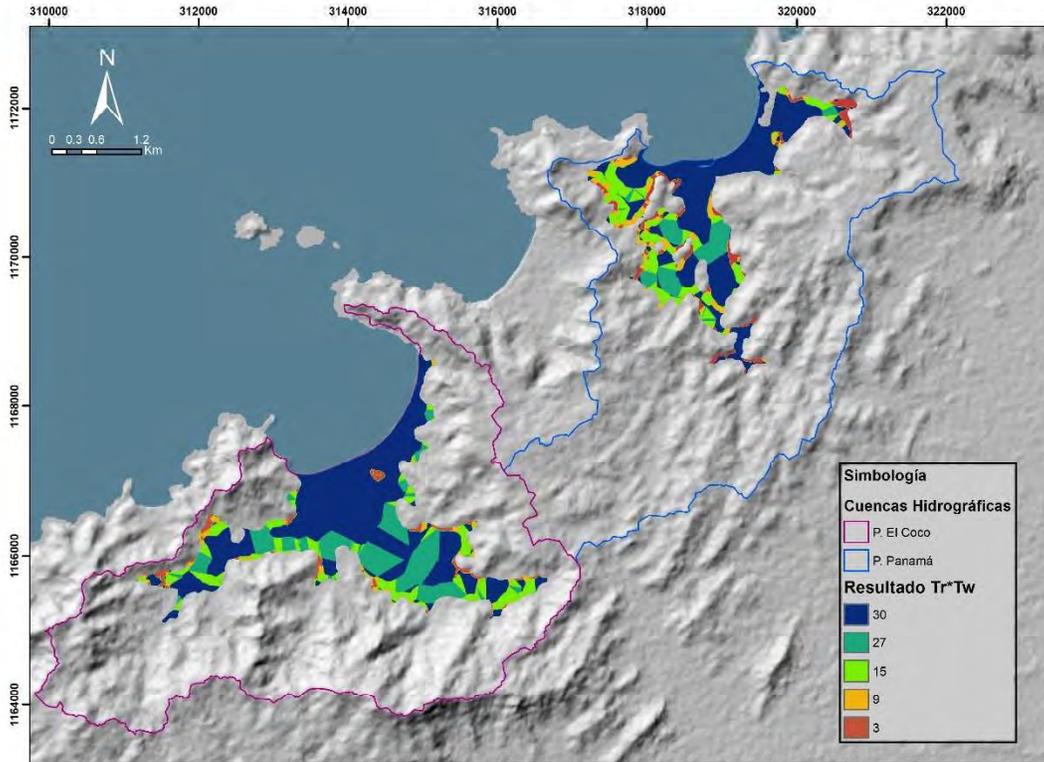


Figura 30 Mapa del factor hidrogeológico T para pesticidas

#### 1.7.7.1.6 Impacto en la zona no saturada (I)

Para la clasificación de la zona no saturada se utilizaron como base la información disponible sobre las características litológicas de ambos depósitos recientes y se según la Tabla 12 tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 12 Impacto de la zona no saturada (I)

Tipo de medio	Rango de clasificación $I_r$	Valor típico $I_r$
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4-8	6
Arena o grava con contenido de ciero y arcilla significativo	4-8	6
Metamórfica/Ígnea	2-8	4
Arena y Grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	8-10	10
<b>Ponderación</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Ponderación <math>I_w</math></b>	
Pesticida	4	
No pesticida	5	

A partir del producto de la clasificación  $I_r$  y el factor de ponderación  $I_w$ , se tiene el mapa del sexto factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 31 y Figura 32).

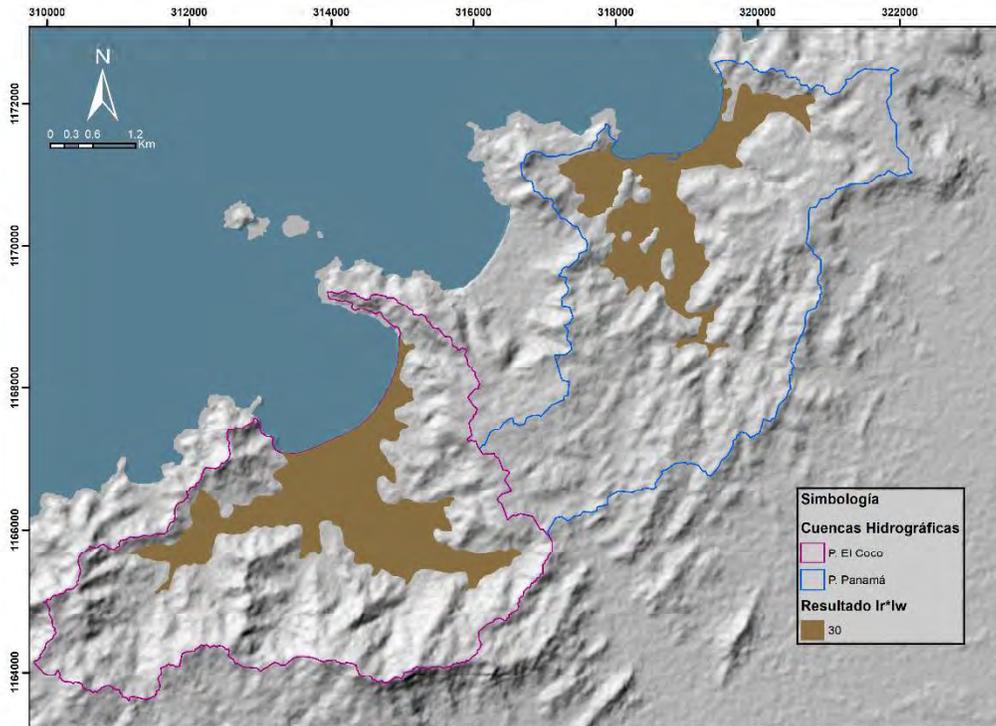


Figura 31 Mapa del factor hidrogeológico I

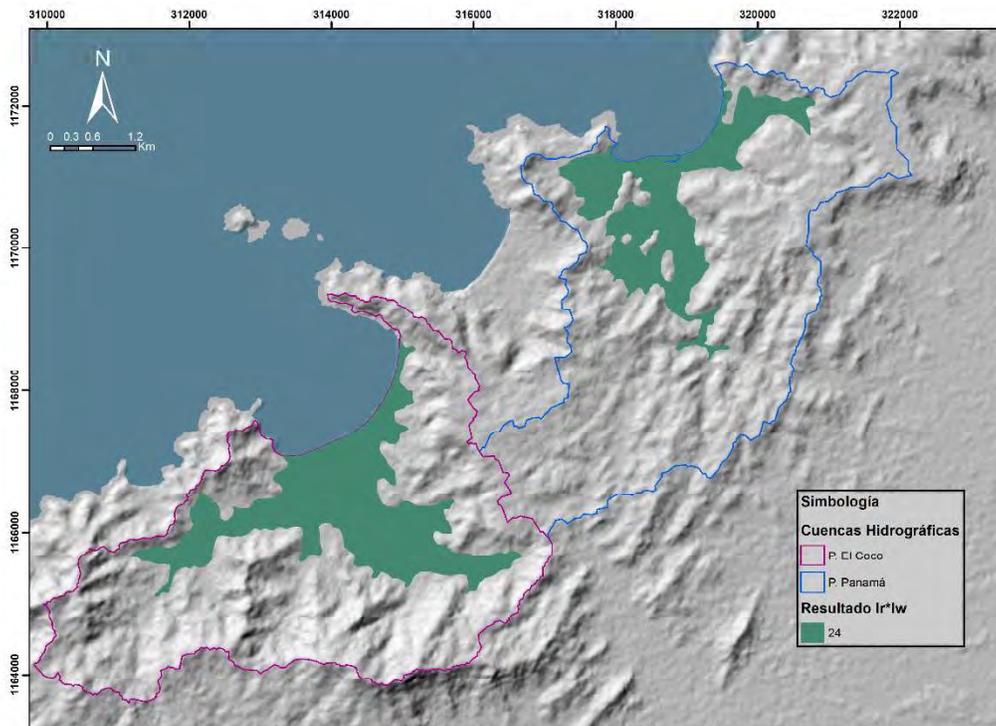


Figura 32 Mapa del factor hidrogeológico I para pesticidas

### 1.7.7.1.7 Conductividad hidráulica (C)

Para la elaboración del último mapa, se utilizó los cálculos de conductividad hidráulica realizados por Murillo (2007) y Gómez (2005), complementados con los cálculos realizados en los pozos donde se aplicó la metodología de la eficiencia Marea y el retraso marea.

Posteriormente, se realizó una interpolación mediante el método Inverse Distance Weighting ya que fue el que generó resultados más congruentes con la disposición de los materiales geológicos. Por último este resultado fue usando la Tabla 13 tomada de Agüero & Pujol (2000).

Tabla 13 Conductividad hidráulica (C)

K (m/día)	Clasificación $C_r$
0.04-4.08	1
4.08-12.22	2
12.22-28.55	3
28.52-40.75	6
40.75-81.49	8
>81.49	10
Ponderación	
Tipo	Factor de ponderación $C_w$
Pesticida	2
No pesticida	3

A partir del producto de la clasificación  $C_r$  y el factor de ponderación  $C_w$  se tiene el mapa del séptimo factor hidrogeológico del método para ambas cuencas (Ver Figura 33 y Figura 34).

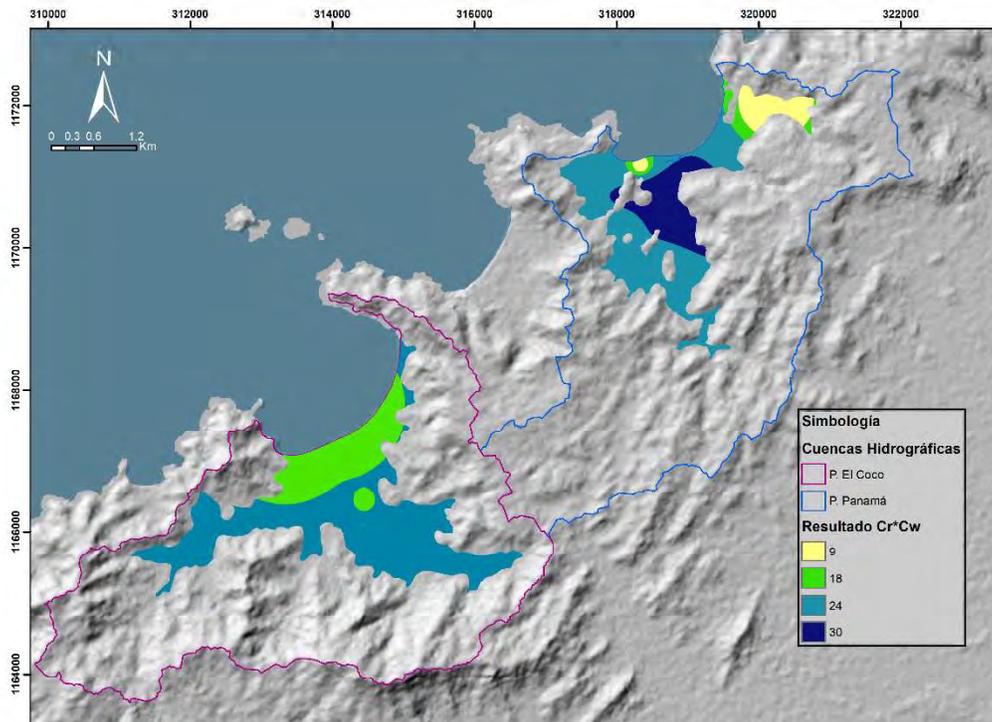


Figura 33 Mapa del factor hidrogeológico C

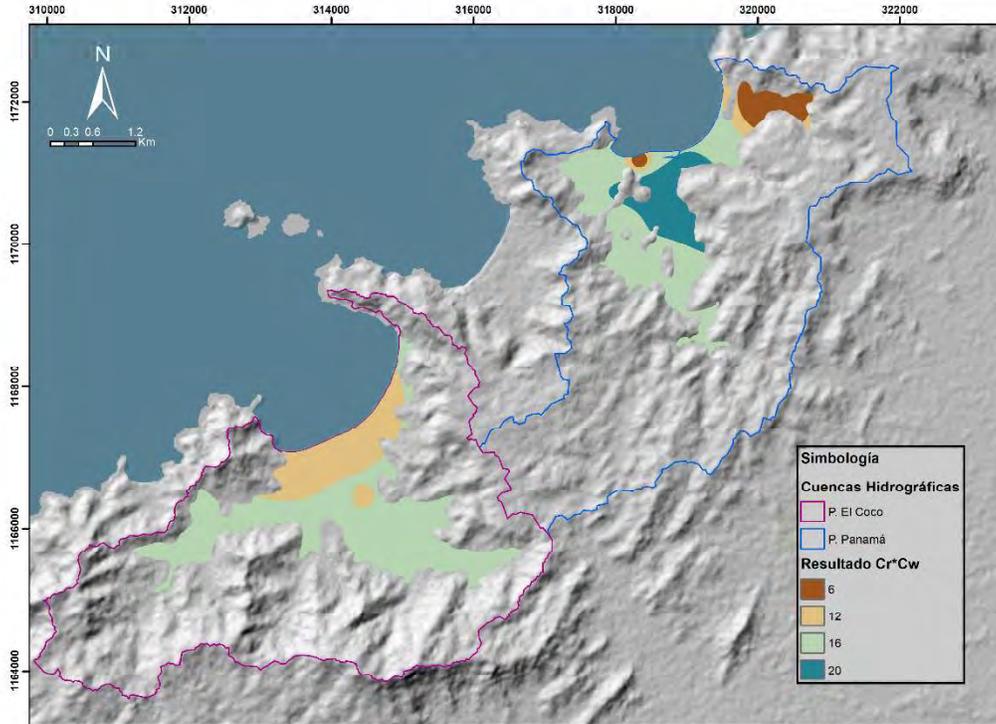


Figura 34 Mapa del factor hidrogeológico C para pesticidas

Por último, se procedió a realizar la sumatoria de mapas. Se generaron 2 mapas de vulnerabilidad para cada acuífero, uno para contaminantes no pesticidas y otro para pesticidas. Estos fueron analizados junto con el uso del suelo actual y los resultados obtenidos en la determinación de calidad de agua, con el fin de identificar correlaciones y validar el resultado obtenido.

#### 1.7.7.1.8 Índice DRASTIC

Como se mencionó anteriormente, Aller et al. (1987), autores de esta metodología definieron este índice y su valor numérico con el fin de generar una diferenciación de zonas dentro de los sistemas acuíferos evaluados y también como un parámetro de comparación entre acuíferos de una misma localidad o de regiones diferentes cuyas condiciones presentan cierta similitud. Por lo anterior, no se cuenta con una clasificación estándar de este índice.

Para definir la clasificación del resultado del índice DRASTIC se analizó la distribución y comportamiento de los resultados de la aplicación del método en ambos acuíferos en estudio. Además, se utilizó como referencia clasificaciones utilizadas por otros autores en acuíferos costeros y porosos.

Tabla 14 Clasificación del índice de vulnerabilidad DRASTIC

Grado de vulnerabilidad	Autor			
	(Ducci & Sellerino, 2013)	(Zghibi et al., 2016)	(Castro, 2010)	Esta Investigación
Muy baja	<85	-	23-64	-
Baja	85-115	<80	65-105	-
Media	116-162	80-120	106-146	99-140
Alta	163-193	120-160	147-187	141-180
Muy alta	>193	160-200	188-230	>181

### 1.7.8 Variación temporal y correlación entre variables

Para analizar la variación temporal de los niveles y calidad del agua en los pozos, se utilizaron 5 fuentes de información. Los datos disponibles en el expediente de cada pozo (tomando en consideración la fecha en que fueron registrados), las mediciones que realizaron los autores de los estudios hidrogeológicos previos, el registro del monitoreo mensual que realiza la Dirección de Agua del MINAE en los pozos del área de manera manual utilizando una sonda piezométrica, las mediciones manuales que se realizaron en los pozos durante la campaña de muestreo y el registro del monitoreo a tiempo real del proyecto SIMASTIR.

Este último funciona utilizando registradores de datos. Estos son sensores que, dependiendo del modelo, registran de manera automática temperatura de conductividad, salinidad, resistividad y mediciones de presión. A partir de este último se calcula la altura del agua en el pozo y genera el resultado tomando el nivel del suelo como referencia, es decir, metros bajo el nivel del suelo. Estos registros quedan almacenados en la memoria del sensor como respaldo y también son transmitidos y almacenados en la nube, de tal manera que se pueden descargar por internet sin necesidad de ir al pozo monitoreado (ver Figura 35).

Los sensores utilizados son de la marca In Situ están configurados para tomar mediciones horarias, se trabajó con datos del periodo 2016-2019. Por lo tanto, se contó con gran cantidad de mediciones de diferentes parámetros como presión, temperatura, conductividad, entre otros. Por esta razón, el análisis de los datos fue realizado en diferentes escalas temporales, utilizando estadística descriptiva como la correlación bivariante y multivariante, como gráficos, medidas de tendencia central y otros.

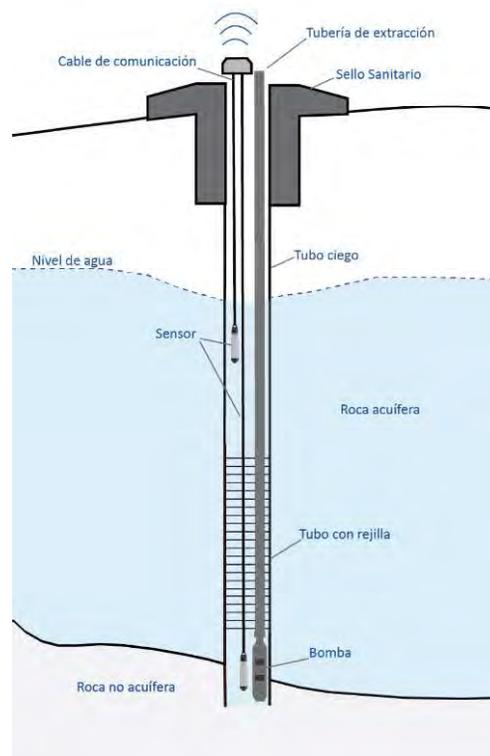


Figura 35 Esquema de un pozo monitoreado con sensores

Además las series temporales fueron analizadas utilizando la media móvil como método de tratamiento y filtrado de los datos cuando fue necesario. Por último, se utilizó la correlación cruzada entre variables para determinar la posible relación entre ellas.

La correlación cruzada entre dos series asume que ambas sean estacionarias, es decir, que sus medias y varianzas sean independientes del tiempo (Guevara, 2014). El autor recomienda realizar la verificación del cumplimiento de este requisito, ya que en caso de no cumplirse el resultado puede producir relaciones espurias e inducir a error al investigador. Esta verificación se realizó analizando el comportamiento y distribución de los datos en diferentes escalas de tiempo con el fin de identificar comportamientos estacionarios y así poder hacer el análisis de correlación cruzada.

La aplicación del método para la correlación entre la marea, el nivel, temperatura y conductividad se vio limitada debido a las condiciones propias de cada pozo dentro de las cuales destacan la tendencia general de la serie (no estacionaria), ubicación, tipo de pozo (artesanal o perforado), tipo de sensor instalado y el ruido presente en la serie de datos de cada variable.

Para analizar posibles variaciones en otros aspectos como la dirección de flujo, balances hídricos, la recarga, el uso de la tierra y la calidad de agua se procedió a comparar los resultados de esta investigación con la información preexistente.

## 1.8 Limitaciones

El modelo hidrogeológico conceptual depende en gran medida de la información base, a pesar de que ambos acuíferos poseen líneas base robustas, la distribución y representatividad espacial de los pozos, puntos de monitoreo de niveles, muestreos de suelo, pruebas de bombeo, entre otros; no son ideales y limitan el modelo hidrogeológico conceptual resultante.

A pesar de contar con acceso a la base de expedientes de pozos oficial, no todos cuentan con informes de perforación con toda la información solicitada, poseen descripciones litológicas deficientes, sin descripción del comportamiento del nivel de agua durante la perforación, con coordenadas erróneas o sin información sobre el diseño de armado del pozo.

El trabajo de campo se vio limitado debido a la disponibilidad de recursos, por lo tanto no fue posible realizar piezómetros de investigación, auscultación de pozos, aforos, pruebas de bombeo o muestreos de suelo adicionales que permitieran detallar más el modelo.

Durante la campaña de medición de niveles y muestreo de agua subterránea, por dificultad de acceso, abandono de los pozos o la imposibilidad de introducir la sonda y el bailer, no fue posible contar con datos de todos los sitios preseleccionados en la red de muestreo elaborada durante el trabajo previo de gabinete. Lo anterior limitó la idoneidad de la distribución de los puntos de muestreo.

La representatividad de los resultados de los análisis químicos para determinar la calidad del agua puede estar afectada por las condiciones en que fueron recolectadas las muestras ya que al momento de la recolección los pozos no fue posible purgar completamente los pozos, otros no estaban en producción y otros se encontraban abandonados.

La estación meteorológica más cercana con un resumen histórico completo se encuentra fuera de ambas cuencas en estudio. Esta corresponde con la estación ubicada en el Aeropuerto Daniel Oduber, ubicada a 10 km de la cuenca del acuífero Playa Panamá y a 15 de la cuenca del acuífero El Coco.

Los sensores de monitoreo automáticos no generan datos con un formato automático que permita su análisis inmediato. Fue necesario trabajar la base de datos, uniformizar los formatos y revisar errores de medición manualmente. Debido a la alta frecuencia de medición, esto es un proceso que requiere gran cantidad de tiempo.

La discontinuidad de los datos de los sensores de monitoreo automático de niveles durante los años 2016, 2018 y 2019 impidió realizar el cálculo de la recarga real utilizando la metodología utilizada para el año 2017. Por lo tanto no se tienen puntos de comparación, imposibilitando analizar posibles variaciones en la recarga de los acuíferos durante ese periodo de 4 años.

## 2 Climatología

El clima de la región se caracteriza por ser subhúmedo seco, muy caliente, con exceso moderado de agua (IMN, 2017). Para la presente investigación se utiliza la estación meteorológica Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quesada número 74051 perteneciente al IMN. Esta cuenta con un registro de valores de precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, radiación y presión, desde 1999 hasta el día de realización de esta investigación. El IMN también cuenta con otra estación meteorológica cercana al área de estudio, número 74081 ubicada en la ASADA de Sardinal, esta cuenta únicamente con un registro de precipitación y temperatura a partir del año 2016.

### 2.1.1 Precipitación

La precipitación promedio anual del período 1999-2017 es de 1566 mm. Se distinguen dos épocas durante el año: la época seca, desde diciembre hasta abril, este último se considera como un mes de transición, y la época lluviosa, de mayo a noviembre, los meses con mayor cantidad de lluvia son septiembre y octubre (Ver Figura 36).

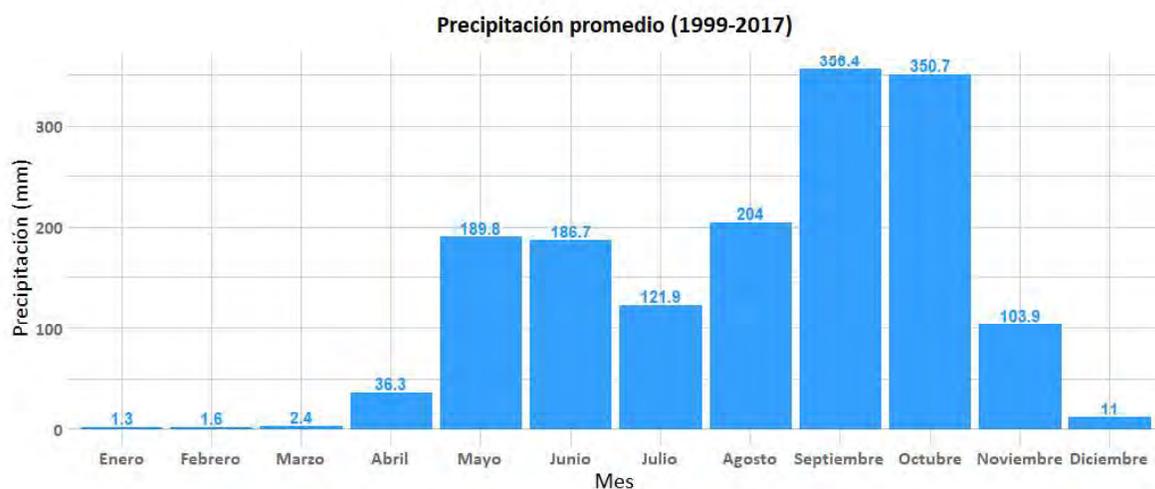


Figura 36 Promedio de precipitación mensual histórico ( 1999-2017)

Entre los años 2010 y 2018, tres años presentaron una precipitación anual superior al promedio histórico del área, y 6 una cantidad inferior, estas variaciones están directamente relacionadas a los efectos de los eventos climáticos extremos.

Según el Boletín ENOS (IMN), durante los años 2012, 2014 y 2015 fue declarada la ocurrencia del evento climático extremo El Niño, el cual produce disminuciones de 26% en la precipitación anual en el Pacífico Norte (IMN, 2008). Su opuesto, el fenómeno La Niña, es capaz de generar aumentos de precipitación de 46% en el Pacífico Norte (IMN, 2008), este ocurrió en los años 2010, 2011, 2016 y 2017. Durante enero y febrero 2018 ocurrió la fase final de El Niño e inició un periodo de transición a El Niño que finalizó con la llegada del fenómeno en el mes de diciembre. El año 2013 fue un año neutro en el cual no ocurrió ninguno de estos eventos climáticos extremos.

Como se observa en la Figura 37, el año con mayor precipitación fue el año 2017 con un total de 2007.9 mm, y el año de menor cantidad fue el 2015, con tan solo 714.9 mm, correspondiente al 45% del promedio histórico. Además, la relación inversa y directa entre la temperatura promedio anual con la precipitación (índice de correlación= -0.84).

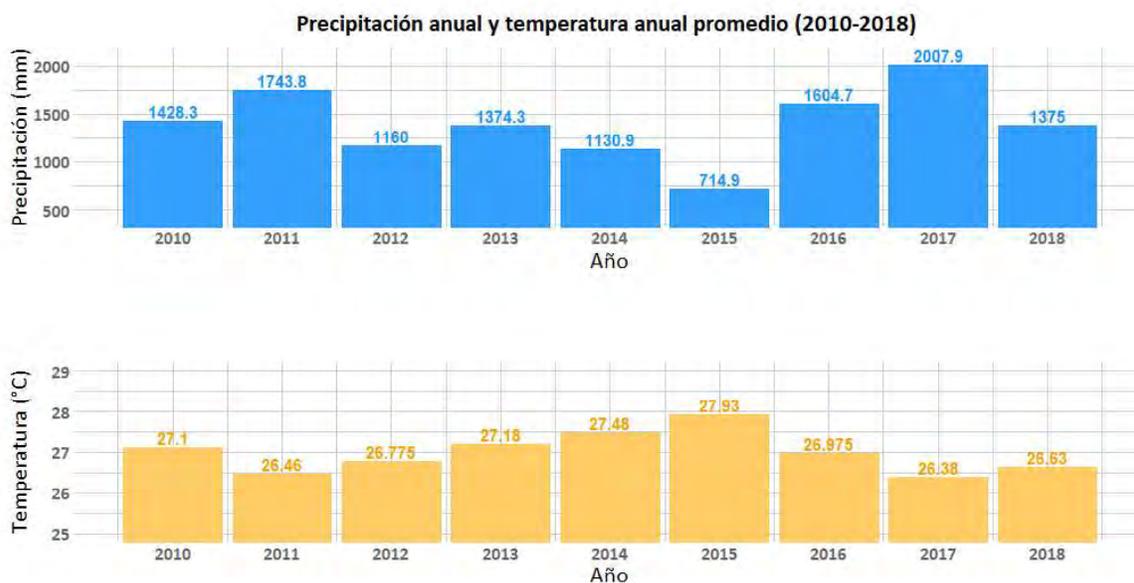


Figura 37 Variación temporal de la precipitación anual (mm) y temperatura promedio anual (°C) para el periodo 2010-2018.

### 2.1.2 Temperatura y Humedad relativa

La temperatura promedio anual del período 1999-2017 es de 27.6 °C, la temperatura mínima promedio es de 22.1 °C y la máxima 33 °C. En cuanto a la humedad relativa, los meses de la época lluviosa son los meses con mayor humedad (Ver Figura 38).

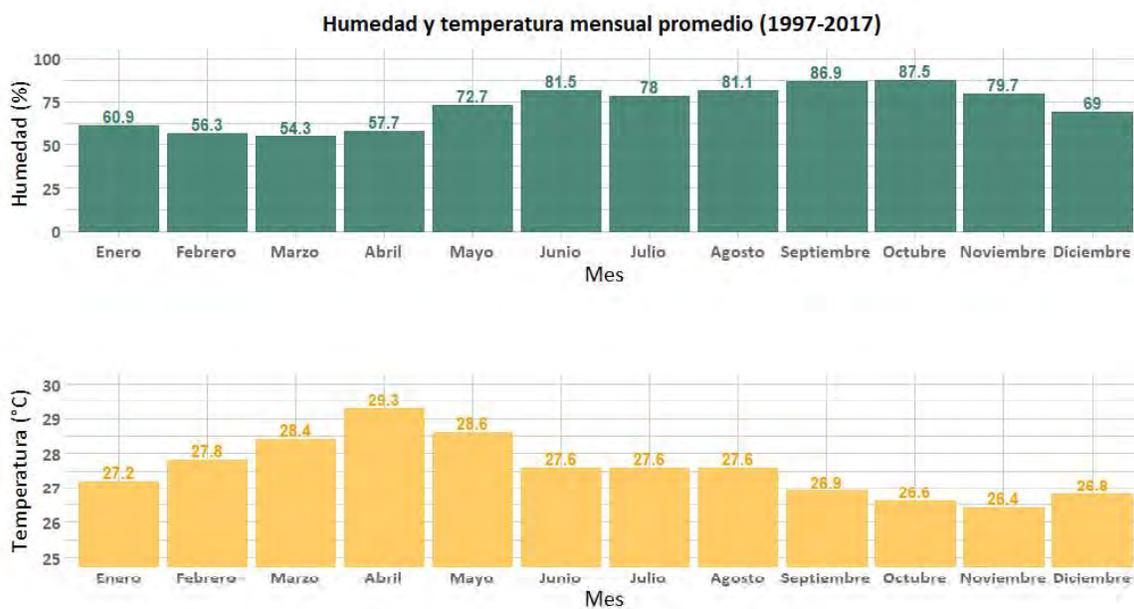


Figura 38 Temperatura (°C) y Humedad Promedio(%) para el periodo 1999-2017.

### 2.1.3 Velocidad de Viento y Radiación

Según los datos de la estación 74051 del IMN, la dirección del viento es predominantemente hacia el Este, con velocidades promedio anuales para el período 1999-2017 de 12.8 km/h. Durante la época seca se presentan las mayores velocidades, especialmente en enero y febrero.

La radiación solar anual promedio del período 1999-2017 es de 17.3 Megajulios (MJ/m<sup>2</sup>), al igual que la velocidad del viento, los meses con mayor radiación solar son los pertenecientes a la época seca.

### 2.1.4 Evapotranspiración Potencial (ETP)

Como se menciona en ONU (1972), actualmente existen diversos de métodos o fórmulas empíricas para el cálculo de la evapotranspiración potencial, que utilizan factores climáticos como la temperatura, humedad relativa, viento, radiación solar, entre otros.

#### 2.1.4.1 Blaney & Criddle

Schosinsky (2006) en su metodología para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos, deja a elección del usuario la escogencia del método que desea utilizar para su cálculo, sin embargo, él utiliza la fórmula de Blaney & Criddle ya que únicamente requiere la temperatura media mensual y este, dato se registra en la mayoría de las estaciones meteorológicas. La fórmula es la siguiente:

$$ETP = (8.1 + 0.46T)Ps$$

ETP= Evapotranspiración potencial (mm/mes)

T= Temperatura media mensual (°C)

Ps= Porcentaje de horas de luz solar mensual respecto al año (%)

Esta se aplica en esta investigación utilizando los valores de Ps recomendados por Schosinsky (2006). Para la Temperatura media mensual se utilizan los valores mensuales promedio del año 1999-2017 de la estación meteorológica del aeropuerto Daniel Oduber.

#### 2.1.4.2 Hargreaves & Samani

La fórmula de Hargreaves & Samani (1985) también es constantemente utilizada en el país, esta requiere datos de temperatura media, mínima y máxima mensual y de radiación extraterrestre al tope de la atmósfera.

$$ETP = (K * RA * \sqrt{[\Delta T]}) * (0.0075) * (32 + 1.8 * Tm) * n)$$

K= Constante para climas húmedos (0.17)

RA= Radiación Extraterrestre al tope de la atmósfera (mm/día)

$\Delta T$ = Diferencia entre la temperatura máxima y mínima promedio mensual (°C)

Tm= Temperatura media (°C)

n= Cantidad de días del mes

Esta es aplicada utilizando la radiación extraterrestre diaria, sugerida por Allen (2006) para Latitud 10° en el hemisferio norte, y los promedios de temperaturas del período 1999-2017 de la estación aeropuerto Daniel Oduber.

#### 2.1.4.3 Fao Penman-Monteith

El método FAO Penman-Monteith es el único recomendado oficialmente por la ONU para el cálculo de la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos. Este requiere datos de radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento (Allen, 2006). Además de la FAO, existen otros autores como Jung, Lee, & Moon (2016) que recomiendan este método siempre y cuando se cuente con la información necesaria para aplicarlo.

Se utiliza el software CROPWAT 8.0 desarrollado por departamento de Tierras y Aguas de la FAO, que, entre otras cosas, permite calcular la ETP mediante el método de FAO Penman-Monteith de manera automática (Ver Figura 39).

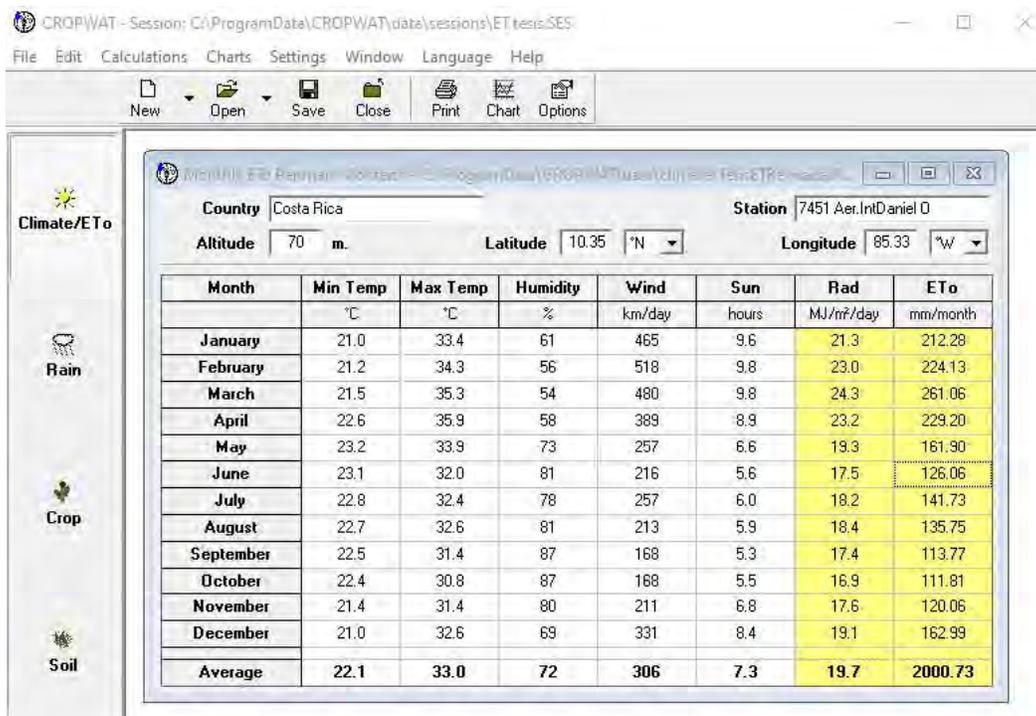


Figura 39 Software CROPWAT 8.0, cálculo de ETP

Como se observa en la Figura 40, la metodología de Blaney & Criddle presenta los resultados con menor variación a lo largo del año en comparación con las otras.

Durante la época lluviosa, la ecuación de Hargreaves & Samani presenta resultados similares pero mayores a los de la ecuación de FAO Penman-Monteith. En los meses de la época seca, subestima el valor de manera considerable. Esto coincide con lo dicho por Allen (2006) y con los resultados de Alvarado (2018), donde se observa que, en condiciones de viento fuertes, la metodología tiende a subestimar la ETP y a sobreestimarla en condiciones de elevada humedad relativa.

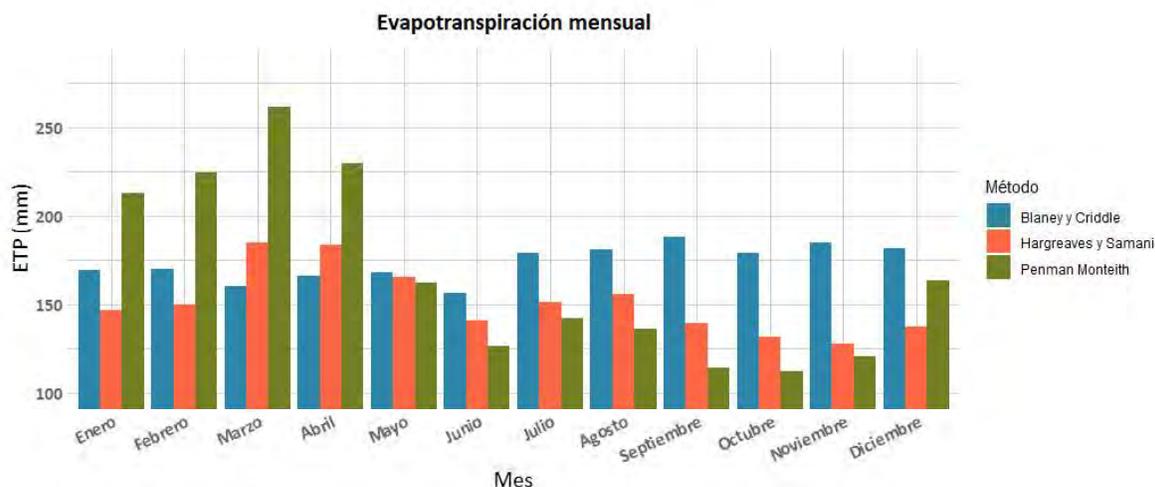


Figura 40 Comparación de métodos disponibles para el cálculo de ETP mensual

## 3 Contexto Geológico

Se identifican 12 unidades geológicas presentes en el área de interés, tres corresponden con depósitos sedimentarios recientes, cuatro de unidades de depósitos volcánicos edad plio-pleistoceno y cuatro unidades asociadas a la corteza oceánica que conforman el basamento (ver Figura 41).

### 3.1.1 Complejo de Nicoya (Kn)

#### 3.1.1.1 Basaltos (JK-CN):

Descritos por Denyer et al. (2014) como flujos masivos de basaltos que suelen estar fracturados y presentan vetillas de zeolita y algunas de sílice. Estos, según los autores pueden observarse también en almohadillas y microalmohadillas, corresponden con el basamento de la región. Hoernle, Hauff, & Van Den Boogard (2004) a partir de dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  determinan que son del Cretácico Superior. Considerando la génesis descrita por Madrigal, Gazel, & Denyer (2019), en la cual se asocia procesos magmáticos y fragmentos acrecionados de grandes provincias ígneas (Large Igneous Provinces), su espesor podría alcanzar decenas de kilómetros.

#### 3.1.1.2 Radiolaritas (JK-CNr):

Rocas sedimentarias pelágicas estratificadas de grano fino a muy fino, con coloraciones rojizas hasta negras (Denyer et al., 2014). Según Denyer & Baumgartner (2006) estas fueron emplazadas durante la formación de las masas ígneas del basamento, que disgregó los sedimentos pelágicos provocando que estas, debido a su menor densidad, flotarán inmersas en el magma dando lugar a procesos de recristalización. Los autores determinan, a partir de biocronología, una edad de Jurásico Superior a Cretácico Inferior.

#### 3.1.1.3 Intrusivo Potrero (K-lp):

Denyer & Arias (1993) lo describen como un cuerpo intrusivo compuesto por gabros, microgabros y doleritas. Este intruye los basaltos y radiolaritas de Nicoya (basamento regional). Según Sinton, Duncan, & Denyer, (1997) son de edad Cretácico Superior.

#### 3.1.1.4 Plagiogranito Ocotál (K-Po):

Corresponde con un intrusivo de tipo plagiogranito, blancuzco rico en cuarzo, feldespatos y minerales máficos, según Denyer et al. (2014) estos gradúan transicionalmente al Intrusivo Potrero (Denyer et al., 2014). Son de edad Cretácico Superior (G. Alvarado & Gans, 2012).

### 3.1.2 Formación Bagaces

Consiste principalmente en varios pulsos eruptivos de depósitos de ignimbritas, en su mayoría soldadas a medianamente soldadas, incluso unas sin soldamiento; además, se encuentra intercalada por depósitos sedimentarios continentales, estuarinos y cuerpos de lava esporádicos (Denyer & Alvarado, 2019).

Recientemente Barrantes (2018), Denyer & Alvarado (2019) y Solano (2018) han detallado la estratigrafía y descripción de los diversos miembros pertenecientes a esta formación. Solano (2018) las describe petrográficamente según criterios composicionales como contenido de cristaloclastos (principalmente plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y opacos), litoclastos y vitroclastos. Esta formación cubre alrededor de 794 km<sup>2</sup> en la región (Denyer & Alvarado, 2019). Alvarado & Gans (2012) determinan que su edad varía entre 3.21 y 2 Ma.

Según Denyer et al. (2019) en esta localidad se encuentran 3 unidades aflorantes, Toba Santa Rosa, Casona y Río Colorado.

#### 3.1.2.1 Toba Santa Rosa (Np-Bsr)

Ignimbrita parcialmente soldada y bien soldada en su parte inferior, pobremente seleccionada con gradación inversa en las pómez (Denyer & Alvarado, 2019). Solano (2018) la describe como una toba gris violácea de tonos rosados en la cual identifica litofacies masivas y una rica en pómez. El autor establece que la litofacies rica en

pómez presenta sus mayores espesores al oeste de Liberia y lo asocia a la facies distal del evento piroclástico, además, reporta un máximo espesor observado de 24.84 m y las clasifica como ignimbritas por su alto contenido de pómez.

Petrográficamente varía entre tobas vítreas y cristalinas, además, se distinguen cristaloclastos de clinopiroxeno, ortopiroxenos, apatito y pumíticos hialinos como vitroclasto principal (Solano et al., 2019).

Denyer & Alvarado (2019) establecen que esta sobreyace inconformemente con paleorelieve al Complejo de Nicoya y sobreyace capas epivolcaniclásticas, subyace las tobas La Casona y Río Colorado.

#### 3.1.2.2 Toba La Casona (QN-Blc)

Ignimbrita gris a negruzca a café oscura, pobremente seleccionada, con sectores no soldados a parcialmente soldados con escorias, vesículas, fiammes, líticos de basaltos y andesíticas con gradación normal (Denyer & Alvarado, 2019). Solano (2018) describe dos depósitos de flujo de pómez y líticos, el inferior posee valores bajo de soldamiento y el superior posee una base soldada. Posee un máximo espesor reportado de 40.85 m. El autor las clasifica como ignimbritas debido a su alto contenido de fragmentos de pómez e identifica un enfriamiento uniforme en toda la unidad con soldamiento en la sección superior.

Petrográficamente varía en el rango de tobas vítreas y sus componentes distintivos son cristales de clinopiroxeno, ortopiroxeno, apatito y escoria hialina (Solano et al., 2019).

Denyer & Alvarado (2019) establecen que esta sobreyace inconformemente con paleorelieve al Complejo de Nicoya y capas epivolcaniclásticas, y subyace las tobas Río Colorado (Solano, 2018).

#### 3.1.2.3 Toba Río Colorado (Q-Brc)

En los alrededores de Papagayo, esta se presenta de color gris oscuro con textura escoriácea y líticos de lavas alteradas e indiferenciados de tamaños centimétricos, fiammes centimétricos ricos en cristales de plagioclasa en una matriz vitrocrystalina parda amarillenta (Denyer & Alvarado, 2019). Solano (2018) la describe como una toba gris violácea y se separa en dos depósitos de corrientes de densidad piroclástica litológicamente similares, ambos poseen litofacies masivas y una rica en pómez. Posee un máximo espesor reportado de 56.23 m. Según el autor, ambos depósitos se clasifican como ignimbritas con evidencias de un proceso de enfriamiento homogéneo.

Petrográficamente se clasifica como una toba vítrea y se reconocen accesorios de clinopiroxeno y apatito, vitroclastos de pumíticos y escoria hialina (Solano et al., 2019).

Sobreyace por inconformidad al Complejo de Nicoya (Denyer & Alvarado, 2019). También en esta localidad sobreyace las tobas Santa Rosa y La Casona (Solano, 2018).

#### 3.1.3 Depósitos Epivolcaniclásticos (NQ-de)

Localmente, corresponden con depósitos de arenas litocristalinas y vidriosas, con clastos de pómez y escorias contactos planares, acuñados, con estructuras de erosión y relleno, al igual que niveles de conglomerados mal seleccionados y polimícticos (lahares) (Denyer & Alvarado, 2019). Los autores identifican un endurecimiento en la base de estos depósitos y una base de arcillas amarillentas y grises con pómez intercaladas, arenas volcánicas grises y calcos de troncos.

La sedimentación volcánica aparte de destruir la vegetación modifica la red de drenaje y acelera los procesos de erosión, transporte y sedimentación, creando este tipo de depósitos intercalados entre los depósitos volcánicos primarios (Barrantes, 2018). Estos, se encuentran intercalados entre los diversos miembros de la Formación Bagaces y se correlacionan con depósitos aluviales, fluviales antiguos y de edad Plioceno Temprano (Denyer & Alvarado, 2019). Localmente se encuentran sobreyaciendo el Complejo de Nicoya y subyacen la Toba Santa Rosa (Denyer et al., 2019).

#### 3.1.4 Depósitos Aluviales, Coluviales y de Playa Arenosa (Qal, Qc, Qp)

Denyer et al. (2014) caracterizan los depósitos aluviales ubicados en esta zona como los de mayor espesor en la península, donde se pueden encontrar zonas con espesores superiores a 30 m. Arellano & Vargas (2001), mencionan que generalmente están formados por gravas y arenas muy permeables.

En cuanto a los depósitos coluviales y de playa arenosa, Denyer et al. (2014) y Denyer et al. (2019) identifican este tipo de depósitos recientes en el área de estudio.

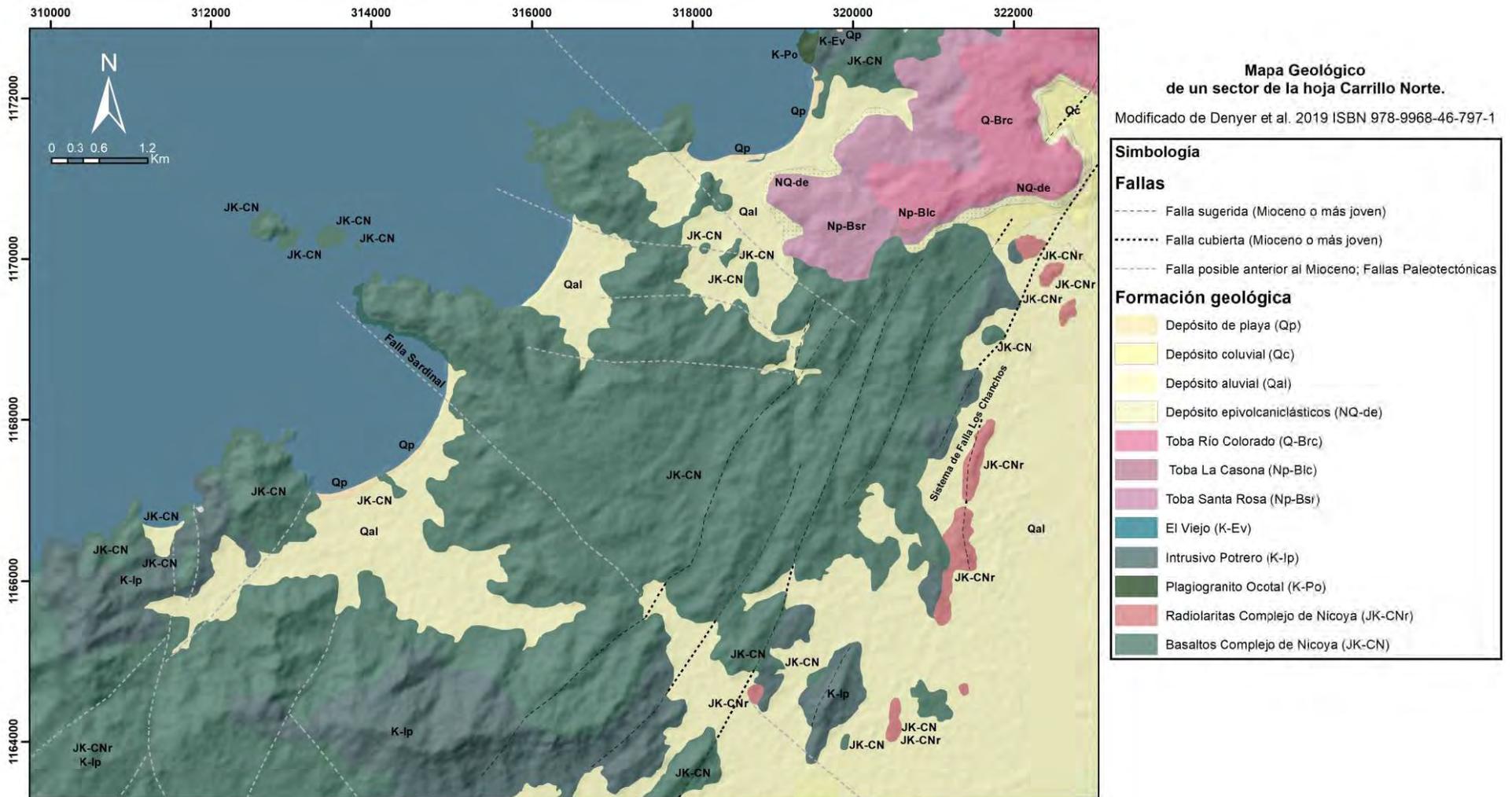


Figura 41 Mapa geológico de un sector de la hoja Carrillo Norte

## 4 Contexto Geomorfológico

Se identifican 8 unidades geomorfológicas en el área de interés, cuatro de ellas producto de procesos denudacionales, fluviales, marinos, estructurales y volcánicos (ver Figura 42).

### 4.1.1 Laderas denudacionales de pendiente media (D1)

Abarca un total de 36.9 km<sup>2</sup> y son producto del desgaste de las formaciones ígneas que constituyen los montes del área. Esta se caracteriza por presentar pendientes de ángulo medio (15-30°) y un patrón de drenaje dendrítico. Se asocia a las formaciones del Complejo de Nicoya presentes en la zona.

### 4.1.2 Laderas denudacionales de pendiente baja (D2)

Abarca un total de 1.6 km<sup>2</sup> y son producto del desgaste de las formaciones ígneas que constituyen los montes del área. Esta se caracteriza por presentar pendientes de ángulo bajo (5-15°) y un patrón de drenaje dendrítico. Se asocia a las formaciones del Complejo de Nicoya presentes en la zona.

### 4.1.3 Superficies de aplanamiento (D3)

Abarca un total de 4.8 km<sup>2</sup>, estas, según Denyer et al. (2014), son superficies aplanadas que son el resultado de un conjunto de fenómenos como la erosión, depositación (sedimentaria o volcánica) y largos periodos sin movimientos tectónicos. Esta se caracteriza por presentar pendientes de ángulo bajo (0-15°) y un patrón de drenaje subparalelo.

### 4.1.4 Cerros relictos o residuales (D4)

Abarcan un total de 0.66 km<sup>2</sup> y, como lo dice su nombre, son los montes remanentes de la erosión de las formaciones ígneas que constituyen los montes del área.

### 4.1.5 Planicie Aluvial (F1)

Corresponde con la unidad predominante del área, abarca un total de 52.6 km<sup>2</sup> y son producto de la depositación de los sedimentos transportados por los cuerpos de agua. Esta se caracteriza por presentar pendientes de ángulo bajo y un patrón de drenaje subparalelo.

### 4.1.6 Playa (M1)

Abarca un total de 0.2 km<sup>2</sup> y son producto de la erosión y sedimentación producto de la acción del oleaje y la marea en las costas.

### 4.1.7 Cerros aislados (S1)

Abarcan un total de 3.9 km<sup>2</sup> dentro del área de interés, estos corresponden con montes que debido a fallamiento local pierden continuidad con los demás montes o que han sido levantados por el mismo fallamiento. En el área de estudio se observan dos lineamientos de estos, unos alineados en dirección suroeste-noreste y otros alineados en dirección sureste-noroeste.

Los alineados en dirección suroeste-noreste están compuestos por basaltos y radiolaritas del Complejo de Nicoya, esta dirección del alineamiento coincide con trazas de fallas neotectónicas asociadas al Sistema de Falla Los Chanchos, el cual, según Denyer et al. (2019), se caracteriza por la predominancia de movimiento dextral y con dirección norte-sur, sin embargo, posee una curvatura hacia el este que induce un comportamiento transtensional provocando un escarpe en la región de hasta 100 m de altura y 15km de extensión.

En cuanto a los cerros alineados en dirección sureste-noroeste se asocian con las trazas del fallamiento paleotectónico de movimiento relativo dextral, representado por Gómez (2005) y Denyer et al. (2014).

#### 4.1.8 Meseta (V1)

Abarca un total de 7.2 km<sup>2</sup>, su origen está relacionado con los depósitos piroclásticos de la formación Bagaces. Dentro del área de interés se identifican dos niveles, uno asociado a la Toba Santa Rosa y el superior a la Toba Río Colorado. Denyer et al. (2019) corroboran lo mencionado en investigaciones anteriores y estiman que, en las cercanías de la ciudad de Liberia, esta meseta posee un basculamiento entre 0.8 y 1.5° y su eje posee una dirección N14W, sin embargo, se desconoce si en el área de estudio de esta investigación, la meseta posee este basculamiento y cómo este podría verse afectado por el sistema de Falla Los Chanchos

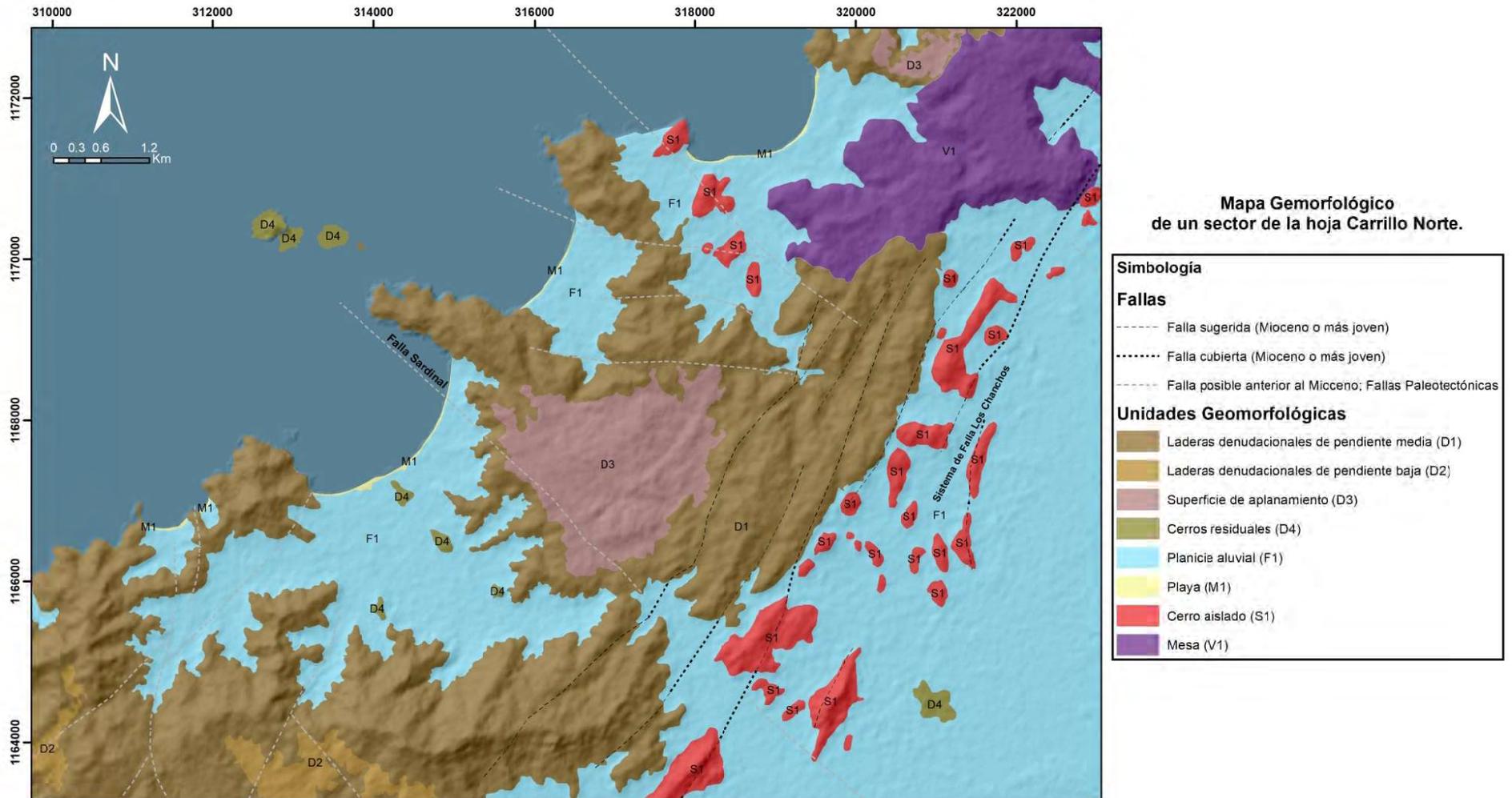


Figura 42 Mapa geomorfológico de un sector de la hoja Carrillo Norte

## 5 Sistema Acuífero Playa Panamá

### 5.1 Marco Hidrogeológico

Dentro de la cuenca se encuentran, aflorantes, las unidades ígneas pertenecientes al Complejo de Nicoya, los depósitos epivolcanoclásticos, las tobas Santa Rosa, La Casona y Río Colorado, pertenecientes a la formación Bagaces, y los depósitos recientes coluviales, aluviales y de playa.

#### 5.1.1 Características de las unidades hidrogeológicas identificadas

##### 5.1.1.1 Unidad Hidrogeológica P-3: Formación Bagaces

A nivel regional, esta formación se conoce por tener gran capacidad acuífera, Alvarado (2018) la describe como un sistema acuífero de alta complejidad debido a sus heterogeneidades y alternancias entre tobas y paleosuelos con variaciones en sus conductividades hidráulicas. Además, la autora menciona que existen diferentes grados de confinamiento, desde libre a confinado y, por último, establece que el potencial de este sistema acuífero varía de bajo a muy alto. Esta heterogeneidad en la porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas y piroclásticas es mencionada también por Custodio (2004), además, recalca que un alta porosidad no necesariamente significa alta permeabilidad, ya que es necesario que exista interconexión entre sus poros.

Las unidades Santa Rosa, Casona y Río Colorado de manera general poseen mala selección y alto contenido de pómez, sin embargo, Arredondo (2009) y Murillo (2007) reportan que las tobas de la formación Bagaces localmente se observan masivas, de muy fracturadas a poco fracturadas.

Denyer et al. (2019) identifican un nivel de depósitos epivolcanoclásticos de al menos 20m de espesor sobreyaciendo el Complejo de Nicoya y subyaciendo la Toba Santa Rosa. Este tipo de unidades, según lo describen Custodio & Llamas (1996), podrían estar actuando como drenaje de las unidades de tobas que le sobreyacen e incluso poseer un carácter de semiconfinamiento.

Se considera que localmente esta formación constituye un sistema acuífero secundario o acuitardos capaces de recargar el acuífero principal de la cuenca mediante recarga lateral. Existen pozos privados ubicados en el sector central y de mayor altitud de la meseta que, según su expediente de concesión, extraen de esta unidad entre 0.4 y 1.75 l/s. En el sector más bajo y borde de la meseta, existen pozos que, según su expediente de concesión, extraen de esta unidad entre 12 y 18.6 l/s.

##### 5.1.1.2 Unidad Hidrogeológica P-2: Complejo de Nicoya (Kn)

Las tres unidades geológicas presentes en el área de estudio que conforman el Complejo de Nicoya han sido consideradas de bajo potencial acuífero por investigaciones previas en la región y específicamente localmente por Arredondo (2009) y Murillo (2007). Esto por sus propias características litológicas y sus génesis, lo cual es concordante con lo descrito por Custodio (2004), quien establece que las formaciones, producto de vulcanismo submarino, tienden a ser principalmente impermeables debido a la intensa alteración, además que los eventos tectónicos que las emergen suele compactar los materiales que las componen.

Su capacidad acuífera no se considera nula debido a que se ha identificado en investigaciones previas y en los mismos registros de perforación de pozos, que sus primeros 5 a 15 m presentan grados considerables de fracturamiento y meteorización, esto les confiere la capacidad de almacenar y transmitir agua.

Se considera que localmente esta formación constituye un acuífero secundario o acuitardo capaz recargar el acuífero principal de la cuenca mediante recarga lateral, existen pozos privados que según su expediente de concesión extraen de esta unidad entre 0.2 y 2 l/s.

### 5.1.1.3 Unidad Hidrogeológica P-1: Depósitos recientes

Constituidos por los depósitos aluviales, coluviales y costeros de la cuenca en estudio, mayoritariamente compuestos por gravas y arenas de composición y textura homogénea, además, principalmente en la parte superior de esta unidad, se encuentran capas de arcillas; estas condicionan la capacidad de infiltración a lo largo de su extensión (Murillo, 2007). El autor identifica que en el sector central de esta unidad es donde ocurren los menores valores de capacidad de infiltración.

Arredondo (2009) describe un posible paleocauce ubicado en el sector de quebrada Pita, esto asociado a que en este sector se tiene el mayor espesor conocido de la unidad (30 m promedio) y los pozos de mayor producción en el acuífero, lo que sugiere que en este sector se tienen las mejores condiciones de los materiales (selección, gradación y limpieza).

Arredondo (2009) y Murillo (2007) consideran esta unidad como el acuífero principal de la cuenca debido a su capacidad acuifera demostrada, este posee recarga directa a través de la infiltración e indirecta proveniente de los acuíferos fracturados secundarios de la cuenca.

### 5.1.2 Geometría del acuífero principal (P-1)

El basamento regional (los basaltos del Complejo de Nicoya) corresponde con el límite inferior de la totalidad del acuífero y en diversos sectores es también su límite lateral junto con las diferentes unidades de la formación Bagaces ubicadas en las zonas altas de la cuenca, la descarga ocurre principalmente en el Océano Pacífico. A pesar de la presencia de capas de arcillas, no se ha identificado una lo suficientemente extensa y gruesa como para generar algún grado de confinamiento, además, Murillo et al. (2007), utilizando sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas, lo describe cómo homogéneo texturalmente.

Este se considera como un único acuífero libre, en concordancia con lo establecido por investigaciones anteriores (Arredondo, 2009 y Murillo, 2007).

Murillo (2007) describe que el espesor de este acuífero poroso es menor en la zona costera y que conforme se adentra en la cuenca este adquiere mayor dimensión. Según el autor, esta característica disminuye la probabilidad de que en el sistema se desarrolle intrusión salina en una magnitud significativa.

Considerando la distribución de las unidades hidrogeológicas y las condiciones topográficas de la cuenca, se puede dividir en dos sectores, izquierdo y derecho.

El sector izquierdo abarca aproximadamente un 25% de la cuenca y su principal cuerpo de agua superficial es la quebrada Grande. Como se observa en el perfil AB (Figura 44) el flujo de agua subterránea inferido posee una dirección predominante hacia el noroeste y posee un gradiente hidráulico promedio de 0.014. En cuanto al espesor máximo conocido, se registra un espesor de 20 m en el pozo CN-336, este disminuye según su cercanía con los límites laterales del acuífero. Así como lo menciona Murillo (2007), tanto el espesor como la capacidad acuifera real en este sector podrían ser mayores que la conocida actualmente debido a la baja densidad de pozos y de información disponible.

El sector derecho, abarca aproximadamente el 75% de la cuenca y su principal cuerpo de agua superficial es la quebrada Pita, junto a las quebradas de menor importancia Laja, Pozo Verde, Penca, Espavel y Ojoche. La dirección de flujo superficial y la subterránea inferida poseen predominantemente dirección hacia el norte y un gradiente hidráulico promedio entre 0.006 y 0.016. Como se observa en el perfil CD (Figura 44), es en este sector donde se ubica la mayor densidad de pozos y los de mayor productividad, además como se mencionó anteriormente, los depósitos recientes poseen el máximo espesor conocido y las mejores condiciones para almacenamiento y transporte de agua.

En los perfiles EF y JK (Figura 44) es posible apreciar cómo ciertos cerros aislados del Complejo de Nicoya y las tobas de la formación Bagaces pueden cortar la continuidad de los depósitos recientes.

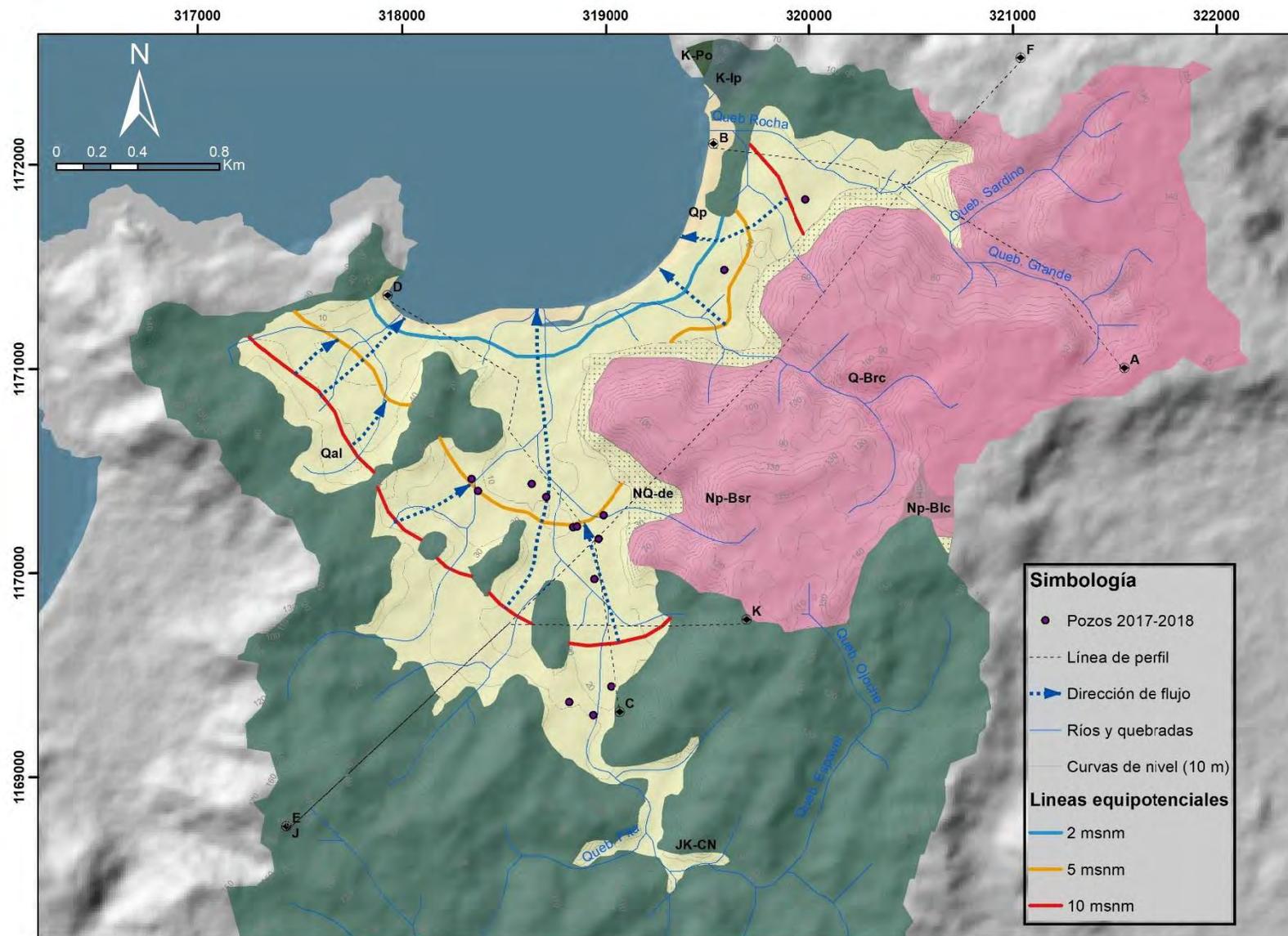


Figura 43 Mapa de la red de flujo años 2017 y 2018, Playa Panamá

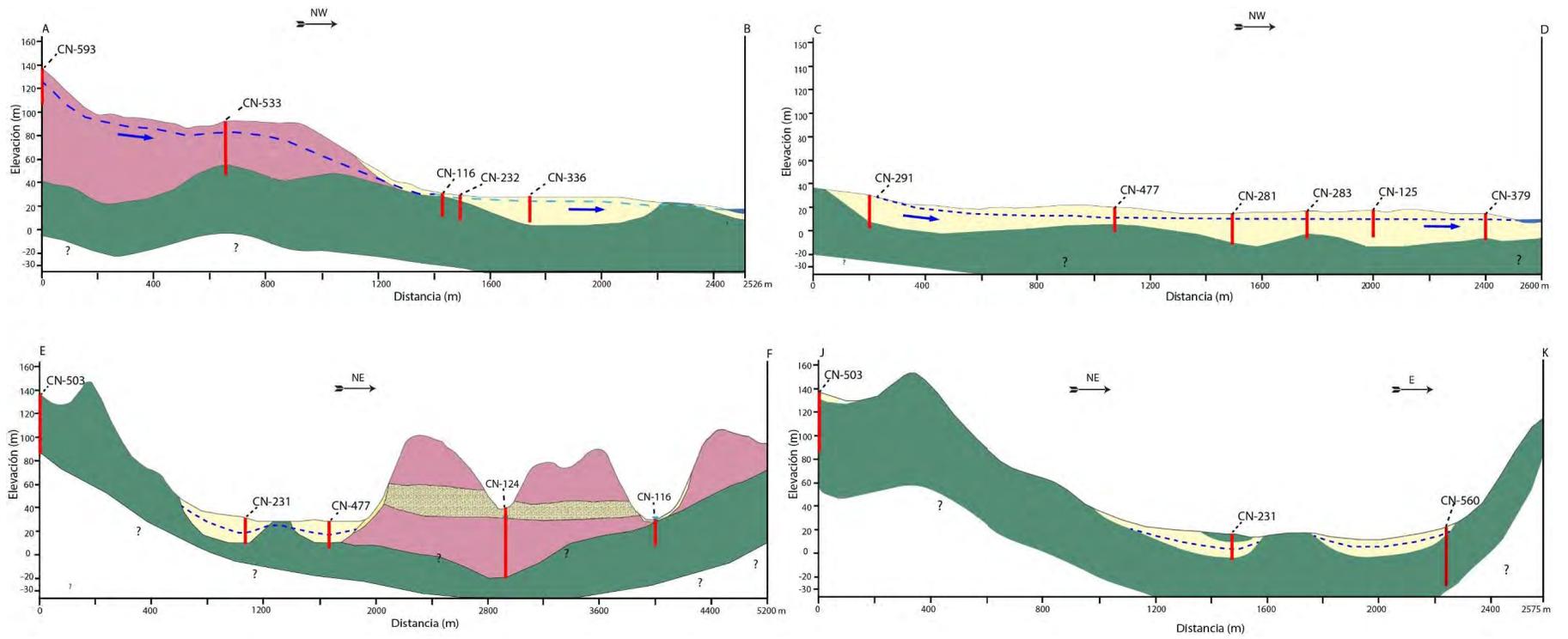


Figura 44 Lámina de perfiles, sistema acuífero Playa Panamá

El flujo del agua subterránea en el acuífero se presenta en la Figura 43. Debido a la geometría del acuífero, su gradiente hidráulico y heterogeneidad del paleo relieve de su límite inferior, en el acuífero puede haber direcciones de flujo locales, cartografiables a menor escala. De igual manera, los factores anteriormente mencionados también condicionan la representación del potencial del acuífero debido a que, a pesar de utilizar mediciones del nivel estático contemporáneas realizadas durante campañas de medición de niveles estáticos mensuales, se tienen resultados muy variables entre sí aún entre pozos muy cercanos. Por esta razón el potencial presentado en la Figura 43 corresponde con la tendencia general observada en las mediciones de nivel mensuales de los años 2017 y 2018.

Cabe resaltar que entre ambos ciclos hidrológicos no hubo una variación significativa, sin embargo, en ambos se observa que durante la época seca los niveles en los pozos monitoreados pueden disminuir hasta 3 metros en comparación con la época húmeda.

En la Figura 45 se representa la ubicación y distribución a lo largo de toda la cuenca de las 3 unidades hidrogeológicas identificadas y descritas anteriormente. La unidad P-1 coincide con el acuífero libre granular que se encuentra principalmente en el material aluvional, las unidades P-2 y P-3 corresponden con las formaciones Complejo de Nicoya y Bagaces respectivamente. Estas últimas se consideran acuíferos secundarios o acuitardos poco permeables y fracturados que recargan de manera lateral a la unidad hidrogeológica P-1.

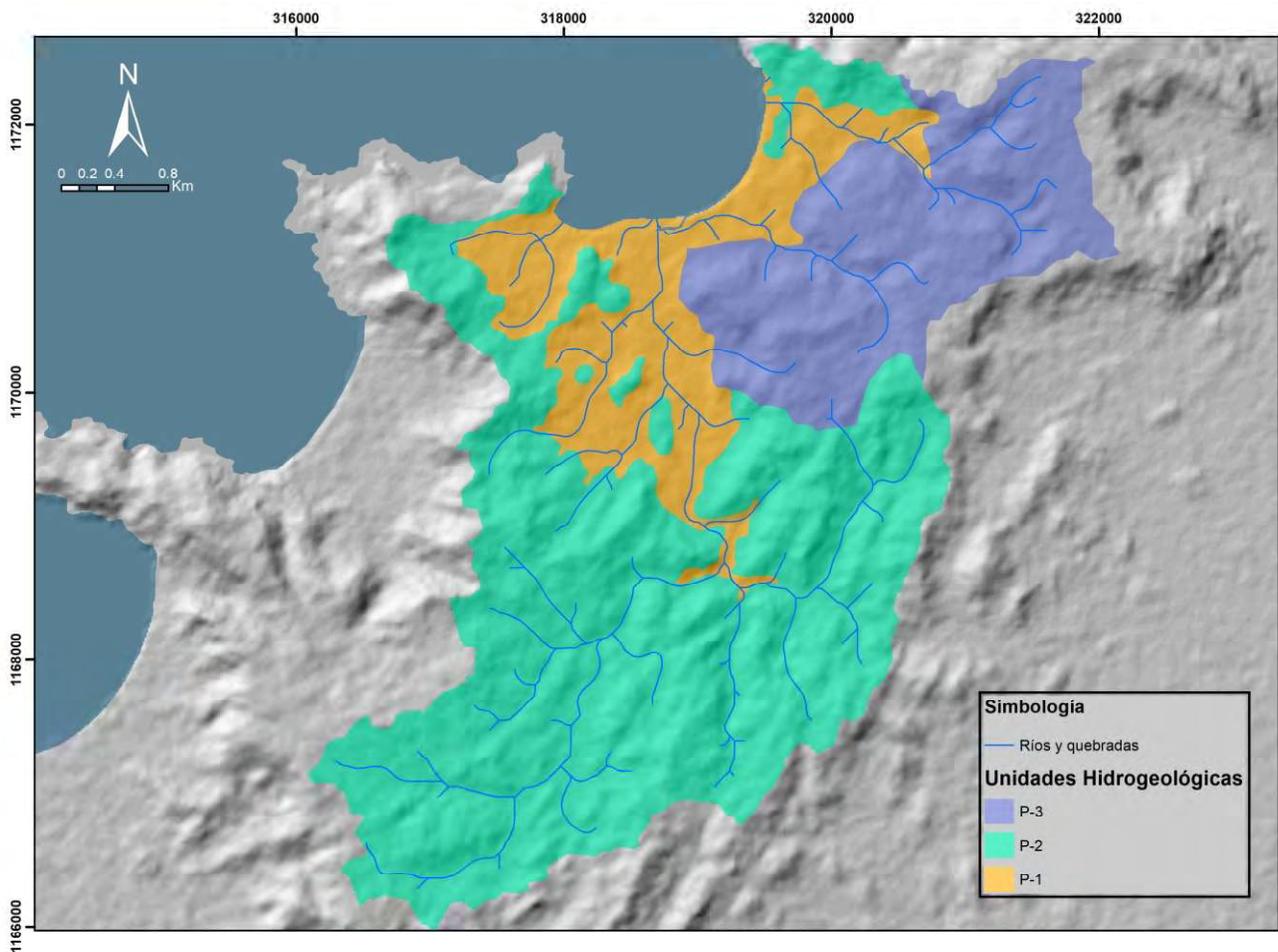


Figura 45 Mapa de unidades hidrogeológicas, Playa Panamá

## 5.2 Infiltración

### 5.2.1 Uso de suelo y Capacidad de Infiltración

Tras la interpretación de las imágenes satelitales del periodo 2017-2018, se identificaron 5 tipos de cobertura vegetal y uso del suelo, como se observa en la Figura 46. La cobertura predominante son los pastos o charrales con un 58.7% del total de la cuenca. Seguidamente, los bosques abarcan un 38.9%, la infraestructura corresponde con aproximadamente 2%, 0.36% la costa y un 0.05% el estuario.

Tras una revisión de fotografías satelitales de años anteriores al periodo trabajado para esta investigación, no se identifica alguna variación significativa en cuanto a cambio de uso de suelo o aumento de la zona urbana de la cuenca.

En la Figura 47 se observa que la mayor parte de la cuenca presenta los valores máximos del coeficiente de infiltración, sin embargo, existen al menos 2 sectores en los que el tipo de cobertura vegetal, pendientes fuertes y permeabilidades bajas del suelo disminuyen la capacidad de infiltración.

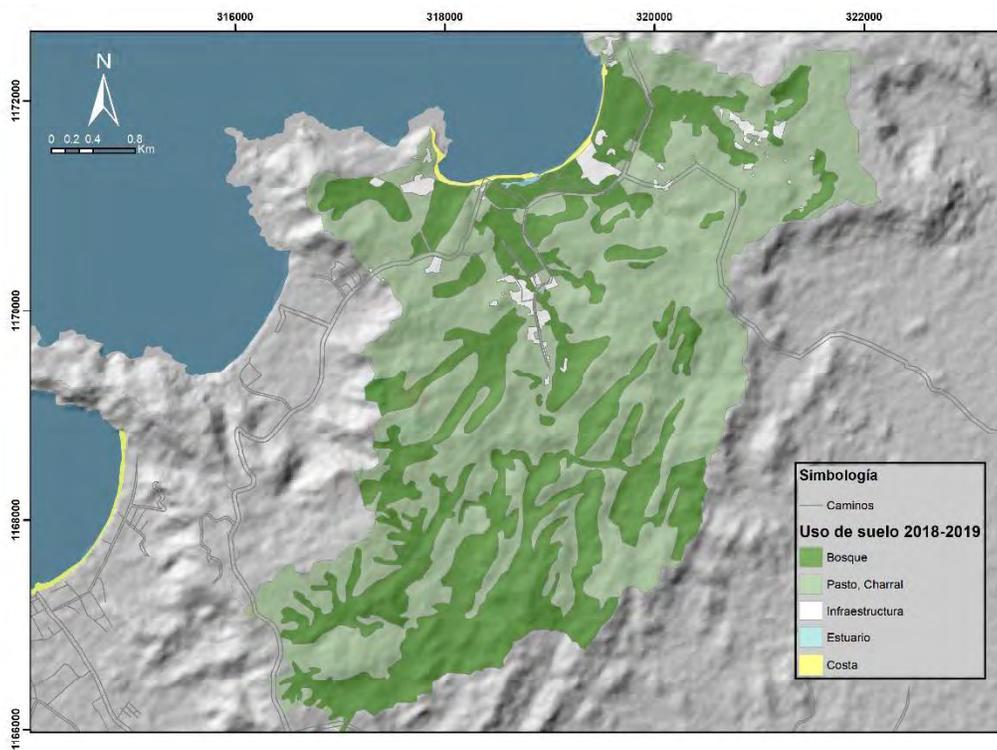


Figura 46 Mapa de uso de suelo, Playa Panamá

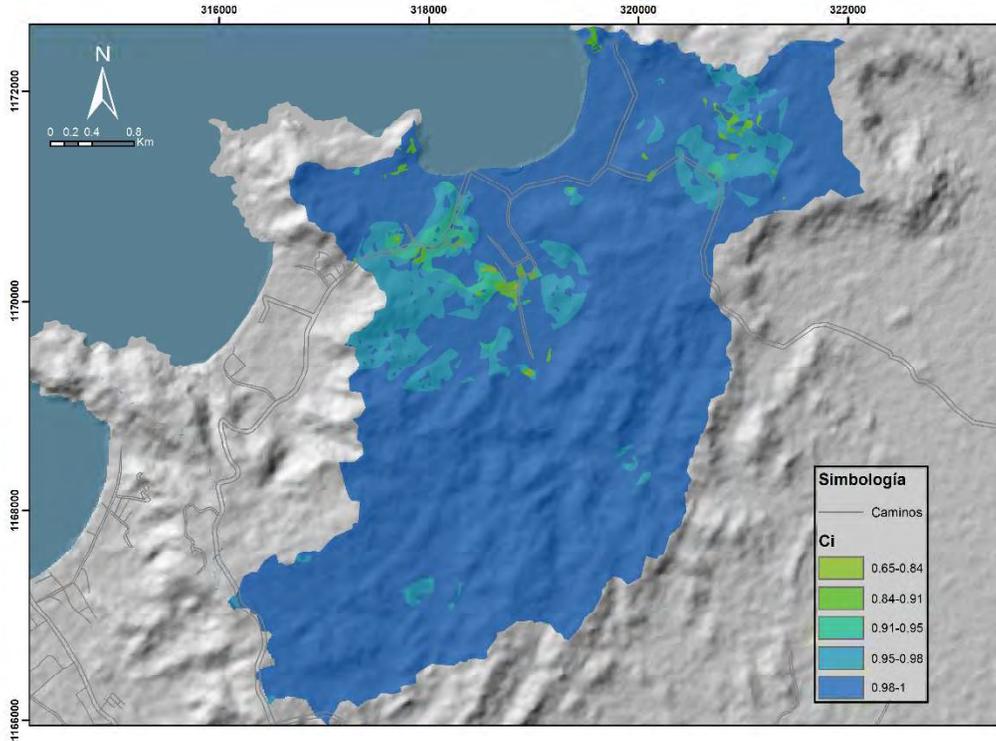


Figura 47 Mapa de coeficiente de infiltración (Ci), Playa Panamá

### 5.2.2 Precipitación que se infiltra mensualmente

Como se observa en la Tabla 15, utilizando el promedio histórico de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Daniel Oduber, únicamente en los meses de enero, febrero y marzo, hay menos de 5mm de precipitación por mes y durante todo el mes de diciembre el promedio es de 11 mm, que sigue siendo una cantidad baja y con baja probabilidad de generar infiltración.

Tabla 15 Precipitación promedio histórica (1999-2017) Playa Panamá.

Mes	Promedio histórico de precipitación Estación A. Daniel Oduber (mm/m <sup>2</sup> )	Cantidad de precipitación en la cuenca (megal)	Precipitación que infiltra (megal)	Porcentaje según el total de precipitación. (%)
Enero	1.30	26	0	0.0
Febrero	1.60	32	0	0.0
Marzo	2.40	48	0	0.0
Abril	36.30	725	601	83.0
Mayo	189.80	3790	3186	84.1
Junio	186.70	3728	3134	84.1
Julio	121.90	2434	2046	84.1
Agosto	204.00	4073	3424	84.1
Septiembre	356.40	7116	5982	84.1
Octubre	350.70	7002	5886	84.1
Noviembre	103.90	2074	1744	84.1

Diciembre	11.00	220	119	54.0
<b>Total</b>	<b>1566</b>	<b>31267</b>	<b>26121</b>	<b>83.5</b>

Tras realizar el cálculo de la cantidad de precipitación que se infiltra, se corrobora que, durante los meses de enero, febrero y marzo, efectivamente no hay precipitación suficiente para que ocurra infiltración. En la Tabla 15, se presenta la cantidad de precipitación que se infiltra por mes en la cuenca.

En la Figura 48 se presenta el mapa anual de la precipitación que infiltra en el suelo. Existe un sector de tamaño considerable en el que se infiltra menor cantidad de lluvia, hasta el 50% menos que en otras partes del área de estudio. Esta coincide con el sector en el que se tiene menor capacidad de infiltración como se observa en el mapa del coeficiente de infiltración (Figura 47).

La Figura 48 es un indicador de la equitativa importancia de los factores que intervienen en la infiltración, puesto que es necesario analizar el comportamiento de todos a la vez para poder comprender el mapa de la precipitación que infiltra en el suelo.

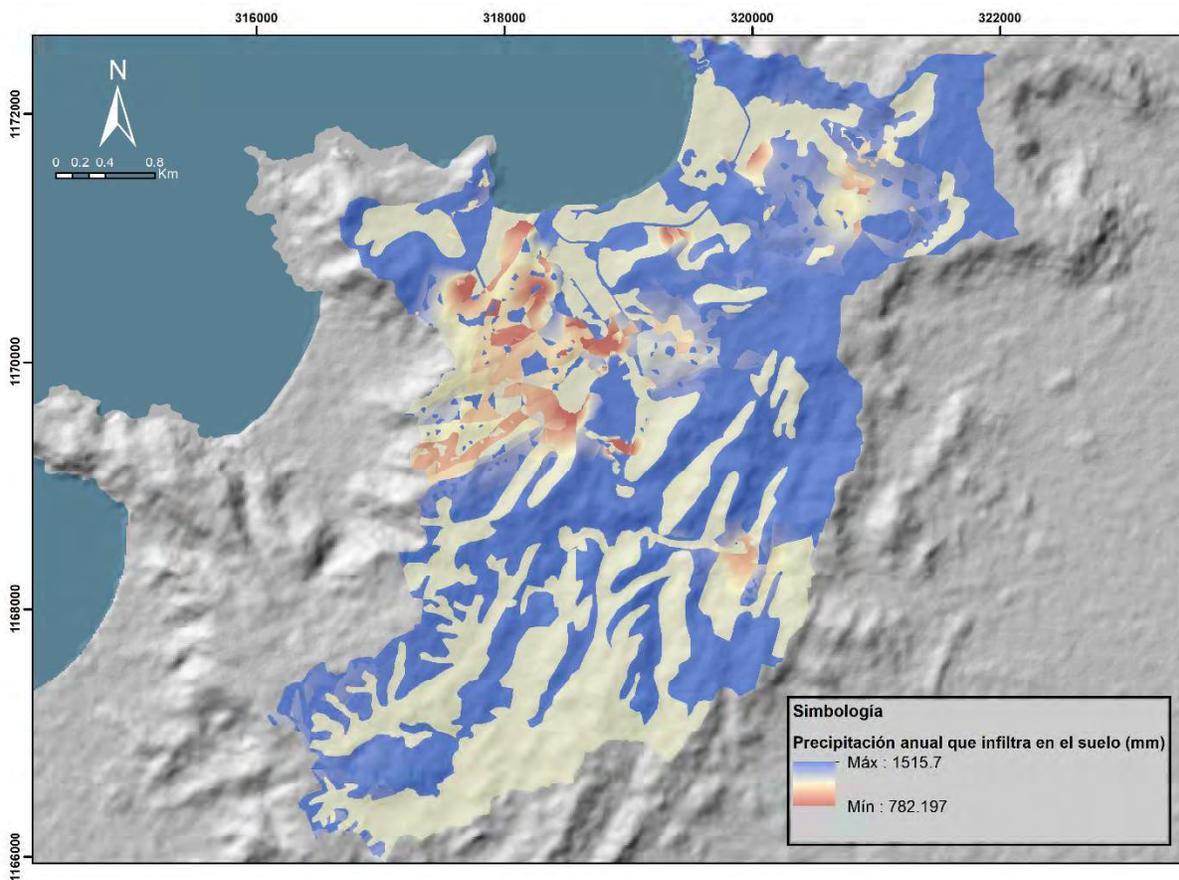


Figura 48 Mapa anual de la precipitación que infiltra en el suelo, Playa Panamá

### 5.2.3 Escorrentía

Durante los tres primeros meses del año no ocurre escorrentía, esta ocurre a partir del mes de abril, según inicia la transición a la época lluviosa, y aumenta gradualmente hasta alcanzar los valores máximos durante los meses de agosto, septiembre y octubre. Producto de la sumatoria de la escorrentía que ocurre mensualmente en la cuenca según la metodología de Schosinsky (2006) se obtiene el mapa presentado en la Figura 49. En este se observa que,

los sitios identificados como los de menor capacidad de infiltración y en los que se infiltra menor cantidad de lluvia, son en los que se tiene mayor cantidad de escorrentía.

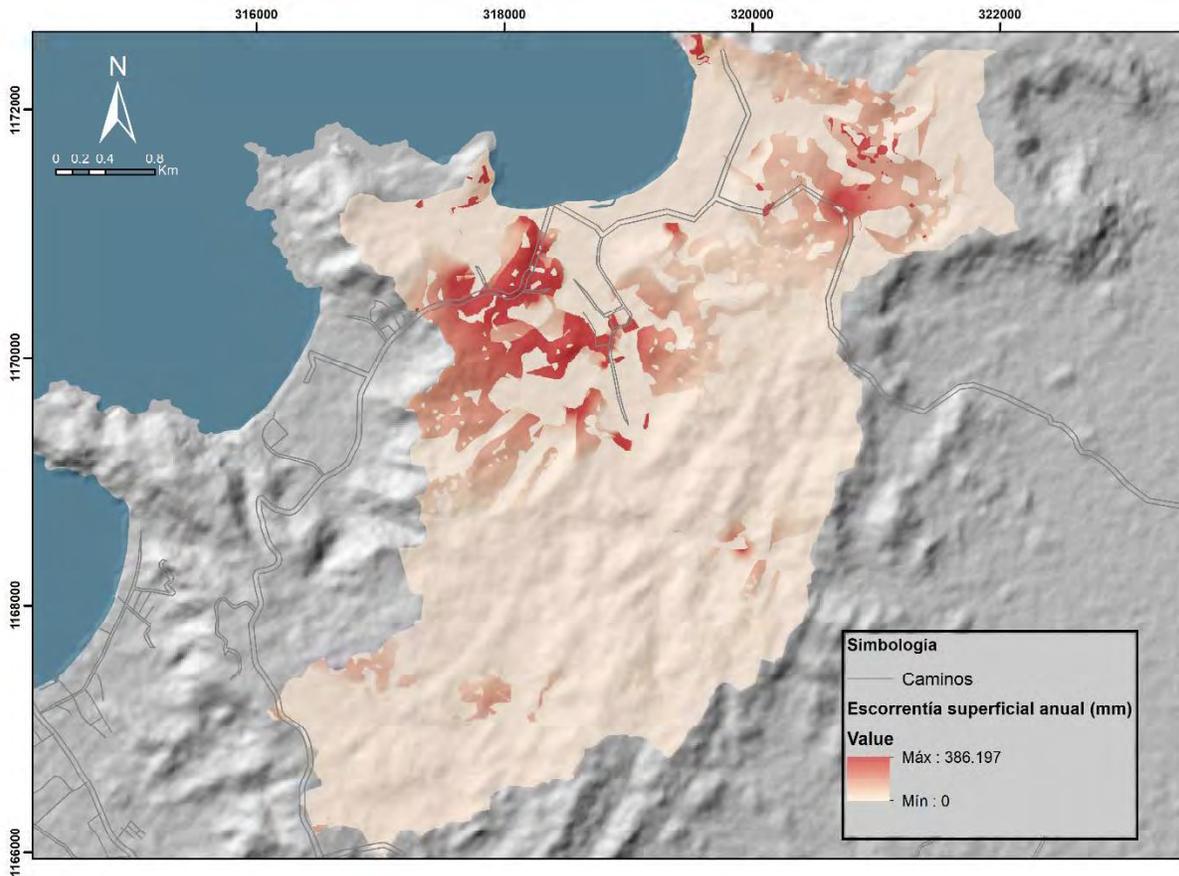


Figura 49 Mapa anual de escorrentía, Playa Panamá

## 5.3 Recarga potencial

### 5.3.1 Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real presenta valores más altos principalmente en las áreas boscosas, en las cuales puede alcanzar hasta un 67% de la precipitación anual (Figura 50). Lo anterior debido a que la evapotranspiración además de las condiciones climáticas también depende del grado de desarrollo de las plantas (Heras, 1972;FAO, 2011), y es en las áreas boscosas donde se tiene vegetación con mayor profundidad de raíces y desarrollo. Durante los meses de la época seca ocurre menor evapotranspiración real, principalmente en febrero, marzo y abril. Lo que coincide con los meses en los que hay menor humedad disponible en el suelo.

En la época lluviosa sucede lo contrario, hay mayor humedad disponible, principalmente durante el mes de septiembre, octubre y noviembre. Por lo tanto, la evapotranspiración real, es mayor en comparación con los meses de la época seca.

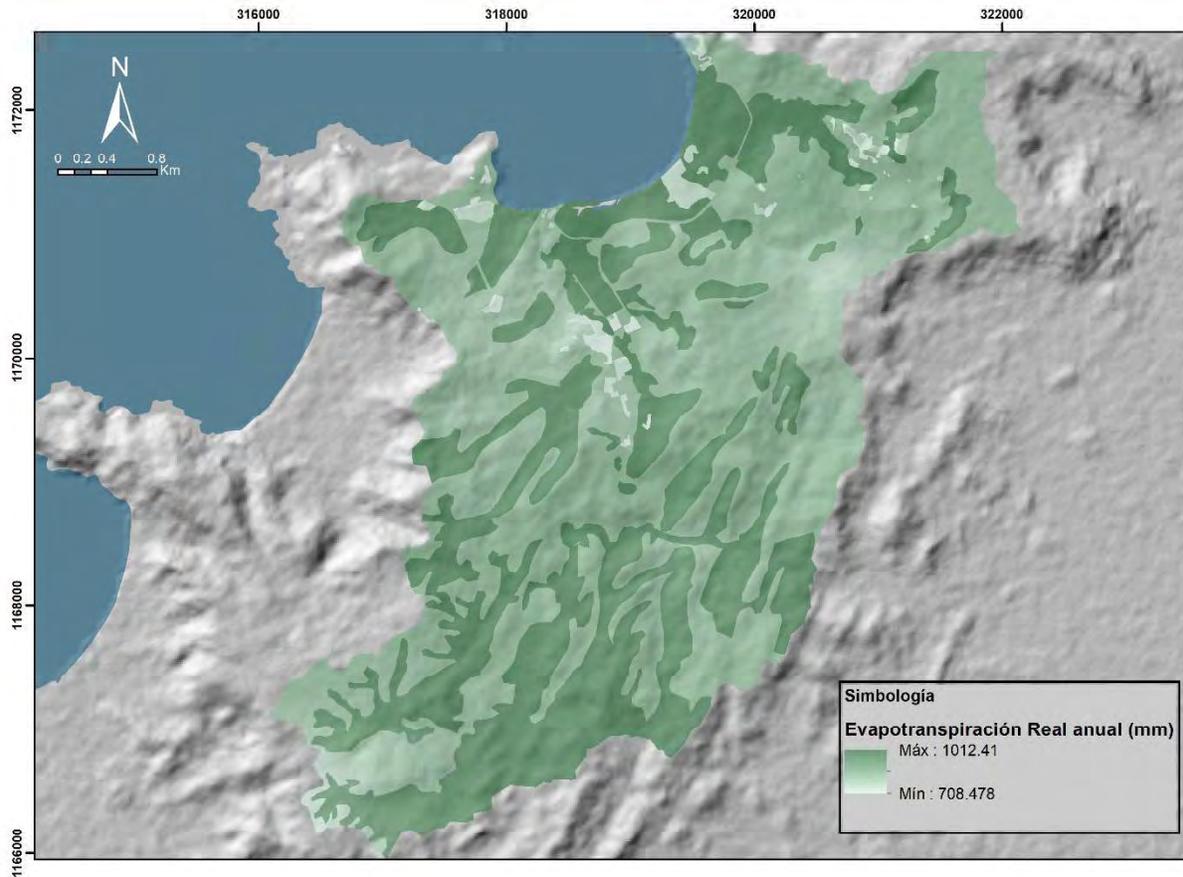


Figura 50 Mapa de evapotranspiración real, Playa Panamá.

### 5.3.2 Recarga potencial mensual y anual

La recarga potencial anual en la cuenca es aproximadamente 8078 megalitros, lo cual corresponde con el 25.8% de la precipitación anual y el 30.9% de la cantidad de lluvia que se infiltra al suelo. Esta ocurre durante los meses de la época lluviosa (mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre), siendo septiembre y octubre los meses en los que ocurre el 85% de la recarga anual de la cuenca. En la Tabla 16 se presenta la recarga total en la cuenca por mes:

Tabla 16 Recarga mensual, Playa Panamá

Mes	Recarga total en Playa Panamá (megal)	Porcentaje con respecto a la recarga anual
Enero	0	0.0
Febrero	0	0.0
Marzo	0	0.0
Abril	0	0.0
Mayo	164	2.0
Junio	444	5.5
Julio	47	0.6
Agosto	505	6.3
Septiembre	3244	40.2
Octubre	3660	45.3
Noviembre	13	0.2
Diciembre	0	0.0

En el mapa de recarga potencial anual (Figura 51) se observa la alta correlación entre las áreas donde ocurre la menor cantidad de recarga y las que presentan cobertura boscosa. Las áreas cubiertas por pastos o matorrales son las que presentan mayor potencial de recarga.

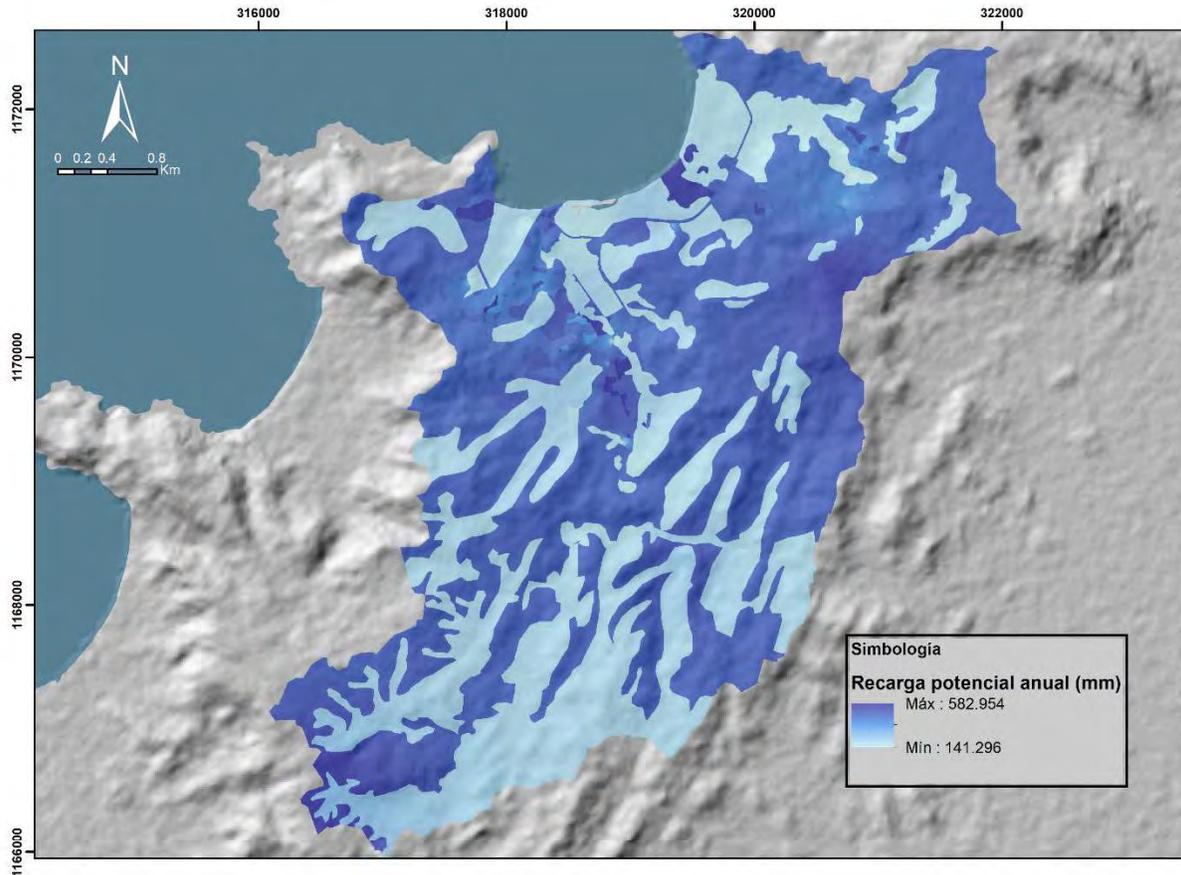


Figura 51 Mapa de recarga potencial anual, Playa Panamá

Para obtener el volumen de recarga se procede a calcularlo de la misma manera que lo realizó Corrales (2017). Primero, es necesario pasar el mapa de milímetros a metros, seguidamente, se multiplica por el área de cada pixel.

En este caso el tamaño de pixel de los mapas es de  $1 \text{ m}^2$ , por lo tanto, la recarga potencial anual en metros se multiplicó por  $1 \text{ m}^2$  y se obtuvo el volumen de recarga en metros cúbicos de cada pixel. Finalmente, se efectúa la sumatoria total con la herramienta *Raster Layer Statistics* de QGIS para conocer el volumen de recarga potencial anual en las áreas deseadas, ya sea la totalidad de la cuenca o según las subunidades de recarga definidas. En este caso corresponden con las 3 unidades hidrogeológicas descritas anteriormente y representadas en la Figura 45.

Tabla 17 Volumen de Recarga potencial anual, Playa Panamá

Subunidad de Recarga	Área (km <sup>2</sup> )	Recarga potencial anual promedio por metro cuadrado (mm)	Volumen de recarga total (m <sup>3</sup> /año)
P-1 (Depósitos recientes) Acuífero libre	3.38	378.36	1,254,036
P-2 (Complejo de Nicoya) Acuitardo	12.1	400.67	4,838,928
P-3 (Fm Bagaces) Acuitardo	4.48	443.35	1,984,558
<b>Total Playa Panamá</b>	<b>19.899</b>	<b>406.64</b>	<b>8,077,522</b>

El sistema acuífero Playa Panamá, recibe aproximadamente 8,077,522 m<sup>3</sup>/año a través de recarga directa. La recarga directa ocurre predominantemente en la subunidad de recarga P-2 correspondiente con los basaltos y cuerpos intrusivos del Complejo de Nicoya. Las subunidad P-3 presenta el mayor promedio de recarga por metro cuadrado, 443 mm/año (Ver Tabla 17). La subunidad P-1 tiene el menor promedio de recarga del sistema acuífero, sin embargo, debido a la red de flujo, esta recibe recarga lateral de las demás subunidades.

En la Figura 52 se visualiza la relación directa existente entre la precipitación, la precipitación que se infiltra, la evapotranspiración real y la recarga potencial, junto con la drástica variación de cada factor en meses de la época seca y lluviosa. A pesar de que la precipitación inicia su aumento en abril y se mantiene durante siete meses, la recarga ocurre de manera significativa únicamente en cuatro meses.

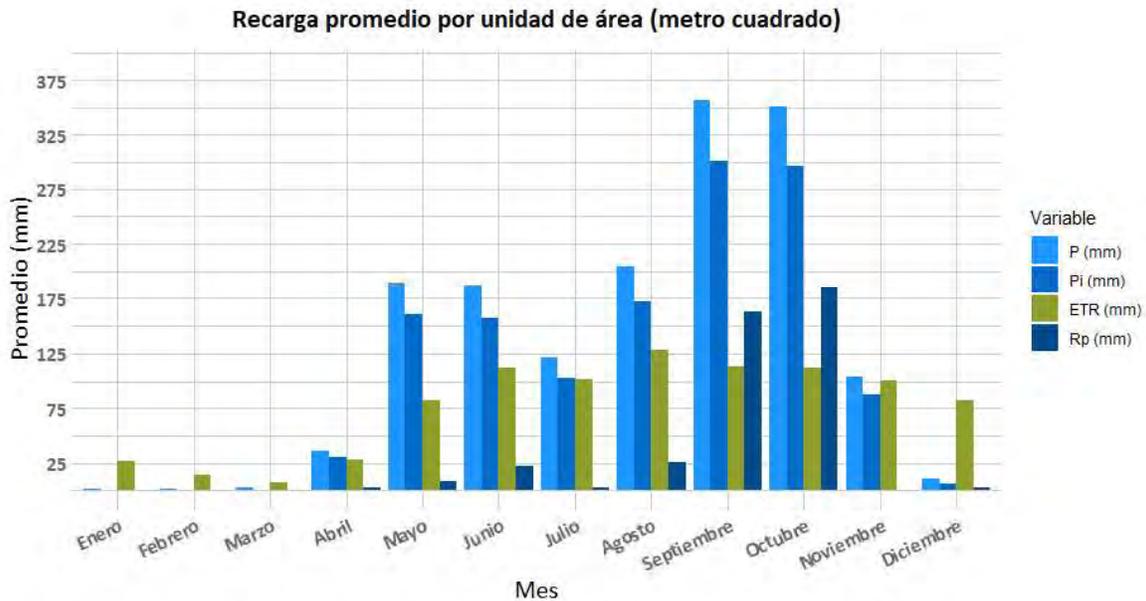


Figura 52 Recarga potencial promedio por unidad de área, Playa Panamá

El valor de la recarga potencial para la totalidad de la cuenca es un resultado semejante al obtenido por Murillo (2007) y Arredondo (2009).

Tabla 18 Análisis comparativo del resultado de la recarga potencial anual

	Murillo (2007)	Arredondo (2009),	Esta investigación
Precipitación anual promedio	1943 mm	1352 mm	1566 mm
Datos climatológicos y Estación meteorológica	Panamá (1977-1981)	El Coco (1970-1991)	Aerop. Daniel Oduber (1999-2017)
Método de cálculo ETP	Hargreaves	Hargreaves	FAO Penman Monteith
Recarga potencial anual	6,496,423 m <sup>3</sup> /año	8,021,528 m <sup>3</sup> /año	8,077,522 m <sup>3</sup> /año

Como se observa en la Tabla 18, las variaciones entre las fuentes de los datos climatológicos y la metodología de cálculo para la evapotranspiración potencial (ETP) aparentemente no poseen un impacto significativo en el resultado final. Se considera que para este caso, las variantes metodológicas para la determinación de los factores utilizados para la evapotranspiración real (C1,C2) , la precipitación que infiltra (Cfo, Kfc, Kp y Kv) y el nivel de detalle de la interpretación y zonificación del uso de suelo actual poseen un impacto mayor en el resultado.

## 5.4 Recarga real

### 5.4.1 Cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante el análisis de la influencia mareal

De los tres pozos que cuentan con monitoreo, dos presentan una influencia mareal apreciable, estos son el CN-736 y el CN-259, sin embargo, el pozo CN-259, se encuentra a 790 m de distancia de la costa. Como consecuencia de su lejanía con la costa, la fluctuación de nivel visible en los hidrogramas es mínima y aparentemente presenta valores de retraso del arribo de las ondas de presión de la marea muy altos, lo que dificulta la aplicabilidad del método y su efectividad. Por lo tanto, se procedió a utilizar únicamente el pozo CN-736.

Para corroborar la influencia mareal en el pozo CN-736, se aplicó la correlación cruzada entre la marea y el nivel de agua en el pozo. En la Figura 53 se presenta el resultado de la correlación cruzada realizada, este corrobora la significativa correlación entre ambas variables y el comportamiento periódico de 12 horas de ambas. Para el cálculo de la correlación se utilizaron 2760 mediciones horarias correspondientes a los meses de enero a abril 2017, este rango fue utilizado debido a que conforme inicia la época lluviosa los datos de nivel se alejan de la estacionalidad requerida.

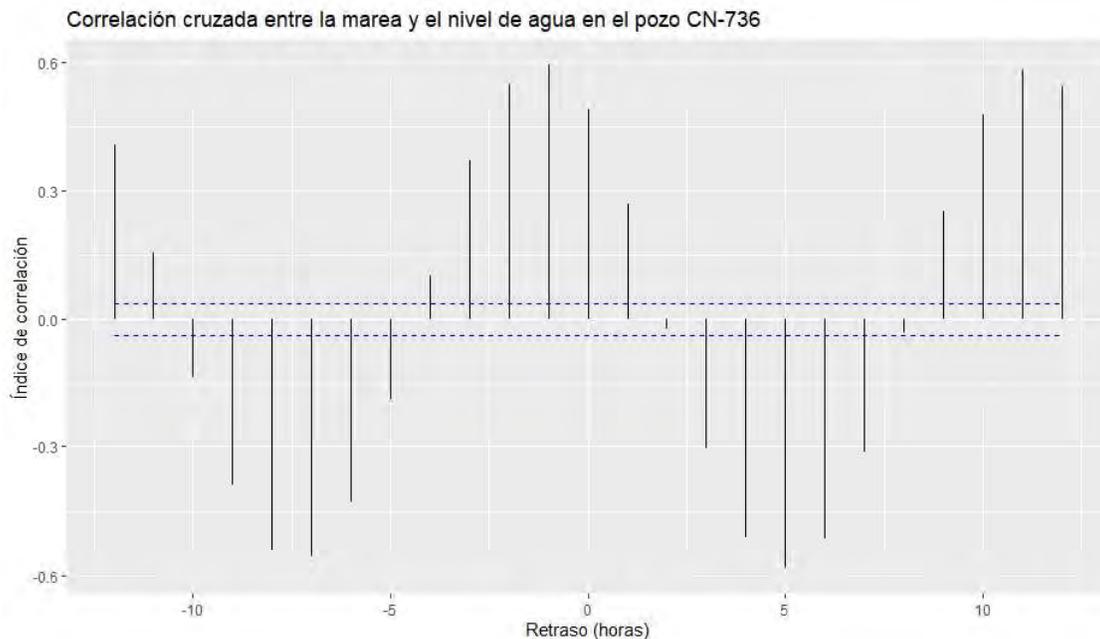


Figura 53 Correlograma entre la marea y el nivel de agua en el pozo CN-736 para los meses de enero a abril (n=2760)

Según estos resultados, la marea y el nivel de agua presentan el mayor índice de correlación cuando se hace el análisis del nivel de agua con 1 hora de retraso respecto a la marea (índice de correlación= .594, otros valores altos de correlación positiva se tienen cuando se analiza la correlación entre las variables con retrasos de 11 y 12 horas, esto debido que es un lapso de tiempo coincidente con la periodicidad de los datos. Esto es visible en la Figura 54.

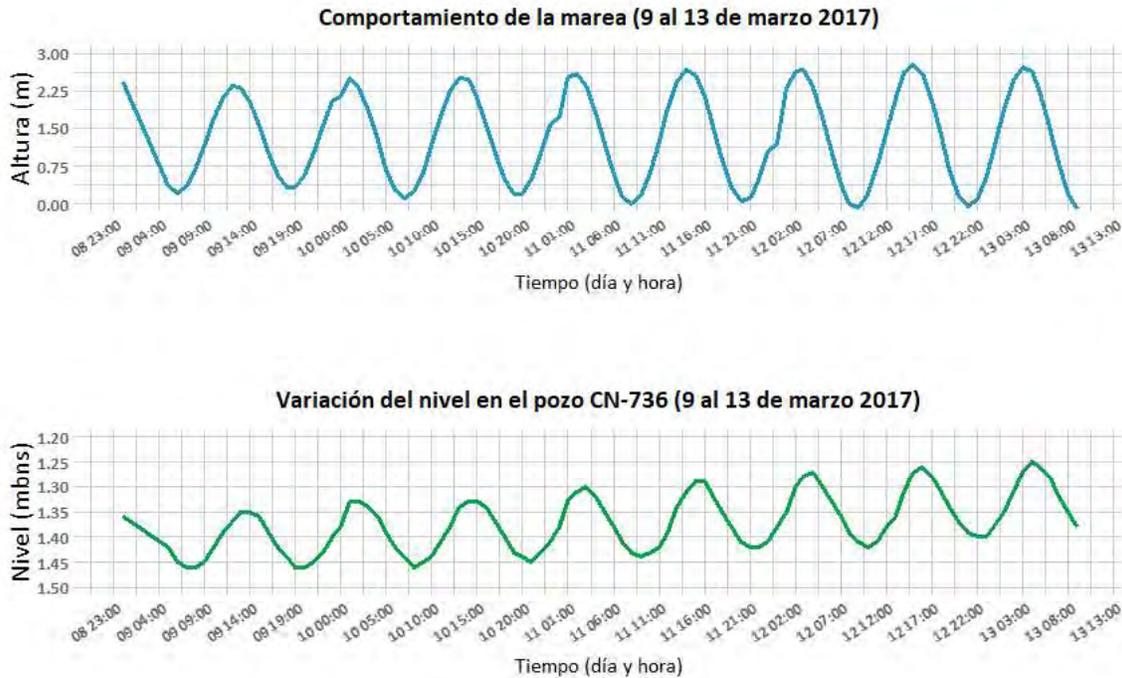


Figura 54 Considerando la ecuación de la eficiencia mareal y el retraso mareal presentadas en la sección 1.6.7, se procedió a estimar el valor del coeficiente de almacenamiento del acuífero en el pozo CN-736. Para estimar este parámetro utilizando estas ecuaciones es necesario conocer un valor aproximado de la transmisividad del acuífero. Este fue calculado a partir del análisis de los resultados de todas las pruebas de bombeo realizadas en el acuífero por Murillo (2007), Arredondo (2009) o las disponibles en la base de expedientes de pozos de SENARA.

Tabla 19 Registro histórico de pruebas de bombeo disponible.

Fecha	Pozo	Duración	Resultado de Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	Referencia
29/03/2006	CN-283	19 h	4500	Murillo 2007
30/08/1975	CN-96	24 h	3756	Expediente SENARA
2/4/2008	CN-281	36 h	2648.22	Arredondo 2010
20/02/2008	CN-283	24 h	2352.9	Arredondo 2010
30/04/2008	CN-273	36 h	1846	Arredondo 2010
11/5/2005	CN-231	24 h	1640	Arredondo 2010
10/5/2005	CN-231	60 h	1440	Murillo 2007
22/06/2005	CN-259	24 h	1200	Murillo 2007
-	CN-336	-	395	Murillo 2007
17/07/1989	CN-232	72 h	213	Arredondo 2010
15/12/2010	MM-16	24 h	135	Informe facilitado por la propietaria
6/7/2006	CN-477	24 h	121	Arredondo 2010
31/03/2008	CN-284	36 h	51	Arredondo 2010
16/10/1994	CN-291	10 h	38.5	Arredondo 2010

22/10/2007	CN-621	12 h	13.36	Expediente SENARA	
16/06/2007	CN-509	5 h	0.75	Arredondo 2010	
1/8/2004	CN-512	10 h	0.61	Arredondo 2010	
Resumen estadístico (n=17)					
Promedio	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Asimetría
1197	395	N/A	0.61	4500	1.123

Como se observa en la Tabla 19, los datos presentan un rango de valores muy amplio y una distribución asimétrica. En estos casos, no es recomendable el uso del promedio sino de la mediana ya que no esta no se ve afectada por los valores extremos disponibles (Garnier, 2020).

En consecuencia , para el cálculo del coeficiente de almacenamiento se procedió a utilizar el valor de la mediana de la transmisividad, el cual corresponde con un valor de 395 m<sup>2</sup>/d.

Tabla 20 Cálculo del Coeficiente de almacenamiento en el pozo CN-736

CN-736								Eficiencia Marel	Retraso Marel
Mes	Semana	x (m)	t <sub>o</sub> (d)	Δh	ΔH <sub>o</sub>	EM	R (d)	S	S
Marzo 2017	Semana 1	142	0.5	0.16	3.02	0.053	0.04	0.027	0.001
	Semana 2	142	0.5	0.15	2.65	0.057	0.04	0.026	0.001
	Semana 3	142	0.5	0.14	2.48	0.056	0.04	0.026	0.001
	Semana 4	142	0.5	0.11	2	0.055	0.04	0.026	0.001
Marzo 2018	Semana 1	142	0.5	0.22	2.95	0.075	0.04	0.021	0.001
	Semana 2	142	0.5	0.09	1.53	0.059	0.04	0.025	0.001
	Semana 3	142	0.5	0.16	2.81	0.057	0.04	0.026	0.001
	Semana 4	142	0.5	0.2	2.3	0.087	0.04	0.019	0.001

Como se observa en la Tabla 20, los valores calculados por el método de la eficiencia mareal son muy distintos a los obtenidos por el método del retraso mareal. Esto se debe a que el retraso entre el arribo de las ondas de presión de la marea al punto de observación es de una hora o incluso menor lo que afecta negativamente la aplicación del método del retraso mareal (ver Figura 54).

El mes de marzo fue seleccionado para la aplicación del método debido a que es en este mes que ocurren las mareas de mayor magnitud en la costa pacífica lo que implica un mayor efecto de la marea sobre el acuífero. Además, el cálculo fue repetido para cada semana del mes con el fin de obtener un valor promedio que contemplara las distintas variaciones de magnitud de la marea producto de las fases lunares. El promedio obtenido a partir de los resultados de todas las mediciones es igual a 0.024.

Este valor se considera el resultado final de la aplicación del método de la eficiencia mareal en el pozo CN-736. Es importante destacar que este valor se encuentra dentro del rango sugerido por Fetter (2014) para el tipo de sedimentos presentes en el acuífero y se acerca al valor determinado mediante una prueba de bombeo , con pozo testigo (0.03), realizada por Murillo (2007).

Para el cálculo de la recarga mediante la fluctuación de niveles se utilizó un valor de 0.027, correspondiente al promedio entre el valor obtenido por Murillo (2007) y el valor definitivo obtenido a través de esta metodología.

#### 5.4.2 Comparación de metodologías para el cálculo de transmisividad y la conductividad hidráulica

Como se menciona anteriormente, para realizar el cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante los métodos de la eficiencia mareal y el retraso mareal era necesario conocer un valor aproximado de la transmisividad del acuífero. En este caso se utilizó un valor de 395 m<sup>2</sup>/d, correspondiente con la mediana del registro histórico de pruebas de bombeo que se han realizado en el acuífero.

Con el objetivo de validar la extrapolación de este valor de transmisividad al punto CN-736, se procedió a utilizar el valor del coeficiente de almacenamiento calculado por Murillo (2007) para calcular la transmisividad, usando los métodos de la influencia y el retraso mareal.

La conductividad hidráulica también fue calculada para complementar la comparación y validación entre los métodos utilizados. Para esta se utilizó la transmisividad calculada por el retraso y la eficiencia mareal y el espesor aproximado, 18 m para el pozo CN-736.

Tabla 21 Comparación de Parámetros hidráulicos según método de cálculo, Playa Panamá

Parámetro	Método														
	Eficiencia Mareal					Retraso Mareal					Pruebas de bombeo				
	Min	Max	Promedio	Mediana	n	Min	Max	Promedio	Mediana	n	Min	Max	Promedio	Mediana	n
S	0.019	0.027	0.024	0.026	8	0.001	0.001	0.001	0.001	8	0.03				1
T (m <sup>2</sup> /d)	440	637	494	462	8	43554	43554	43554	43554	8	0.61	4500	1197	395	17
K (m/d)	24.5	308.2	27.4	25.7	8	2420	2420	2420	2419.7	8	17.2	195.6	81.7	57	34

Como se observa en la Tabla 21, los resultados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del método de la eficiencia mareal son concordantes con los obtenidos a través de las pruebas de bombeo. El método del retraso mareal generó resultados para los tres parámetros que difieren hasta por dos órdenes de magnitud respecto a los otros dos métodos.

Esto se asocia a que en el piezómetro CN-736 el retraso de la fluctuación del nivel producto de la fluctuación de la marea es de una hora o menor (ver Figura 54).

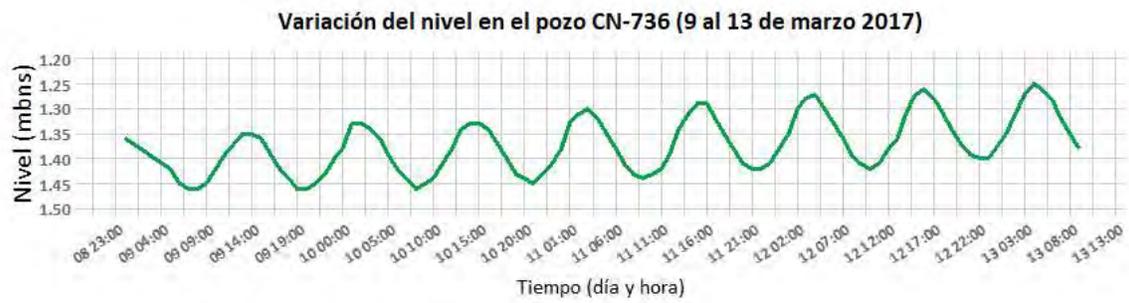


Figura 54 Hidrograma del pozo CN-736 durante los días 9 al 13 de marzo

### 5.4.3 Recarga neta anual

En la Tabla 22 se presentan los resultados del cálculo de la recarga neta del año 2017 por cada área de influencia de cada pozo y el porcentaje recargado según lo llovido en el área. En total hubo una recarga neta de  $1.46295E+14$  mm<sup>3</sup>, un 2.07 % de la precipitación anual en el área de cálculo. En el año 2017, según los datos de la estación Aeropuerto Daniel Oduber del IMN, en total llovió 2007.9 mm/m<sup>2</sup>.

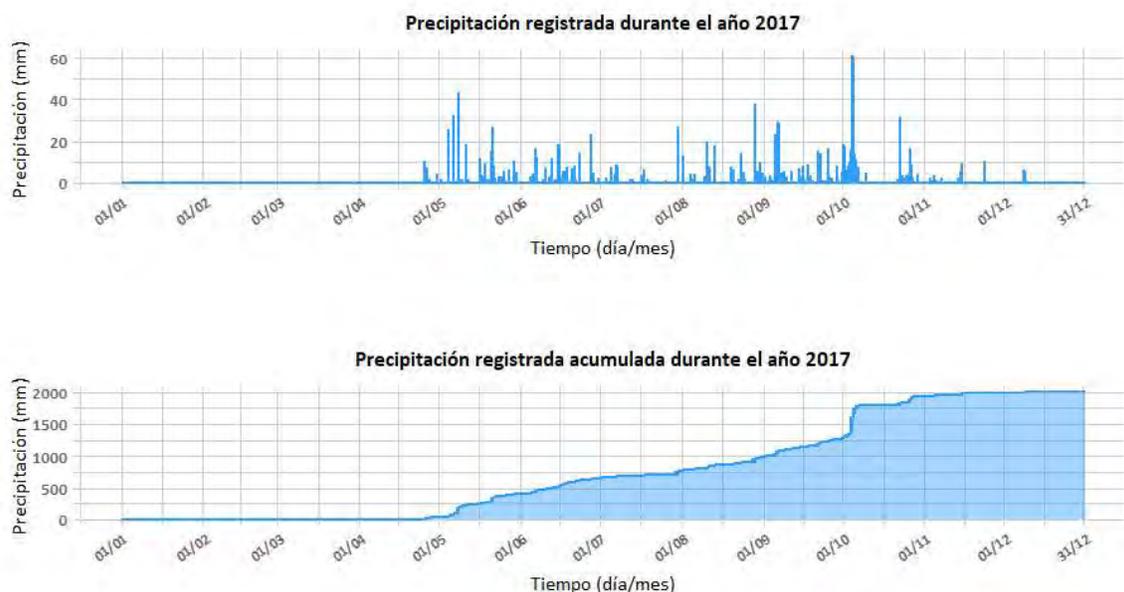


Figura 55 Precipitación registrada en la estación Aeropuerto Daniel Oduber durante el año 2017

Tabla 22 Valores del cálculo de la recarga neta del año 2017, Playa Panamá

Pozo	CN-246	CN-259	CN-736
Nivel inicial (mbns)	10.03	8.58	1.38
Nivel final (mbns)	7.18	5.35	1.34
$\Delta h$ (mm)	2850	3230	40
Tiempo (años)	1	1	1
Coefficiente de almacenamiento	0.027	0.027	0.027
Recarga neta (mm/año)	76.95	87.21	1.08
Área de influencia (mm <sup>2</sup> /año)	$1.14E+12$	$6.53E+11$	$1.73E+12$
Volumen recargado (mm <sup>3</sup> /año)	$8.75E+13$	$5.69E+13$	$1.87E+12$
Volumen llovido (mm <sup>3</sup> /año)	$2.28E+15$	$1.31E+15$	$3.48E+15$
Porcentaje recargado (%)	3.83	4.34	0.05

### 5.4.4 Recarga neta durante la época lluviosa

Durante la época lluviosa del año 2017 se registraron 1936.4 mm de lluvia, aproximadamente el 96% del total anual. Septiembre y octubre se caracterizan por ser los meses más lluviosos del año según el comportamiento histórico, en el año 2017 registraron el 47% de la precipitación del año (936.6 mm).

Durante los siete meses de la época lluviosa se recargaron  $2.5776E+14\text{mm}^3$ , el 3.73 % del total de la precipitación en toda el área en estos meses (Ver Tabla 23).

Tabla 23 Valores del cálculo de la recarga neta de la época lluviosa 2017, Playa Panamá

Pozo	CN-246	CN-259	CN-736
Nivel inicial (mbns)	11.33	8.68	1.19
Nivel final (mbns)	5.46	4.28	1.19
$\Delta h$ (mm)	5870	4400	0
Coefficiente de almacenamiento	0.027	0.027	0.027
Recarga neta (mm/año)	158.49	118.8	0
Área de influencia ( $\text{mm}^2/\text{año}$ )	$1.14E+12$	$6.53E+11$	$1.73E+12$
Volumen recargado ( $\text{mm}^3/\text{año}$ )	$1.80E+14$	$7.76E+13$	0
Volumen llovido ( $\text{mm}^3/\text{año}$ )	$2.23E+15$	$1.28E+15$	$3.40E+15$
Porcentaje recargado (%)	8.07	6.05	0.00

En cuanto al mes de septiembre y octubre, se recargaron  $9.37E+13\text{mm}^3$ . Esto corresponde con el 2.84% de lo llovido durante estos meses y el 36.34% del total recargado durante la época lluviosa (Ver Tabla 24).

Tabla 24 Valores del cálculo de la recarga neta de septiembre y octubre 2017, Playa Panamá

Pozo	CN-246	CN-259	CN-736
Nivel inicial (mbns)	5.87	5.44	1.05
Nivel final (mbns)	4.57	2.47	1.02
$\Delta h$ (mm)	1300	2970	30
Coefficiente de almacenamiento	0.027	0.027	0.027
Recarga neta (mm/año)	35.1	80.19	0.81
Área de influencia ( $\text{mm}^2/\text{año}$ )	$1.14E+12$	$6.53E+11$	$1.73E+12$
Volumen recargado ( $\text{mm}^3/\text{año}$ )	$3.99E+13$	$5.24E+13$	$1.40E+12$
Volumen llovido ( $\text{mm}^3/\text{año}$ )	$1.07E+15$	$6.11E+14$	$1.62E+15$
Porcentaje recargado (%)	3.75	8.56	0.09

#### 5.4.5 Recarga total durante el Huracán Otto

Otto es el primer huracán documentado con impacto directo en el país. Generó aguaceros torrenciales con acumulados diarios de 300 mm y vientos intensos con ráfagas de 15 a 30 m/s en las regiones del norte del país (IMN, 2016). Según el informe del IMN en la región norte a diferencia del resto del país, los días de lluvia producto de este huracán ocurrieron entre el 16 y todo el 24 noviembre. Primero a causa del efecto indirecto y luego por el efecto directo.

Los datos de precipitación de la estación Aeropuerto Daniel Oduber del día 24 de noviembre se muestran en la Figura 56. En esta estación meteorológica no se registraron precipitaciones importantes previas al 24 de noviembre ni posteriores al efecto directo del huracán. Durante 12 horas seguidas llovió un acumulado de  $109.7\text{mm}/\text{m}^2$ , esto es más que el promedio histórico del periodo 1999-2017 del mes de noviembre ( $103.9\text{mm}$ ).



Figura 56 Precipitación del 24 al medio días del 25 de noviembre 2016 producto del Huracán Otto

Se utilizó el mismo procedimiento utilizado para los periodos calculados anteriormente, sin embargo, las fluctuaciones del nivel no fueron igual de evidentes, lo que dificultó la estimación de la recarga. Por esta razón, fue necesario utilizar líneas de tendencia para poder distinguir entre los aumentos de nivel producto de las precipitaciones y el comportamiento natural del nivel de los puntos de monitoreo. El pozo CN-246 presenta bombeos regulares de 6 y 12 horas (ver Figura 57), lo que dificulta las mediciones para la estimación de la recarga.



Figura 57 Fluctuación de niveles producto del Huracán Otto, Playa Panamá

El pozo CN-736 presenta una clara influencia mareal en el comportamiento del nivel de agua, a pesar de esto, es posible identificar la recarga producto de las precipitaciones del Huracán Otto, como se observa en la Figura 57.

Se tiene que hubo una recarga total de  $7.3297E+13 \text{ mm}^3$ , el 3.34% de la precipitación que ocurrió producto de la tormenta tropical. En la Tabla 25 se presentan todos los valores obtenidos de recarga y volumen de recarga.

Tabla 25 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto del Huracán Otto, Playa Panamá

Pozo	$\Delta h$ (mm)	Sy	$\Delta t$ (h)	R (mm/h)	Área de influencia ( $\text{mm}^2$ )	Volumen recarga ( $\text{mm}^3$ )	Volumen total llovido ( $\text{mm}^3$ )	Porcentaje de volumen de lluvia recargado
CN-246	60	0.027	6	0.2700	$1.14E+12$	$1.84E+12$	$1.25E+14$	1.48 %
CN-259	40	0.027	6	0.1800	$6.53E+11$	$7.05E+11$	$7.16E+13$	0.98 %
CN-736	340	0.027	6	1.5300	$1.73E+12$	$1.59E+13$	$1.90E+14$	8.37 %
					<b>Total</b>	<b><math>7.33E+13</math></b>	<b><math>2.19E+15</math></b>	<b>3.34 %</b>

#### 5.4.6 Recarga total durante la Tormenta Tropical Nate

La Tormenta Tropical Nate ocurre entre el 4 y 9 de octubre del año 2017. Según datos del Gobierno de Costa Rica, afectó 76 cantones, 50 más que el Huracán Otto (“Impactos Tormenta Tropical Nate,” 2017). En el sector de Liberia, donde se encuentra la estación meteorológica Aeropuerto Daniel Oduber, provocó precipitaciones durante 48 horas con diferentes intensidades. En la Figura 58 se presenta la precipitación registrada por esta estación meteorológica. En total llovió 394.4 mm en un periodo de 46 horas, del 3 al 5 de octubre.

El ascenso en los niveles de los puntos de monitoreo es evidente (ver Figura 59), incluso se alcanzan valores negativos los cuales sugieren que la columna de agua en el punto de monitoreo sobrepasó el nivel del suelo. Este tipo de variaciones facilitan la aplicación del método. La recarga se estimó utilizando el intervalo completo de precipitaciones asociadas a la tormenta tropical (48 horas). En el caso del pozo CN-246, que presenta bombeos constantes, se analizó la línea de tendencia y el comportamiento general del hidrograma para aplicar la metodología y obtener un resultado adecuado.

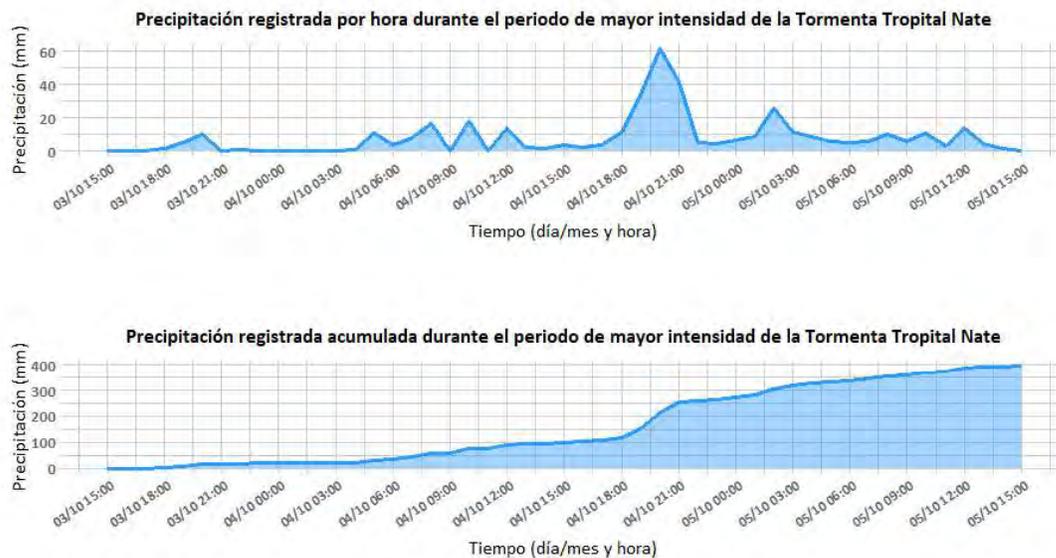


Figura 58 Precipitación en el Aeropuerto Daniel Oduber durante el periodo de mayor intensidad de la Tormenta Tropical Nate



Figura 59 Fluctuación del Nivel en los puntos de monitoreo durante la Tormenta Tropical Nate, Playa Panamá

Se tiene que hubo una recarga total de  $1.51883E+14 \text{ mm}^3$ , el 10.9% de la precipitación que ocurrió producto de la tormenta tropical. En la Tabla 26 se presentan todos los valores obtenidos de recarga y volumen de recarga.

Tabla 26 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto de la Tormenta Tropical Nate, Playa Panamá

Pozo	$\Delta h$ (mm)	$S_y$	$\Delta t$ (d)	R (mm/d)	Área de influencia ( $\text{mm}^2$ )	Volumen recarga ( $\text{mm}^3$ )	Volumen total llovido ( $\text{mm}^3$ )	Porcentaje de volumen de lluvia recargado
CN-246	1430	0.027	2	19.305	$1.14E+12$	$4.39E+13$	$4.48E+14$	9.8
CN-259	4480	0.027	2	60.48	$6.53E+11$	$7.90E+13$	$2.57E+14$	30.7
CN-736	620	0.027	2	8.37	$1.73E+12$	$2.90E+13$	$6.84E+14$	4.2
					<b>Total</b>	$1.52E+14$	$1.39E+15$	10.9 %

#### 5.4.7 Comparación de la recarga real en diferentes periodos

La recarga neta del año 2017, según este método, representa un 2.07 % de la precipitación anual en la cuenca. Este valor se aleja de manera considerable de la recarga real que puede ocurrir durante un año. Como se mencionó anteriormente, el método está diseñado para aplicarse en periodos cortos de tiempo, y, tras este ejemplo, se demuestra que hay una importante subestimación de la recarga real, debido a la descarga natural, antropogénica y otros efectos naturales como la evapotranspiración que ocurren regularmente.

Se esperaría que, según se reduce el periodo en que se aplica el método, la subestimación se redujera y fuera posible identificar un mayor porcentaje de recarga con respecto a lo llovido, sin embargo, como se observa en la Tabla 27 este se mantiene similar en todos los periodos. Lo anterior se considera un indicio de que la distribución de los pozos y las condiciones propias de los mismos, como la poca claridad de las señales y variaciones de nivel, son factores adicionales al periodo de tiempo que provocan una subestimación de la recarga. Específicamente en este caso, los pozos utilizados se encuentran en el sector noroeste de la cuenca y, según la red de flujo, estos no reflejarían influencia de la recarga lateral del sector noreste del acuífero, que representa al menos una cuarta parte de la extensión de la cuenca.

La recarga neta calculada para la época lluviosa es mayor que la recarga neta anual, lo que también evidencia que existe una subestimación de la recarga al aplicarse en lapsos de tiempo tan amplios.

Durante los meses de septiembre y octubre del año 2017 llovió aproximadamente el 50% de la precipitación total de la época lluviosa. La recarga neta calculada para ambos corresponde con el 36% de la recarga neta de toda la época lluviosa y el 2.84% de lo llovido durante estos dos meses.

Tabla 27 Resumen de los resultados obtenidos utilizando el método WTF, Playa Panamá

Playa Panamá	Recarga ( $\text{m}^3$ /periodo)	Porcentaje con respecto a lo llovido durante el período
Recarga neta del año (2017)	146,295	2.07
Recarga neta de la Época Lluviosa (2017)	257,760	3.73
Recarga neta Set-Oct (2017)	93,662	2.84
Recarga neta del Huracán Otto (2016)	73,297	3.34
Recarga neta de la Tormenta Tropical Nate (2017)	151,883	10.9

La diferencia entre los resultados entre el Huracán Otto y la Tormenta Tropical Nate se asocian a la diferencia de intensidad de las lluvias durante ambos eventos climáticos. Otro factor determinante es que el Huracán

Otto ocurre en la última semana de noviembre del 2016, prácticamente al inicio de la época seca, en cambio, la Tormenta Tropical Nate sucede a inicios del mes de octubre 2017, en el periodo de mayor intensidad de la época lluviosa. Esto implica diferencias considerables en la humedad y condiciones del suelo.

En los hidrogramas de los puntos de monitoreo que los pozos más alejados de la costa, como los pozos CN-246 y CN-259, tienen fluctuaciones más abruptas de nivel a lo largo del año y los más cercanos a la costa presentan un comportamiento más estable en el nivel de agua como se observa en la Figura 60.

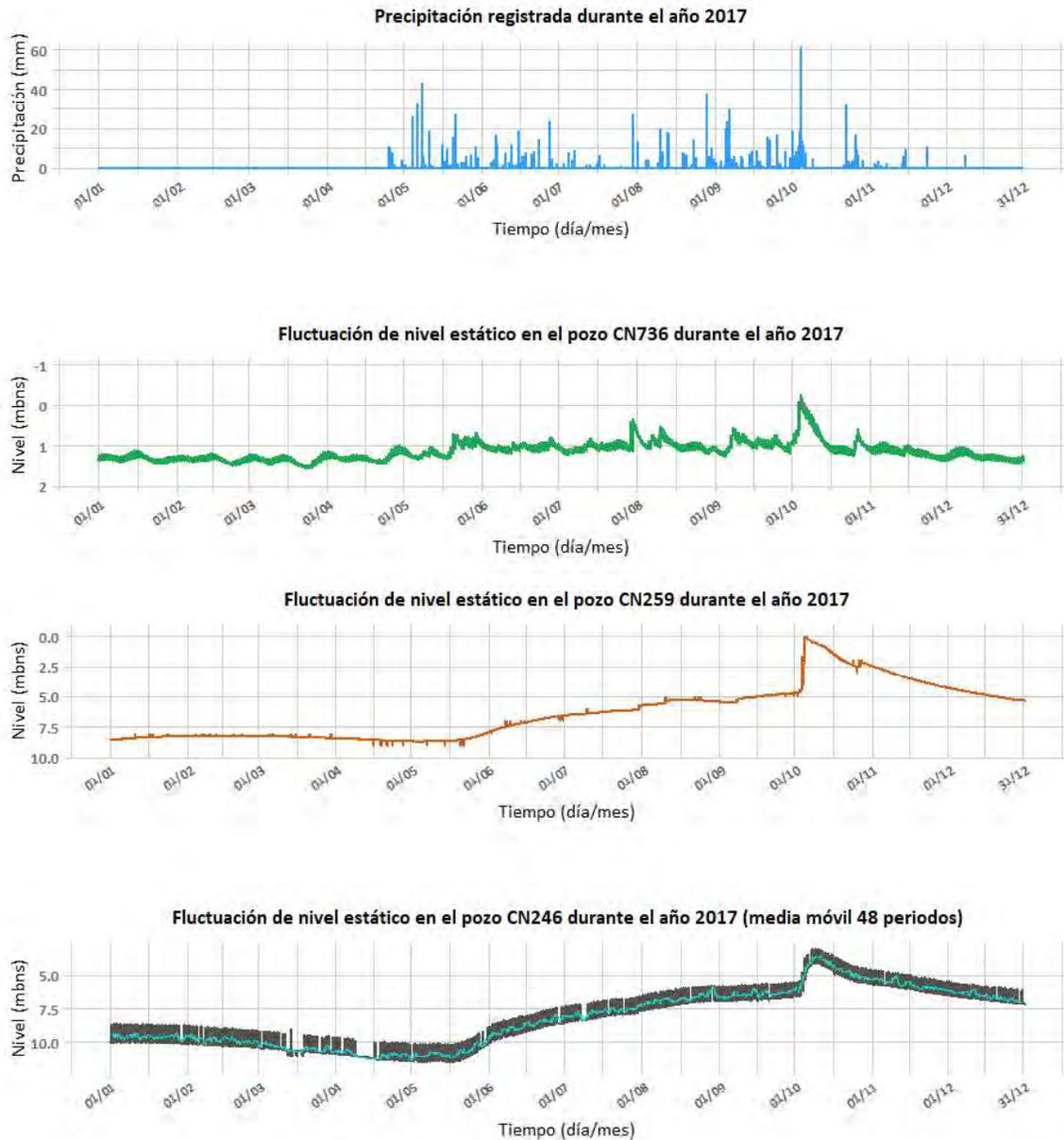


Figura 60 Hidrogramas de los pozos monitoreados durante el año 2017

En el caso de los pozos cuya tendencia no es evidente en los periodos de análisis más amplios se procedió a aplicar la media móvil como método de tratamiento estadístico de los datos. Esta fue aplicada utilizando 48 periodos, es decir el promedio de 48 horas, debido a que elimina de manera satisfactoria el ruido sin suavizar excesivamente la tendencia de los datos de nivel; periodos superiores a este eliminan satisfactoriamente el ruido pero ocultan tendencias que se consideran relevantes para la interpretación. Esto es visible en el hidrograma del

pozo perteneciente a la ASADA (CN-246), en el cual los datos de nivel reflejan los bombeos periódicos que se realizan. En la Figura 60, los datos originales se presentan en gris oscuro y en turquesa los datos una vez aplicada la media móvil de 48 periodos.

## 5.5 Calidad de agua

A continuación, se desarrollarán características físicas y químicas actuales del agua subterránea de este acuífero, así como un análisis de la posible variación temporal, utilizando como línea base existente investigaciones previas.

### 5.5.1 Características físicas

#### 5.5.1.1 Temperatura

Murillo (2007) identificó una variación máxima de 2.4 °C entre las mediciones realizadas en diferentes puntos del acuífero, donde 27.7 °C fue la temperatura mínima registrada y 30.1 °C la máxima, teniendo un valor promedio de 28.8 °C. A partir de las mediciones horarias de temperatura de los pozos CN-246, CN-259 y CN-736 desde el año 2016 al 2019 se tiene que:

Tabla 28 Temperatura del agua subterránea, Playa Panamá

Pozo	Periodo	Temperatura (°C)							Nivel (mbns)	Distancia de la costa (m)
		n	Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo	Promedio	
CN-246	22/6/2016-24/2/2019	23205	28.7	28.7	28.8	0.047	28	29.16	9.5	900 m
CN-259	22/6/2016-20/5/2019	25354	29.4	29.5	29.5	0.018	29	30	7.5	700 m
CN-736	22/6/2016-9/7/2018	19361	30.4	30.3	30.1	0.096	29.74	31.26	1.2	75 m

Esto concuerda con Custodio & Llamas (1996), quienes establecen que, la variación de temperatura de las aguas subterráneas es mínima y generalmente similar a la temperatura atmosférica promedio. La temperatura atmosférica promedio de la región es 27.6 °C.

Se observó que el descenso de la temperatura de las aguas subterráneas de este acuífero presenta gran relación con los meses en que ocurre la infiltración producto de la precipitación (ver figuras Figura 62, Figura 63, Figura 64 y Figura 66). La correlación entre el comportamiento temperatura del agua en el pozo a lo largo de un año completo es inversa al nivel de agua y más significativa que la relación entre la temperatura del pozo y la temperatura atmosférica (ver Figura 61). Para el cálculo de correlación presentado en la Figura 61 se utilizó un rango de 5 meses (1/12/2017-30-4-2018) en los que las 3 variables analizadas poseen menor cantidad de valores atípicos en comparación con el resto del año, para esto se utilizó la correlación de Spearman y Pearson las cuales presentan resultados muy similares como se observa en la figura.

Se identificó que la temperatura promedio parece aumentar en estos tres puntos de monitoreo según la cercanía a la costa, sin embargo, el pozo que presenta una temperatura promedio más cercana al agua del mar de Bahía Culebra, 29.42 °C (CMEMS, 2020) es el pozo CN-259, por lo tanto se considera que existen otros factores que influyen en la temperatura.

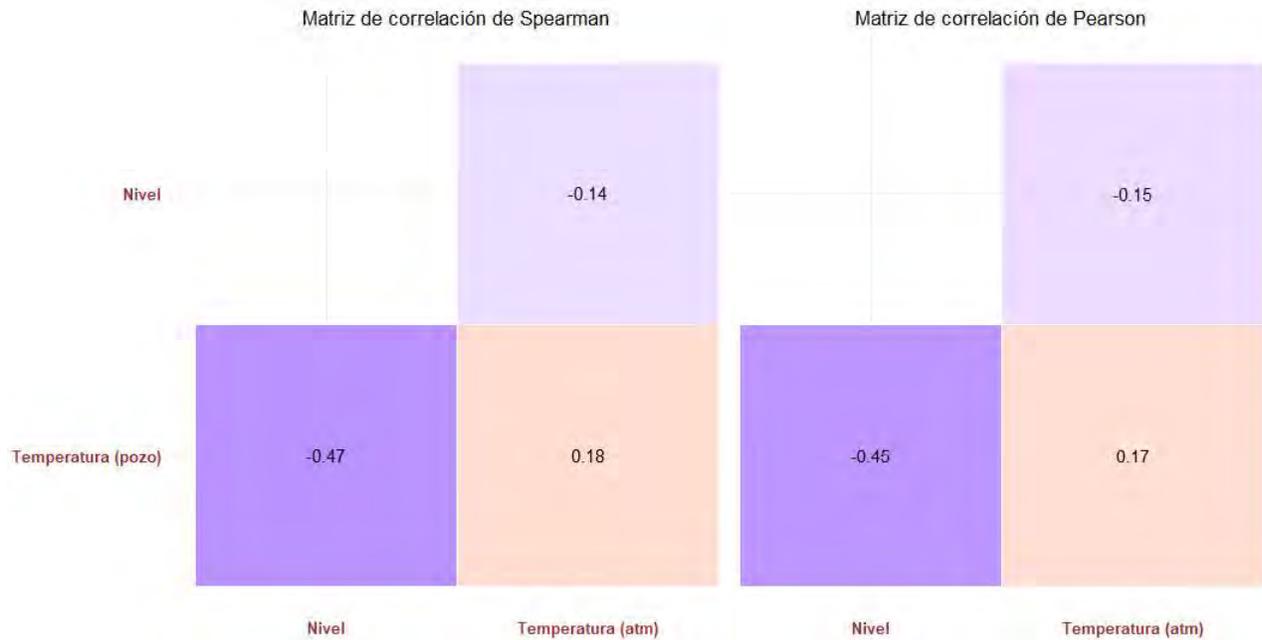


Figura 61 Relación entre la temperatura atmosférica, nivel y temperatura del agua en el pozo CN-736 (n=3412)

En la Figura 62 se presenta el comportamiento de la temperatura del agua en el pozo CN-246 perteneciente a la ASADA de la comunidad a lo largo del año 2017. Este pozo es bombeado regularmente, razón por la cual se utilizó la media móvil de 48 periodos para mejorar la visualización de la tendencia. Es posible observar en este punto que el rango de variación de la temperatura es menor durante la época seca y alcanza su valor más alto en el mes de junio; es durante el mes de agosto que inicia un descenso de la temperatura mayor alcanzando los valores mínimos en el mes de noviembre.

En el registro de temperatura del pozo CN-259, se observa un calentamiento del agua a lo largo del año, este se acentúa al inicio de la época lluviosa y se mantiene constante hasta la fecha del evento meteorológico extremo el Huracán Nate, donde es evidente un enfriamiento de al menos 0.07 °C (ver Figura 63). Esta diferencia en el comportamiento con respecto al pozo CN-246 se debe a que el pozo CN-259 no se encuentra en producción y mantiene un nivel freático más somero a lo largo del periodo.

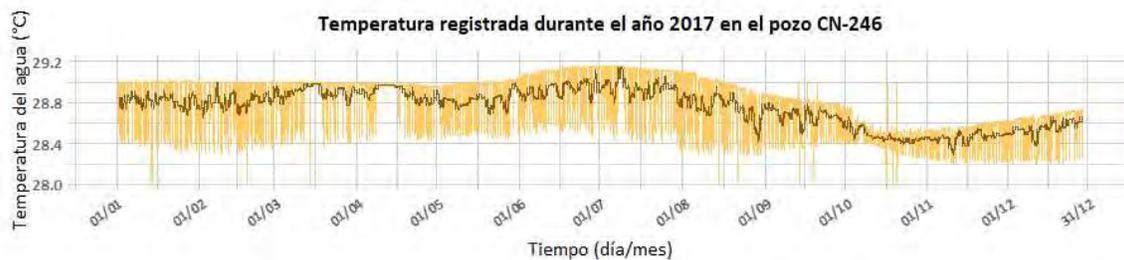


Figura 62 Variación de la temperatura en el pozo CN-246 durante el año 2017

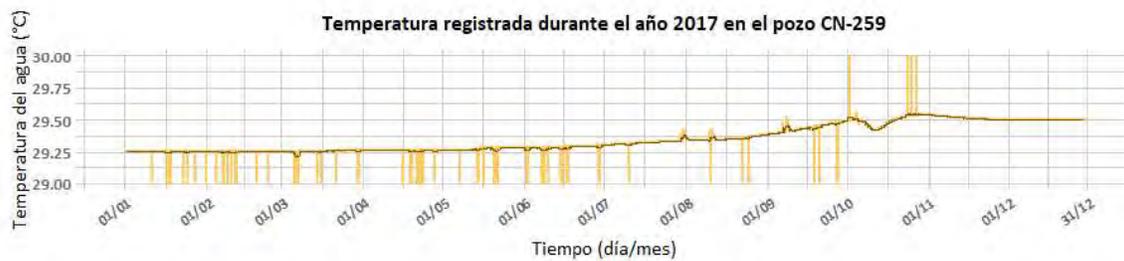


Figura 63 Variación de la temperatura en el pozo CN-259 durante el año 2017

El pozo CN-736 es un piezómetro de investigación que no es bombeado. Sin embargo, por su cercanía con la costa presenta un alto grado de influencia mareal, lo que afecta su registro de temperatura (Ver Figura 64).

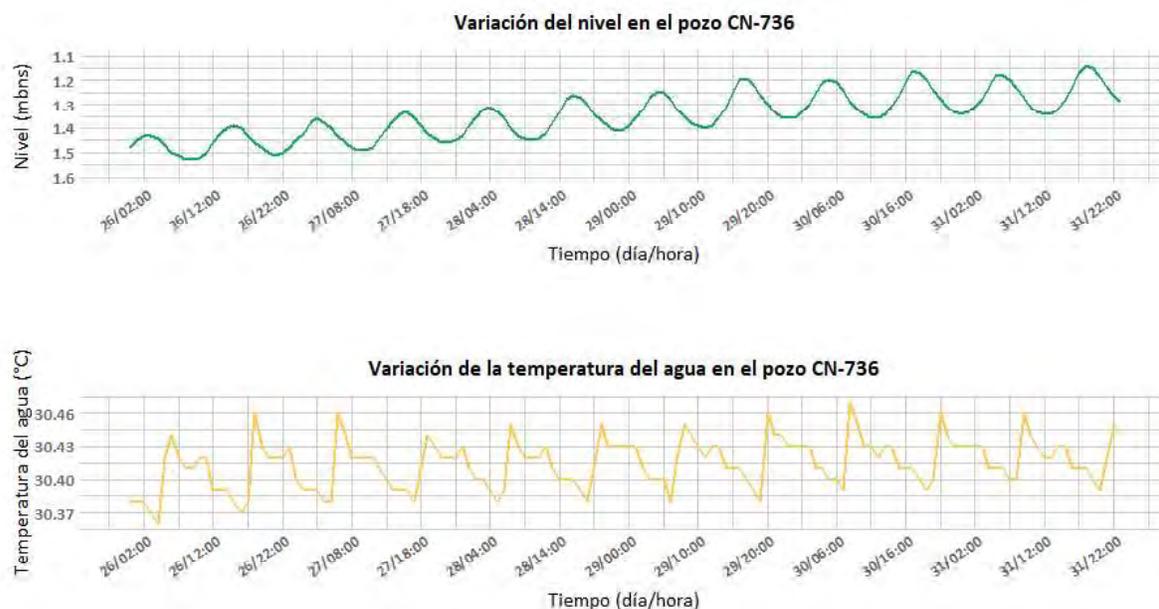


Figura 64 Comportamiento de la temperatura en el pozo CN-736 (26/3/2017-31/3/2017)

Para conocer el nivel de relación entre ambas variables, se procedió a realizar un cálculo de la correlación cruzada entre ambas. Para la aplicación correcta de esta prueba estadística, fue necesario identificar un periodo y escala de tiempo adecuada para tener una serie de datos que posean un comportamiento cercano a la estacionariedad. Se realizaron pruebas con mediciones durante los meses de la época lluviosa y variedad de rangos de tiempo (6, 4, 3, 2 y 1 mes) del año 2017 y 2018.

Finalmente el mes de marzo 2018 fue con el que se obtuvo valores del índice de correlación más alto, esto asociado a que corresponde con el mes en que las mareas de la región tienen mayor intensidad, por ende mayor efecto sobre el acuífero. Además, durante este mes no se registraron precipitaciones lo que disminuye el ruido en la señal de ambas variables producto de otros factores ajenos al efecto de la marea permitiendo visualizar señales de ambas variables con comportamientos uniformes y cercanos a la idoneidad.

A partir de los resultados de este cálculo se identificó que el valor máximo del índice de correlación (índice de correlación= .685) ocurre con un retraso de la temperatura de 6 horas con respecto al comportamiento del nivel (ver Figura 65). La relación entre ambas variables es de carácter positivo, es importante destacar, que esta relación puede ser diferente cuando los ascensos del nivel son producto de otros factores como la recarga por infiltración y no únicamente por la influencia de la marea.

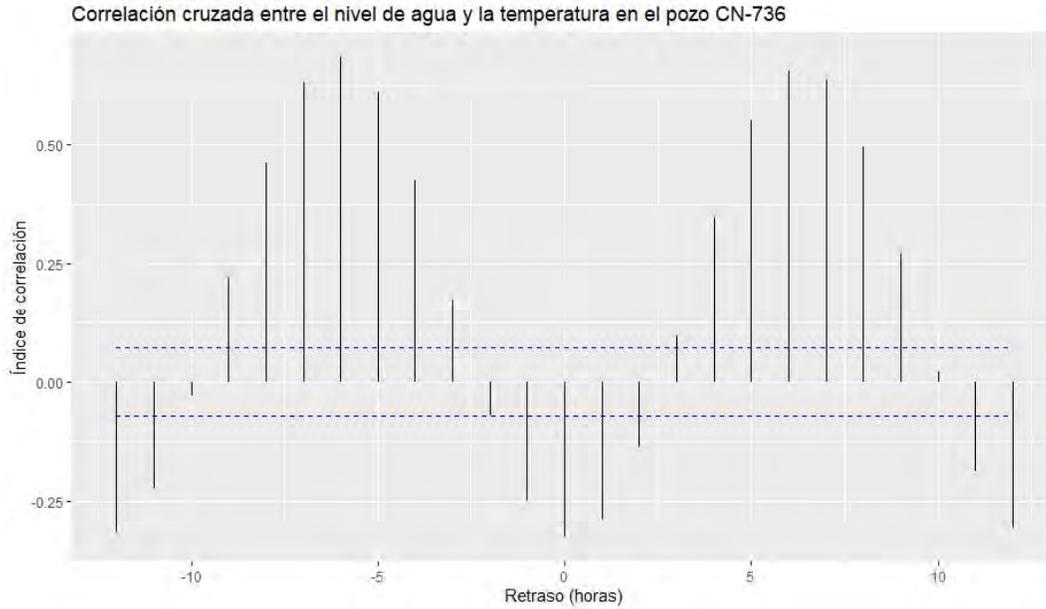


Figura 65 Correlograma entre el nivel y la temperatura del agua en el pozo CN-736 para marzo 2018 (n=744)

Además de ser el más cercano a la costa, es el pozo que presenta las temperaturas más altas y el nivel freático más somero, a tan solo 1.2 m de profundidad. Como se observa en la Figura 66, la tendencia general refleja un calentamiento, según avanza la época seca, alcanzando una temperatura máxima en mayo, posteriormente, junto con la época lluviosa inicia un periodo de enfriamiento hasta alcanzar la temperatura mínima durante el mes de noviembre. Eventos meteorológicos extremos como el Huracán Nate (octubre 2017) tienen impactos considerables sobre la temperatura del acuífero, esto debido a la cantidad de precipitación que se infiltra en periodos de tiempo tan reducidos.

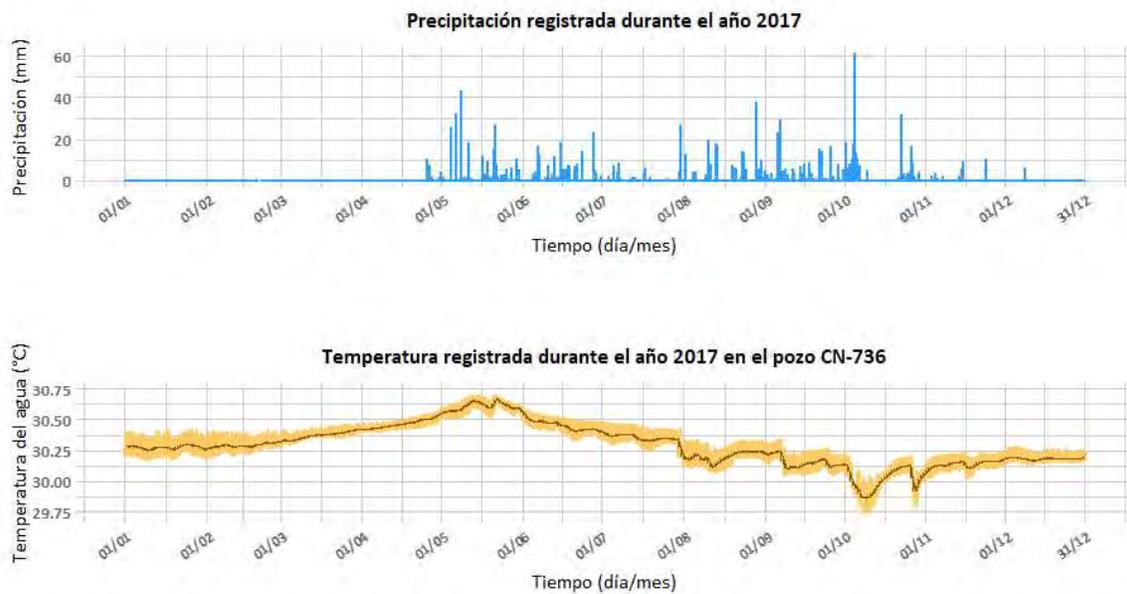


Figura 66 Comportamiento de la temperatura en el pozo CN-736 durante el año 2017

### 5.5.1.2 Conductividad eléctrica, TDS y Salinidad

Custodio & Llamas (1996) definen la conductividad eléctrica como la capacidad del agua para conducir electricidad y es de gran importancia para el estudio de las aguas subterráneas ya que aumenta según la temperatura, el contenido de iones disueltos y la salinidad. Por lo anterior y la practicidad para medirla, la conductividad eléctrica es utilizada como un primer indicador de la calidad y estado del agua subterránea. Esta es directamente proporcional a la totalidad de sólidos disueltos (TDS) medida en mg/L y a la salinidad medida en PSU.

Saha et al. (2008) atribuyen las variaciones de conductividad eléctrica a procesos geoquímicos como el intercambio de iones, evaporación, disolución de sedimentos y a la infiltración de la precipitación. Además, Rodríguez et al. (2010) mencionan también que la variación de la conductividad eléctrica del agua subterránea de un acuífero puede estar condicionada por el caudal de sus cuerpos de agua superficiales, el uso de suelo, el riego y focos de contaminación presentes en su cuenca. Para los acuíferos costeros, la dinámica debido a su conexión con el mar o esteros también puede causar variaciones en este parámetro (Robinson et al., 2007; Xin, Wang, Lu, Robinson, & Li, 2015).

En el registro histórico de mediciones de conductividad eléctrica del agua tanto en investigaciones anteriores y expedientes de pozos de agua de SENARA se tienen 22 datos que poseen un rango de conductividad eléctrica entre 106 y 492  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para un promedio de 408.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Además, se cuenta con los datos del monitoreo semestral del LNA en el pozo CN-156 (Figura 67) en el cual se tiene un promedio de 423.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las mediciones y un comportamiento constante hasta enero 2017 donde se observa un aumento.

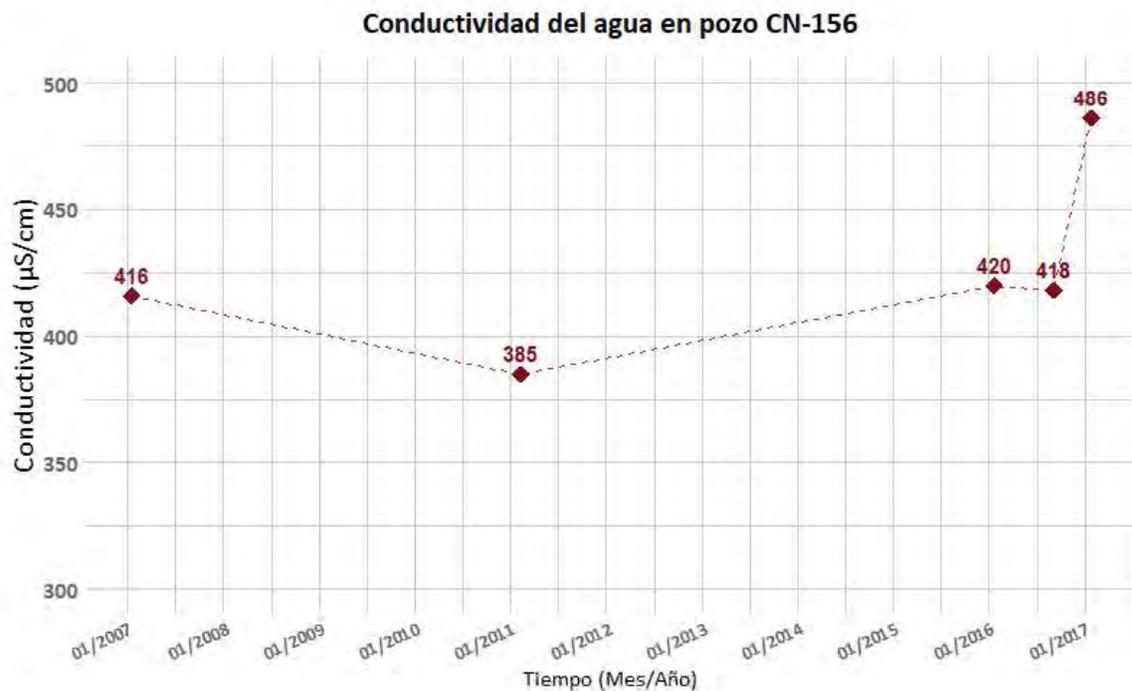


Figura 67 Registro de monitoreo del pozo CN-156, conductividad eléctrica del agua

El pozo CN-259 cuenta con monitoreo a escala horaria de la conductividad eléctrica del agua, en este se observa que en un ciclo hidrológico la conductividad eléctrica presenta su valor más alto durante los meses de enero y febrero (Figura 68). Conforme inicia la transición a la época lluviosa su valor comienza a disminuir hasta alcanzar

el mínimo durante el mes de octubre. Se tiene que el valor promedio de conductividad eléctrica medido para el pozo entre el 1/1/2018 y el 20/5/2019 corresponde con 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Como se ha indicado anteriormente, precipitaciones fuertes en lapsos cortos pueden generar ascensos fuertes en el nivel freático, estos pueden generar variaciones en la conductividad eléctrica debido a la dilución de la concentración de las sales disueltas en el agua (Kefford et al., 2007) o un aumento en la concentración debido al aporte de sales.

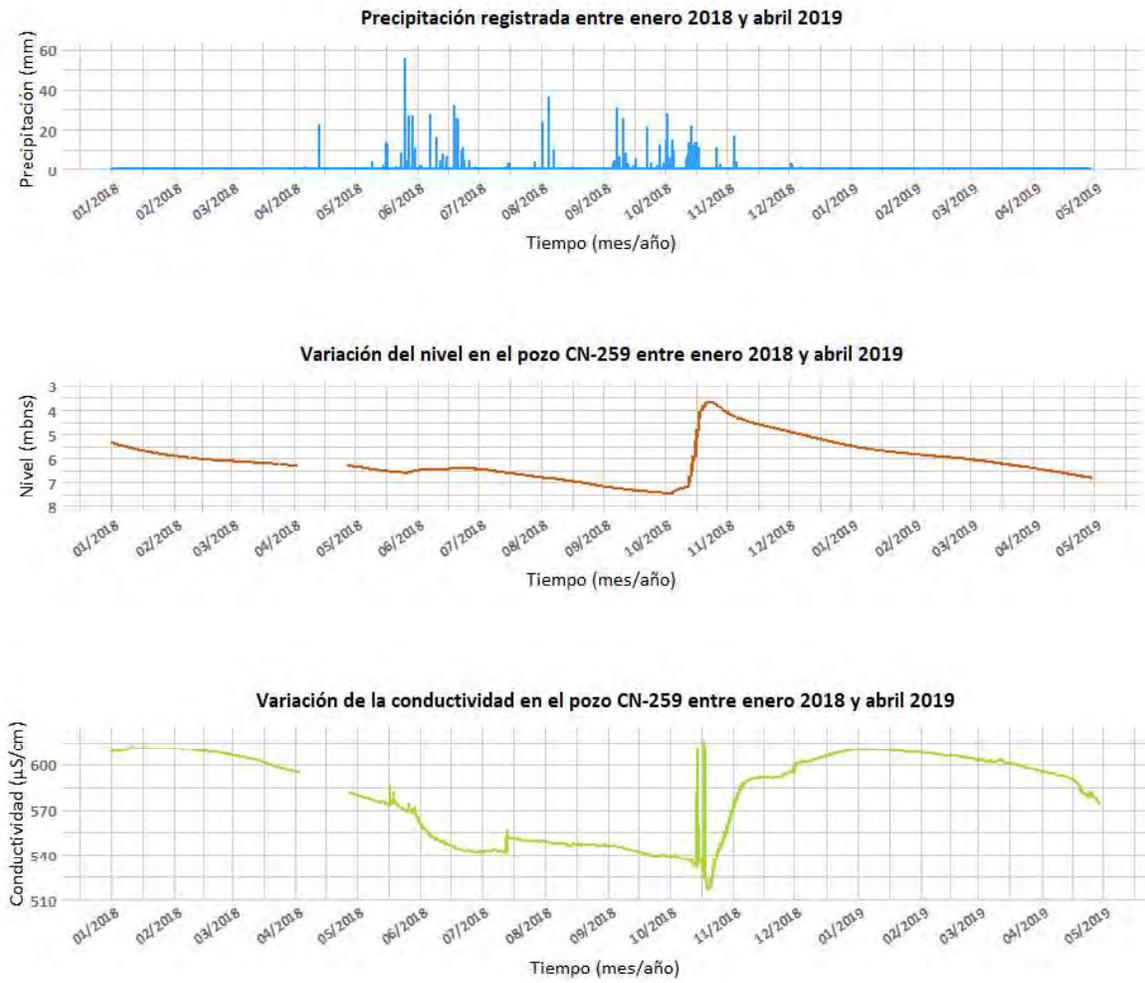


Figura 68 Variación del nivel y la conductividad en el pozo CN-259, periodo 1/1/2018 - 30/4/2019

En la Figura 69 se presenta el comportamiento de la conductividad eléctrica en el pozo CN-259 durante el Huracán Nate, en esta se identifica un aumento de al menos 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  posterior a las primeras 16 horas de lluvia, luego una disminución en la concentración y luego un nuevo aumento. Posterior a estos dos ascensos abruptos, dos días después del cese de la lluvia, el valor de la conductividad eléctrica se estabiliza hasta recuperar el valor previo al huracán (560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Este incremento en la conductividad eléctrica, tras eventos de precipitación tan intensos, evidencia que hubo un aporte importante de sales disueltas en el agua. Esto podría deberse a que el agua que infiltra se enriqueció en sales disueltas a su paso por la zona vadosa, como lo indican Krupanidhi (1984) y Thayalakumaran et al. (2008). Este fenómeno también se puede observar en otros periodos más prolongados como el mostrado en el mes de octubre y noviembre 2016, entre otros en la Figura 71.

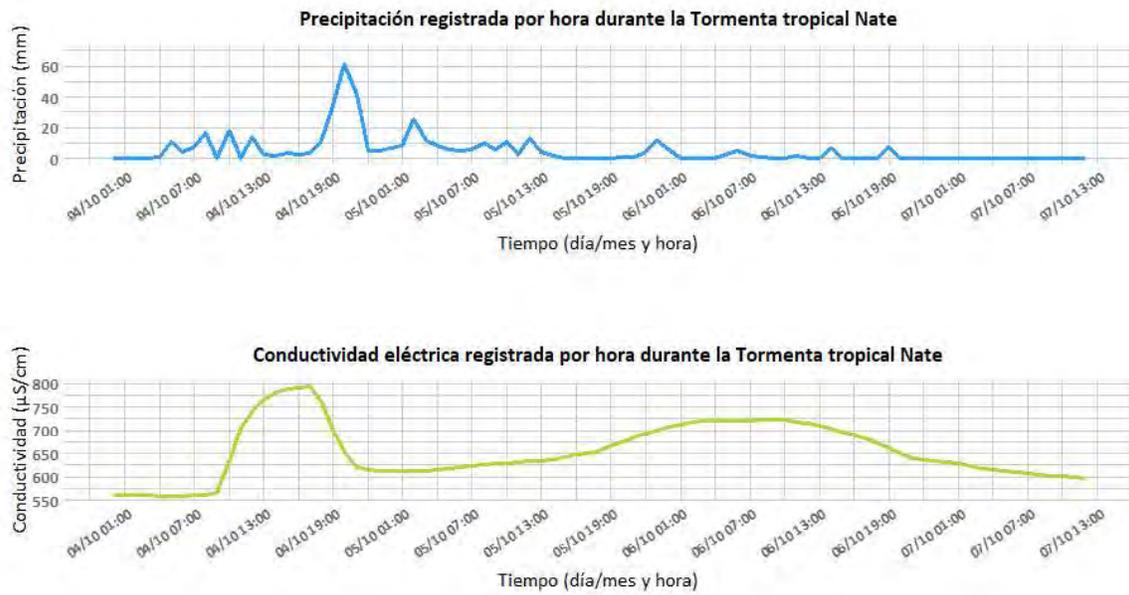


Figura 69 Variación de la conductividad eléctrica en el Pozo CN-259 durante la Tormenta Tropical. Nate

Tanto la salinidad como el total de sólidos disueltos (TDS) presentan una tendencia a lo largo del tiempo prácticamente idéntica a la conductividad eléctrica debido a su relación directa (ver Figura 70) .

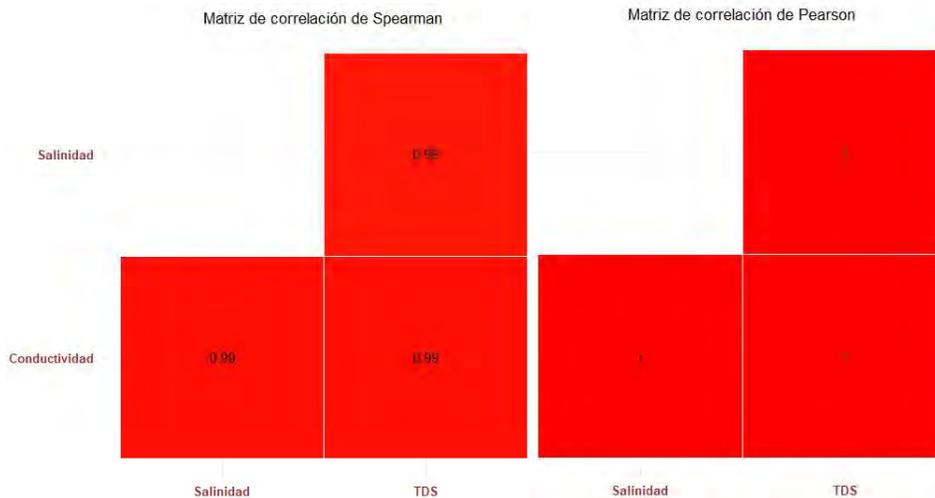


Figura 70 Matriz de correlación de Conductividad, Salinidad y TDS en el pozo CN-259 (n=25358)

En cuanto al TDS en el registro histórico de análisis de calidad de agua del acuífero se tienen 15 mediciones con un valor promedio de 260 mg/L con un mínimo de 171.2 y un máximo de 427 mg/L. Específicamente en el pozo de observación CN-259, se cuenta con mediciones horarias automáticas de este parámetro durante el periodo del 1 de octubre del 2017 hasta el 20 de mayo del 2019. De estas se tiene que:

Tabla 29 Resumen estadístico de las mediciones automáticas, CN-259

Periodo: 22/06/2016- 20/05/2019	Pozo CN-259 (n=25358)						
	Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Desv. Estándar	Mínima	Máximo
<b>Salinidad (PSU)</b>	1.4	0.3	0.3	3.62	1.9	0.25	6.61
<b>Conductividad eléctrica (µS/cm)</b>	2550	608	606	1.10E+07	3313	517.06	11447
<b>TDS (mg/L)</b>	1649	395	0.38	4.66E+06	2159	0.38	7440

Según los datos facilitados por el MIOCIMAR, la salinidad promedio del mar en Bahía Culebra es de 31.9 PSU. Y según las clasificaciones propuestas por Swenson & Baldwin (1965) y Mayer et al. (2005), los resultados presentados para el pozo CN-259, el agua se considera como agua dulce.

Específicamente en el piezómetro de investigación CN-736 ubicado a 75 m de la costa, se tienen valores de conductividad eléctrica y salinidad que, según Blanco-Coronas et al. (2018), son típicos de una zona de mezcla. Estos valores provienen de mediciones automáticas realizadas por sensores de manera horaria, para el periodo especificado a continuación se tienen 19360 mediciones.

Tabla 30 Resumen estadístico de las mediciones automáticas, CN-736

Periodo: 22/06/2016- 9/7/2018	Pozo CN-736 (n=19360)						
	Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Desv. Estándar	Mínima	Máximo
<b>Salinidad (PSU)</b>	7.63	7.62	2.08	15.8	3.977	0.81	31.19
<b>Conductividad eléctrica (mS/cm)</b>	12.91	13.05	4.4	39.85	6.31	1.6	47
<b>TDS (mg/L)</b>	8394	8485	4332	1.68E+07	4103	1039	30607

Como se observa en la Tabla 30 y al compararse con la Tabla 29, los tres parámetros presentados presentan mayor variabilidad y rangos más amplios, lo que podría inducir a pensar en un error de medición o calibración del sensor, sin embargo Blanco-Coronas et al. (2018) detallan que las amplitudes de las fluctuaciones de temperatura y conductividad eléctrica son considerantemente más grandes en la zona de mezcla que en el dominio de agua dulce, como consecuencia de que a mayor variación de la conductividad eléctrica y temperatura según la profundidad, mayor serán las amplitudes de las oscilaciones. Además, estas variaciones tan abruptas se pueden asociar al armado del punto de observación, la ubicación del sensor y la existencia de un posible flujo vertical dentro del punto de observación.

En la Figura 71 se observa el comportamiento de la conductividad eléctrica a lo largo del tiempo y su relación con las variaciones del nivel estático. Es identificable como los periodos de la época seca y menores precipitaciones corresponden con los valores más altos de conductividad. En la Figura 72 se presenta la variación del nivel estático durante tres días producto de la influencia mareal, además, se presenta la variación de temperatura y conductividad eléctrica donde se demuestra que las mareas también influyen en la temperatura y conductividad eléctrica del agua del acuífero.



Figura 71 Variación de la conductividad eléctrica en el pozo CN-736 durante el periodo junio 2016 y julio 2018



Figura 72 Variación de conductividad, temperatura y nivel estático (20 al 22 de marzo 2018)

Como se abarcó en las secciones anteriores, existe un retraso entre la oscilación del nivel de la marea y la oscilación del nivel estático y la temperatura del agua en los puntos de observación. Para determinar la correlación entre el nivel y la conductividad eléctrica fue necesario al igual que con la temperatura, utilizar datos tomados durante la época seca, ya que durante la época lluviosa la recarga por infiltración genera variaciones complejas en la señal. Por esta razón, se utilizó el mismo periodo de datos utilizados para la temperatura del agua ya que el comportamiento y la tendencia son similares.

El resultado de esta prueba se presenta en la Figura 73 a partir de la cual se demuestra que la correlación más alta entre ambas variables (índice de correlación= .591) ocurre cuando la conductividad presenta un retraso de 1 hora con respecto al nivel del agua.

Blanco-Coronas et al. (2018) atribuyen este desfase entre el nivel, la temperatura y la conductividad a que la presión que genera la fluctuación de nivel estático es propagada como una energía que depende de las propiedades del acuífero y de la profundidad a la que se mide, pero la propagación de la salinidad y el calor implican movimiento de masas de agua subterránea sujetos a procesos de advección y difusión-dispersión.

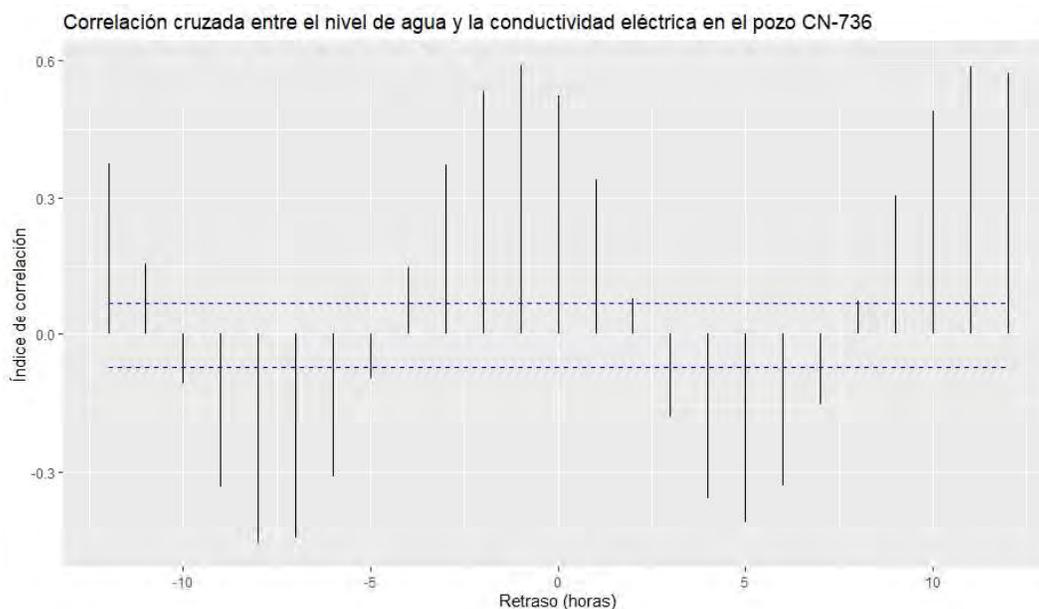


Figura 73 Correlograma entre el nivel y la conductividad eléctrica del agua en el pozo CN-736 para marzo 2018 (n=744)

### 5.5.1.3 pH, Alcalinidad y Dureza Total

El Potencial de Hidrógeno (pH) es utilizado como indicador de la acidez y basicidad del agua, además, según Boulding & Ginn (2004), influye en la solubilidad y reactividad de los componentes químicos presentes en el agua, el intercambio iónico y la hidrólisis. El MINSA (2005), en el Reglamento de Agua Potable en vigencia, recomienda un valor de pH de 6.5 para el agua de consumo humano y un valor máximo admisible de 8.5. Integrando los resultados obtenidos en la investigación de Murillo (2007), Arredondo (2009), el monitoreo semestral del LNA y la presente se tiene un valor promedio de 7.11 (n= 35), valor muy cercano a la neutralidad.

A pesar de esta aparente neutralidad, Murillo (2007) identificó un carácter levemente básico con valores medidos dentro del rango 6.91 a 7.63, esta tendencia a la basicidad es visible analizando la variación del parámetro en el tiempo (ver Figura 74).

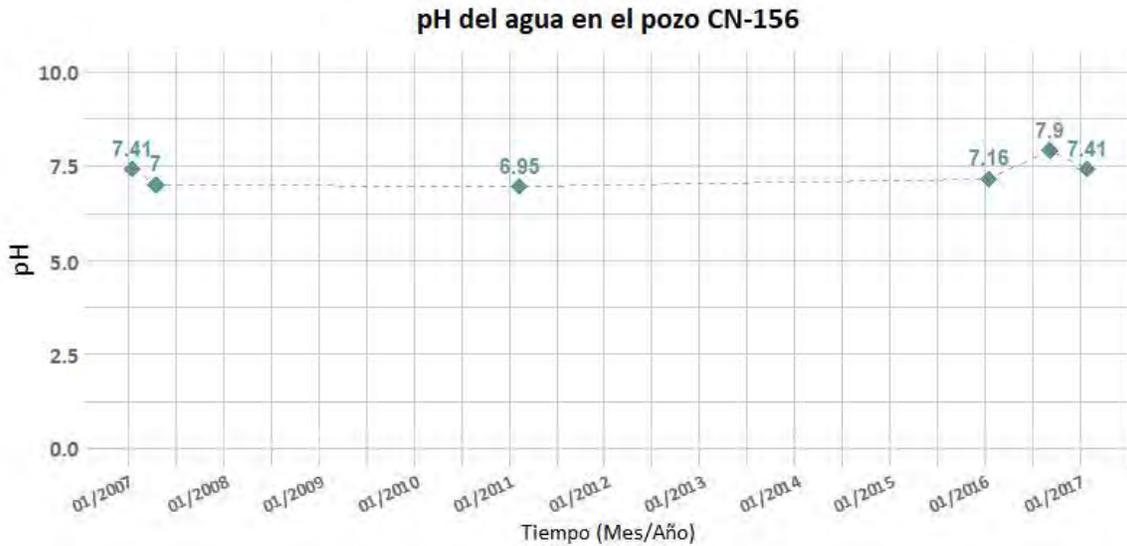


Figura 74 Registro de monitoreo del pozo CN-156, pH del agua

El USGS (2020) define la alcalinidad como la capacidad de amortiguamiento de un cuerpo de agua para neutralizar ácidos y bases y mantener un valor de pH estable. En los resultados de los análisis de las muestras PM1 y PM2, la alcalinidad total es de 243 y 220 mg/L, valores muy similares a los registrados por Murillo (2007) en su investigación.

Con respecto a la dureza total, como lo mencionan Sethy et al. (2016), depende principalmente de la cantidad de cationes metálicos divalentes, de los cuales el  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  son los más abundantes. Se obtuvo un valor de 264 mg/L para PM1 y de 227 mg/L para PM2, los cuales también se encuentran dentro del mismo rango de los resultados de Murillo (2007). Utilizando la clasificación sugerida por el USGS (2020), los resultados de los análisis del registro histórico corresponden con aguas entre duras y muy duras.

De manera similar a la conductividad eléctrica (Figura 67), entre los años 2007 y 2016 se observa un descenso en la alcalinidad y dureza, esto podría estar asociado a un aporte externo de componentes ácidos (ver Figura 75).

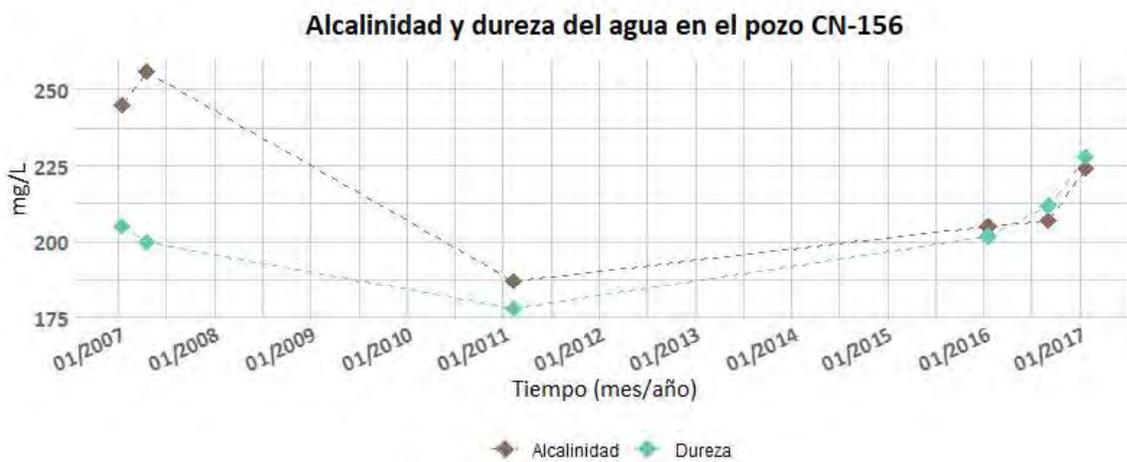


Figura 75 Registro de monitoreo del pozo CN-156, dureza y alcalinidad del agua

En la Figura 76 se presenta el nivel de correlación directa existente entre el pH, dureza y alcalinidad.



Figura 76 Relación entre mediciones de pH, Dureza y Alcalinidad en el pozo CN-156 (n=6)

#### 5.5.1.4 Iones Mayores

La composición química del agua subterránea posee un rol importante en la evaluación de la calidad y potabilidad. En sistemas no contaminados, los iones mayores y la calidad del agua están asociados a la geología, procesos de meteorización, cantidad y calidad de la recarga y la interacción entre el agua y la roca (Sethy et al., 2016). Sin embargo, la contaminación debido a actividades antrópicas y la sobreexplotación del acuífero pueden causar variaciones significativas en la concentración de los iones mayores y un deterioro de la calidad del agua (Ajday & Kazemi, 2014; Karro, 1999).

##### 5.5.1.4.1 Cationes

La concentración de los cationes predominantes en el agua subterránea de este acuífero, según el registro histórico, mantiene el siguiente orden:  $Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} > K^{+}$  (Ver Tabla 31). Los valores de concentración de calcio en el acuífero se encuentran dentro del rango admisible definido por el MINSa (2005) donde se fija un valor máximo admisible de 100 mg/L, además, el rango es concordante con lo registrado en otros acuíferos vecinos como los son Potrero y Brasilito (Monge, 2015).

El magnesio es el segundo más abundante y los valores registrados se encuentran dentro del rango recomendado por el Reglamento de Agua potable (MINSa, 2005), en el cual se tiene un valor recomendado de 30mg/L y un valor máximo admisible de 50 mg/L.

Altas concentraciones de sodio pueden traer consecuencias negativas en la salud humana, aparte de esto, también es importante considerar su concentración cuando el agua tiene un uso agrícola, ya que aguas con altas concentraciones de este ion no son recomendables para riego, debido a que pueden aumentar la dureza de los suelos y disminuir su permeabilidad (Sethy et al., 2016), este catión comúnmente está asociado al catión cloruro (Custodio & Llamas, 1996). Al igual que el catión potasio, los resultados de la concentración de sodio se encuentran dentro de los valores recomendados.

Tabla 31 Concentraciones de cationes según el registro histórico en el pozo Mercedes (CN-156), Playa Panamá

Cación	Promedio (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Reglamento de Agua Potable (MINSA,2005)	
					Valor recomendado (mg/L)	Valor máximo admisible (mg/L)
Ca <sup>+2</sup> (n=8)	47.47	47.9	41.4	54	100	-
Mg <sup>+2</sup> (n=8)	20.32	20.25	18.1	22.7	30	50
Na <sup>+</sup> (n=8)	14.2	14	9.8	19.7	25	200
K <sup>+</sup> (n=5)	0.94	1	0.4	1.5	-	10

En

la

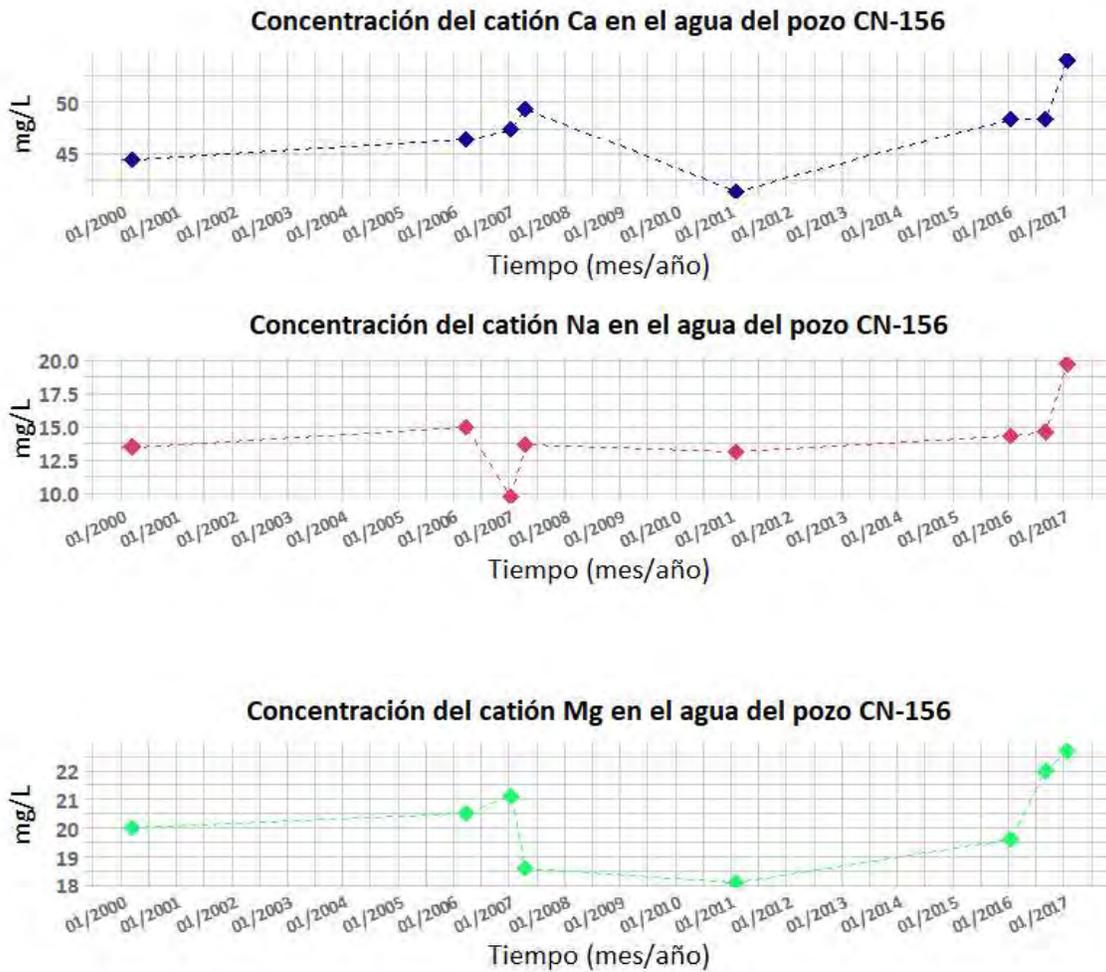


Figura 77 se presenta la variación de las concentraciones medidas de estos iones en el pozo CN-156. Se observa como en el 2011 se presenta el valor más bajo registrado desde el año 2000 del calcio y el magnesio y, posteriormente, inicia una aparente tendencia a su incremento, coincidente con la tendencia observada en la conductividad, alcalinidad y dureza.

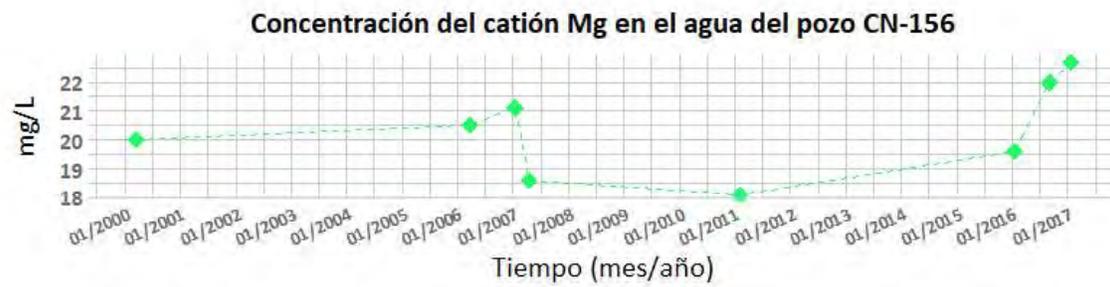
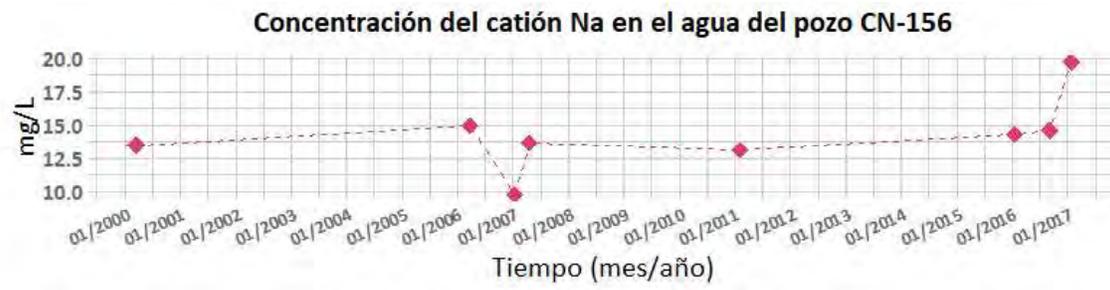
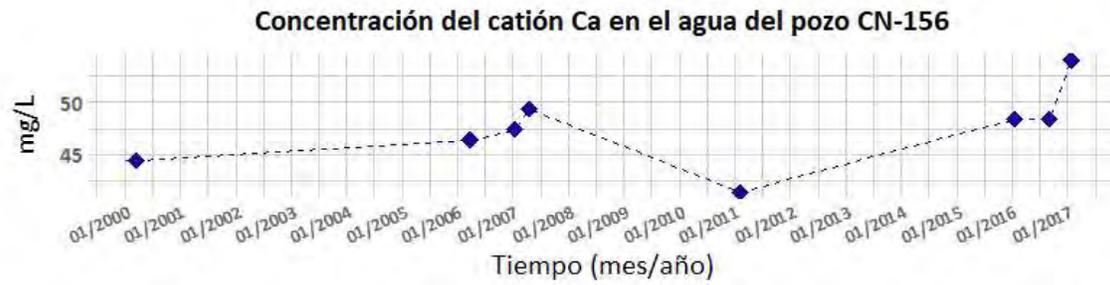


Figura 77 Registro de monitoreo del pozo CN-156, concentración de cationes en el agua

Los análisis más recientes disponibles para esta investigación corresponden con las muestras PM-1 y PM-2 tomadas en julio del 2019 en el pozo de la ASADA y un pozo privado, de ambos análisis resultaron valores que se encuentran muy cercanos al promedio del registro histórico presentado anteriormente (ver Tabla 32) .

Tabla 32 Resultados del muestreo de Julio 2019, Playa Panamá

Cationes (mg/l)	30/7/2019	
	PM1	PM2
Ca <sup>+2</sup>	63.3	55.60
Mg <sup>+2</sup>	25.7	21.39
Na <sup>+</sup>	17.4	15.43
K <sup>+</sup>	0.18	0.17

#### 5.5.1.4.2 Aniones

La concentración de los aniones predominantes en el agua subterránea de este acuífero, según el registro histórico, mantiene el siguiente orden: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. El ion bicarbonato es consistentemente el más abundante con concentraciones en el rango de 182 a 339 mg/L y con un valor promedio de 258.87 mg/L. A diferencia de los cationes, la dominancia entre los iones de estos análisis es más variable, especialmente entre sulfato y cloruro.

El ion cloruro es el que posee mayor estabilidad química de los aniones, no está sujeto a procesos de disolución o precipitación, además, al ser el ion más abundante en el agua salina se convierte en un buen indicador a utilizar en el análisis de la calidad (Castillo & Morell, 1988).

La abundancia y variación del sulfato según CWERC (2014) puede estar asociada a procesos bacteriológicos o producto de infiltración de aguas residuales o desechos industriales con altas concentraciones de este ion. En cuanto a la proveniencia del ion Nitrato, los autores la asocian a erosión de depósitos geológicos, lixiviación de tanques sépticos, aguas residuales y más probablemente relacionado a fertilizantes utilizados en agricultura.

Según el registro histórico, todos los anteriores se encuentran dentro del rango de potabilidad del reglamento vigente.

Tabla 33 Concentraciones de aniones según el registro histórico en el pozo Mercedes (CN-156), Playa Panamá

Anión	Promedio (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Reglamento de Agua Potable (MINSAL, 2005)	
					Valor recomendado (mg/L)	Valor máximo admisible (mg/L)
Cl <sup>-</sup> (n=8)	6.51	6.47	2.94	12.4	25	250
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (n=8)	7.16	6.16	3.64	15.09	25	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (n=8)	3.92	3.99	1.53	6.84	25	50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (n=8)	228	226	186.8	275.7	-	-

En la Figura 78 se presenta la variación temporal de las concentraciones de los aniones en el pozo CN-156, utilizando mediciones periódicas, en este se puede observar un aumento considerable en las concentraciones del sulfato y el nitrato y una disminución del bicarbonato, esto podría asociarse a la infiltración de aguas contaminadas asociadas a actividades antrópicas. En los años posteriores se estabilizaron las concentraciones y a partir del 2016 se identifica una tendencia al aumento.



Figura 78 Registro de monitoreo del pozo CN-156, concentración de aniones en el agua

En las muestras PM-1 y PM-2, que corresponden con los análisis más recientes, se obtuvieron concentraciones que se encuentran dentro del rango histórico y cercanas a sus promedios o mediana, sin embargo, para el caso del nitrato ambas presentan valores superiores a su promedio. A pesar de ser una variación pequeña, es importante destacar que la muestra PM1 fue tomada en un punto de menor altitud y más cercanía a la costa.

Tabla 34 Resultados del muestreo Julio 2019

Anión (mg/l)	30/7/2019	
	PM1	PM2
Cl <sup>-</sup>	7.5	5.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11.8	5.8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6.3	5.2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	296	269

#### 5.5.1.4.3 Índices Hidrogeoquímicos

Estas relaciones entre los iones disueltos en un agua pueden guardar relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores o incluso indicar una característica específica del agua (Custodio & Llamas, 1996). Murillo (2007) utilizó índices geoquímicos para caracterizar hidrogeoquímicamente el acuífero. A continuación, se presenta la variación temporal de los índices relevantes en el pozo CN-156 durante el periodo de marzo del año 2000 al 2017 utilizando los resultados del monitoreo del LNA (ver Tabla 35).

Según los rangos típicos de la relación rMg/rCa, establecidos por Castillo & Morell (1988) y Custodio & Llamas (1996), las aguas continentales tienen un valor entre 0.3 y 1.5 y para el agua de mar cercano a 5. Tomando en consideración lo anterior, no se identifica una variación en el valor de esta relación a través del tiempo que evidencie alguna interacción con la zona de mezcla o alguna anomalía (ver Tabla 35).

Según Kumar et al. (2009), la meteorización de silicatos provoca valores de la relación rNa/rCl superiores a 1. En este punto se observa que, desde marzo del año 2000, esta relación presenta un aumento considerable hasta enero 2007, posteriormente, se tienen valores menores. Este “exceso” de sodio con respecto al cloruro se asocia a la meteorización de silicatos en esta área.

Los resultados del monitoreo en este pozo, históricamente (ver Tabla 35), se encuentran dentro del rango típico para aguas dulces, entre 0.001 y 1; para el agua marina se tiene un rango típico entre 0.02-0.025 (Custodio & Llamas, 1996).

Mtoni et al. (2013) definen que relaciones rCl/rHCO<sub>3</sub> menores a 0.5 corresponden con aguas sin efectos de salinización, 0.5-6.6 corresponden con aguas con un efecto moderado y mayor a 6.6 para aguas fuertemente afectadas. Este pozo, según los resultados obtenidos no está afectado por salinización (ver Tabla 35).

La relación rSO<sub>4</sub>/rCl suele utilizarse para identificar procesos de intrusión salina ya que el sulfato tiene una tendencia constante en aguas poco salinas (Custodio & Llamas, 1996). Sin embargo, en este punto durante el periodo de análisis la concentración de sulfato es variable, lo que genera dificultad para su interpretación ya que estas pueden estar relacionadas a procesos de reducción de sulfatos o a aportes externos debido a la mezcla de agua superficial. Los resultados presentados en la Tabla 35 sugieren que la variabilidad podría estar asociada a aportes externos ya que son coincidentes con los aumentos de concentración del ion cloruro y nitrato.

El índice de desequilibrio entre cloruros y alcalinos o el índice de cambio de bases (ICB) indica el sentido e intensidad de los procesos de intercambio iónico (Castillo & Morell, 1988). Custodio & Llamas (1996) indica que un aumento del índice se debe a endurecimiento y una disminución indica un ablandamiento. Se observa un ablandamiento del agua en este punto desde marzo 2000 hasta mayo 2007, posteriormente, hay un endurecimiento que parece haberse estabilizado posterior a enero 2016 (ver Tabla 35).

Tabla 35 Variación temporal de los índices hidrogeoquímicos, CN-156 (Mercedes)

Fecha	rMg/rCa	rNa/rCl	rK/rNa	rCl/rHCO3	rSO4/rCl	ICB	ICB-
Mar-00	0.75	1.66	0.044	0.09	0.64	-0.73	-0.06
Mar-06	0.74	4.00	0.039	0.04	0.56	-3.16	-0.11
En-07	0.74	5.07	0.024	0.02	1.64	-4.19	-0.08
May-07	0.63	5.99	0.065	0.02	0.76	-5.38	-0.12
Feb-11	0.73	4.55	0.036	0.04	0.75	-3.72	-0.15
En-16	0.67	3.00	-	0.06	0.58	-2.00	-0.12
Set-16	0.76	2.91	-	0.06	0.63	-1.91	-0.12
En-17	0.70	3.60	-	0.06	1.32	-2.60	-0.15

#### 5.5.1.4.4 Diagrama Piper

En este tipo de diagramas quedan reflejadas mezclas de aguas, precipitaciones, disoluciones, modificaciones, entre otras (Custodio & Llamas, 1996). Para este se integraron todos los datos disponibles a la fecha y se agruparon según el punto de monitoreo resultando en el diagrama presentado en la Figura 79.

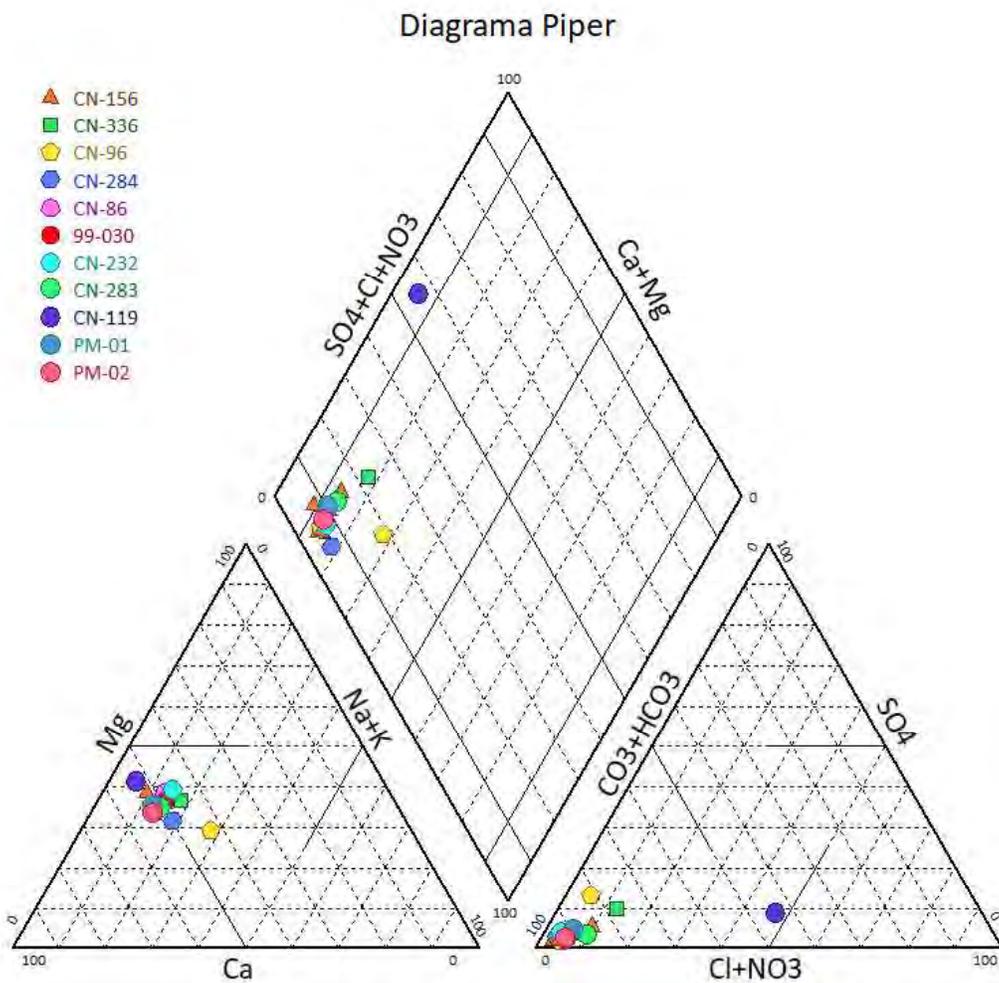


Figura 79 Diagrama Piper del registro histórico de análisis de iones mayores, Playa Panamá

A partir del análisis de este diagrama y la información presentada previamente, se identificó que los resultados indiferentemente de la distribución espacial y temporal presentan la uniformidad necesaria para identificar que corresponden con un único acuífero, el cual, de manera general, basado en el análisis de sus iones mayores, ha presentado poca variación en su composición, manteniendo la caracterización realizada por Murillo (2007) como aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas.

El único punto en el cual se pierde de manera significativa esta uniformidad corresponde con el análisis realizado en el pozo CN-119, el cual posee una concentración de ion cloruro considerablemente alta (114 mg/l). Además de alguna posible alteración en el proceso de toma de la muestra o su análisis, este valor anómalo podría estar asociado a su ubicación.

Este se encuentra en un sector del acuífero donde la extensión del aluvión es pequeña y a pocos metros de la costa, su relación  $rCl/rHCO_3$  es igual a 1.086 el cual se encuentra dentro del rango que Mtoni et al. (2013) asocia a efectos moderados de salinización. Lo que explicaría que en el diagrama de Piper se ubique en una zona típica de aguas de mezcla o con interacción con agua de mar (ver Figura 4). Por la concentración de los iones, esta muestra de agua se acerca a una composición clasificable como clorurada-bicarbonatada cálcica.

#### 5.5.2 Características microbiológicas

Además de la información recopilada por Murillo (2007), se tuvo acceso al monitoreo que realiza de manera periódica el LNA en el pozo CN-156, el cual desde el año 2015 presenta resultados negativos de coliformes fecales y *Eschericia coli*, lo que implica potabilidad desde el aspecto microbiológico, sin embargo, este no se encuentra en producción. Actualmente, el único pozo de abastecimiento público que se encuentra en producción es el perteneciente a la ASADA, que posee sistema de cloración y es monitoreado periódicamente.

### 5.6 Vulnerabilidad del acuífero

En investigaciones previas, el principal aspecto analizado de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero ha sido la intrusión salina. Utilizando sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas, Murillo (2007) identificó que en ese momento la zona de dispersión salina se encontraba a partir de una profundidad entre 3 a 7 m y se adentraba hasta 70 m en el continente. A partir de análisis físico químicos y la medición de conductividades, descartó una afectación del acuífero por intrusión salina, asimismo, dos años después Arredondo (2009) también lo descartó.

En la presente investigación se presenta evidencia suficiente de que el piezómetro CN-736 ubicado a 75 m de la costa presenta conductividades típicas de una zona de dispersión por lo cual se considera que la zona de dispersión salina no ha sufrido una variación significativa, además los resultados de los análisis físico-químicos no presentan indicios de intrusión salina en los pozos de abastecimiento público y monitoreados. Sin embargo, se considera necesario profundizar y aplicando análisis químicos de iones menores y traza así como métodos geofísicos en investigaciones futuras.

Para determinar la vulnerabilidad de acuífero se aplicó el método DRASTIC, para esto se generaron mapas para cada uno de los siete factores. Estos se adicionan para generar el mapa del índice DRASTIC tanto para

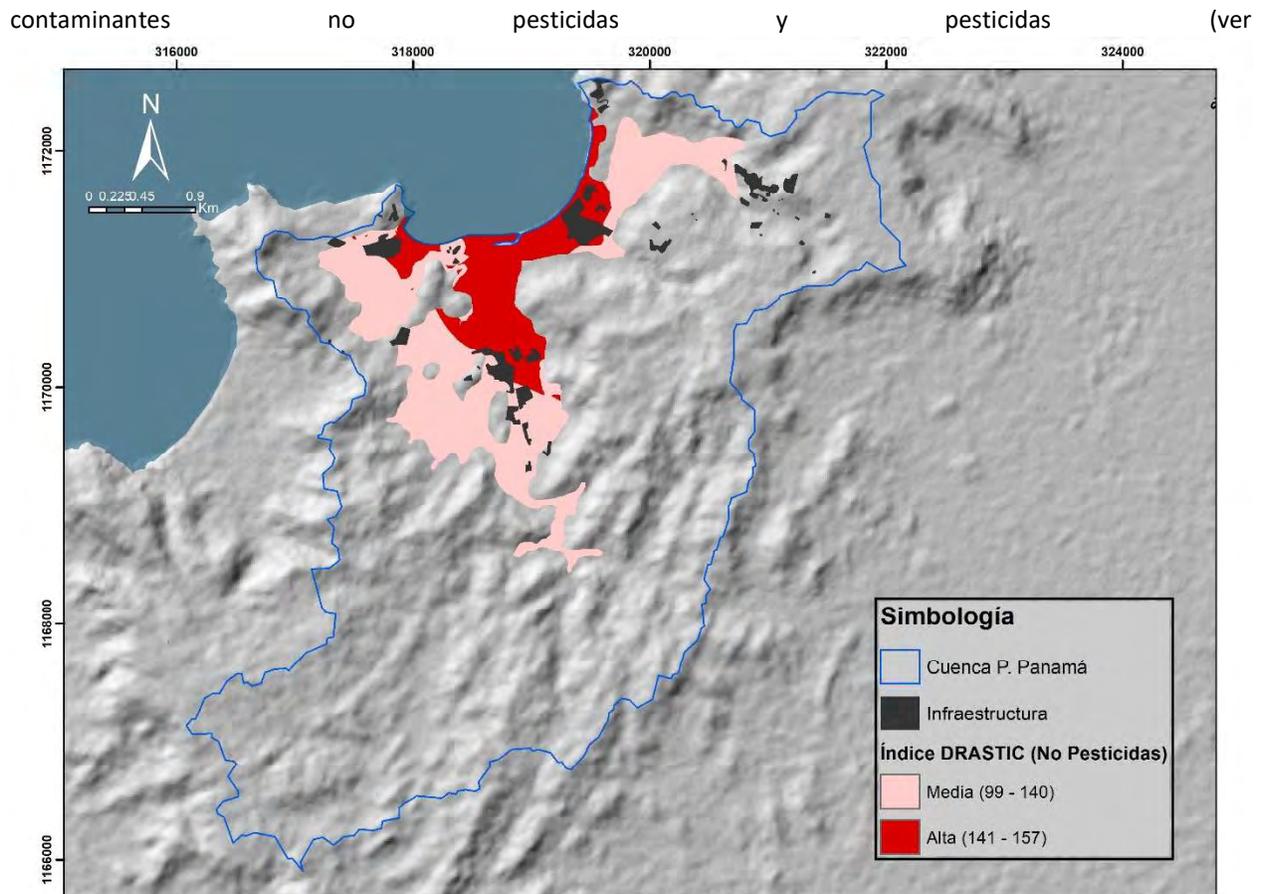


Figura 80 y Figura 81). En ambas figuras es posible visualizar que las tendencias espaciales de los factores de profundidad del agua subterránea y topografía son las que poseen mayor influencia en el resultado final. El resultado obtenido tras la aplicación del método DRASTIC es concordante con el método GOD aplicado por Arredondo (2009).

El índice se clasificó según lo presentado en la Tabla 14 para representar la vulnerabilidad relativa del acuífero de los depósitos aluviales de la cuenca. Las zonas identificadas como de vulnerabilidad relativa media se encuentran en los límites laterales de los depósitos recientes, es decir, las áreas que poseen mayor altura sobre el nivel del mar donde la profundidad del agua subterránea es mayor. Esta representa los rangos entre 107-140 para pesticidas y 99-140 para otros contaminantes.

Las zonas que califican como de vulnerabilidad relativa alta, para ambos tipos de contaminantes, son justamente por las características del terreno y atractivo turístico donde existe mayor infraestructura; en la cuenca predomina el desarrollo turístico como hoteles y restaurantes, por lo tanto, es importante se apliquen medidas de gestión ambiental preventivas, como un manejo riguroso de las aguas residuales y desechos sólidos.

Es importante mencionar que en las áreas próximas a la línea de costa existen dos riesgos: primero por contaminación por infiltración de contaminantes y segundo por intrusión de la zona de dispersión salina por sobre uso, uso incorrecto o carencia de protección en pozos artesanales y perforados.

Tras un análisis e inventariado de la infraestructura presente en la cuenca, además de las casas de habitación se tiene registro de cinco hoteles, nueve casas o villas de alquiler vacacional, seis restaurantes, una escuela y otros comercios como supermercados y otros.

Debido a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero y la cantidad de habitantes y afluencia de turistas es esencial un manejo correcto de los residuos sólidos (basura, entre otros) y residuos líquidos (aguas pluviales y residuales). Por lo tanto, posibles fuentes de contaminación como lo son tanques sépticos de casas de habitación o de alquiler vacacional, las plantas de tratamiento de hoteles, pozos y desagües de comercios deben ser regulados y seguir medidas de prevención y buenas prácticas ambientales.

En el Anexo 12 se presenta el mapa y el listado de los comercios identificados y existentes a la fecha de elaboración del presente trabajo. En este listado se presenta las coordenadas de su ubicación y nombre comercial.

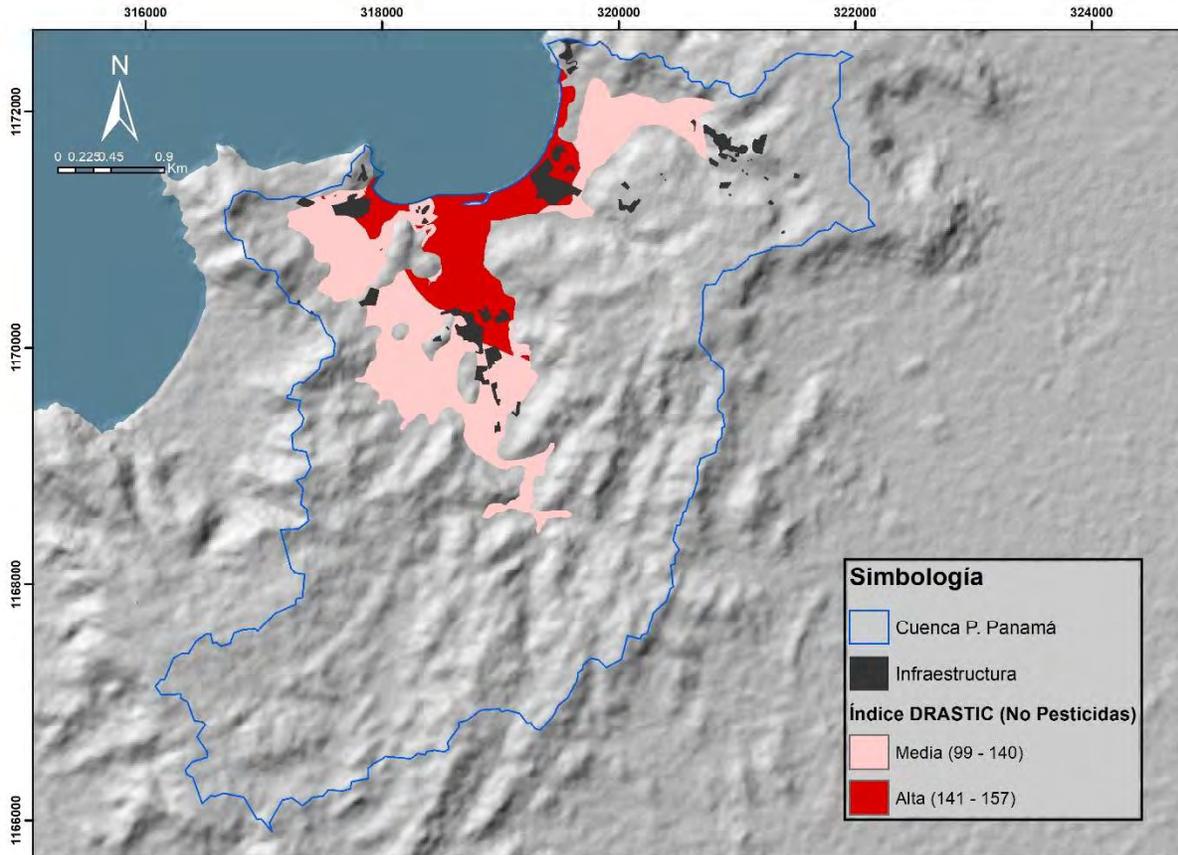


Figura 80 Mapa de vulnerabilidad relativa, Playa Panamá

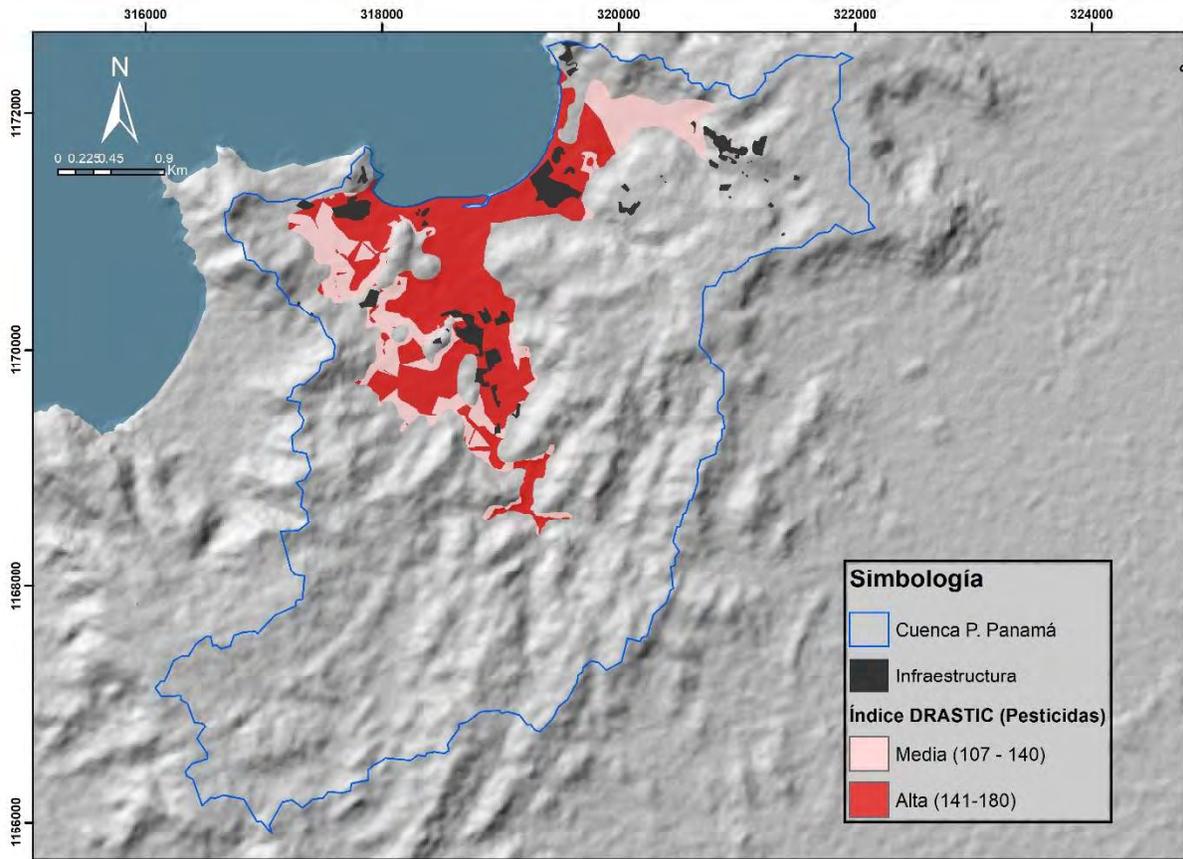


Figura 81 Mapa de vulnerabilidad relativa (pesticidas) Playa Panamá

## 6 Sistema Acuífero El Coco

### 6.1 Marco Hidrogeológico

Dentro de la cuenca se encuentran aflorantes las unidades ígneas pertenecientes al Complejo de Nicoya y los depósitos recientes aluviales, coluviales y de playa.

#### 6.1.1 Características de las unidades hidrogeológicas identificadas

##### 6.1.1.1 Unidad Hidrogeológica C-2: Complejo de Nicoya (Kn)

Como se mencionó anteriormente para el acuífero Playa Panamá, esta formación geológica ha sido considerada de bajo potencial acuífero por investigaciones previas en la región y localmente por Gómez (2005).

Su capacidad acuífera no se considera nula debido a que, como lo menciona Gómez (2005), los primeros cinco a quince metros de esta litología se encuentran altamente fracturados y meteorizados lo que les brinda capacidad acuífera. Posterior a estos primeros metros, la unidad se encuentra sana y poco fracturada reduciendo cada vez más su capacidad de almacenamiento y transmisión.

Se considera que localmente esta formación corresponde con un acuífero secundario o acuitardo, capaz de recargar el acuífero principal de la cuenca mediante recarga lateral. Existen pozos privados que, según su expediente de concesión, extraen de esta unidad entre 0.5 y 5 l/s.

##### 6.1.1.2 Unidad Hidrogeológica C-1: Depósitos recientes

Constituidos por los depósitos aluviales, coluviales y costeros de la cuenca en estudio, mayoritariamente compuestos por gravas y arenas de composición y textura homogénea, también, en los expedientes de perforación de pozos, se describen capas de arcillas café relacionadas con la erosión de las partes altamente meteorizadas del Complejo de Nicoya (Gómez, 2005).

Gómez (2005) considera esta unidad como el acuífero principal de la cuenca cuya recarga ocurre de manera directa a través de la infiltración e indirecta proveniente del nivel fracturado y meteorizado del Complejo de Nicoya.

#### 6.1.2 Geometría del acuífero principal (C-1)

Los depósitos recientes son el acuífero principal debido a su capacidad acuífera demostrada. Su límite inferior es el basamento regional, los basaltos del Complejo de Nicoya y sus límites laterales son los basaltos y los intrusivos del Complejo de Nicoya, la descarga ocurre principalmente en el Océano Pacífico (Gómez, 2005). La autora establece que es de tipo libre y posee un espesor promedio de 15 m. Es importante resaltar que el modelo presentado por Gómez (2005) fue validado mediante una campaña de métodos geofísicos.

Considerando las condiciones topográficas, morfología de la cuenca y concentración de asentamientos humanos, se puede dividir en 3 sectores, izquierdo central y derecho.

El sector izquierdo abarca aproximadamente el 35% de la cuenca y la quebrada Alcornoque es su principal cuerpo de agua superficial, el cual posee dirección predominante noreste, al igual que la dirección de flujo subterráneo inferida y representada en el perfil LM (Figura 83); posee un gradiente hidráulico aproximado de 0.0012. El máximo espesor conocido es de 25 m registrado en el pozo CN-311 (ubicado en la parte central del sector) y disminuye según su cercanía con los límites laterales del acuífero.

El sector central abarca aproximadamente el 55% de la cuenca y posee un gradiente hidráulico promedio de 0.006, en este se encuentra el principal cuerpo de agua superficial de la cuenca, la quebrada San Francisco. Esta posee dirección noroeste, la cual coincide con la inferida para el flujo de agua subterránea. Como se observa en el perfil NW (Figura 83), su espesor es variable con un máximo conocido de 35 m registrado en el pozo CN-162. En este se encuentra la mayor cantidad de pozos y los caudales de extracción conocidos más altos, esto está relacionado con que es en esta área de la cuenca donde existe mayor desarrollo urbano y comercial.

Por último, el sector derecho, representa aproximadamente el 10% de la cuenca, posee un máximo espesor conocido de 10 m y es donde se tiene una menor cantidad de pozos registrados, por lo tanto, limita el conocimiento de su verdadera capacidad acuífera y características, se estima un gradiente hidráulico promedio de 0.006.

El flujo general o regional se presenta en la Figura 82, debido a la geometría del acuífero, su gradiente hidráulico tan pequeño y heterogeneidad del paleo relieve de su límite inferior (como se observa en el perfil NO) en el acuífero puede haber direcciones de flujo locales, cartografiables a menor escala. Para la representación del potencial del acuífero se utilizaron mediciones del nivel estático contemporáneas realizadas durante campañas de medición de niveles estáticos mensuales. Por esta razón el potencial presentado en la Figura 82 corresponde con la tendencia general observada en las mediciones de nivel mensuales de los años 2017 y 2018.

Cabe resaltar que entre ambos ciclos hidrológicos no hubo una variación significativa, sin embargo, en ambos se observa que durante la época seca los niveles en los pozos monitoreados pueden disminuir hasta 5 metros en comparación con la época seca.

En la Figura 84 se representa al ubicación y distribución a lo largo de toda la cuenca de las 2 unidades hidrogeológicas identificadas y descritas anteriormente. La unidad C1 representa el acuífero libre granular que se encuentra en el material aluvional y la unidad C2 coincide con el acuífero libre fracturado que se encuentra en el material del Complejo de Nicoya.

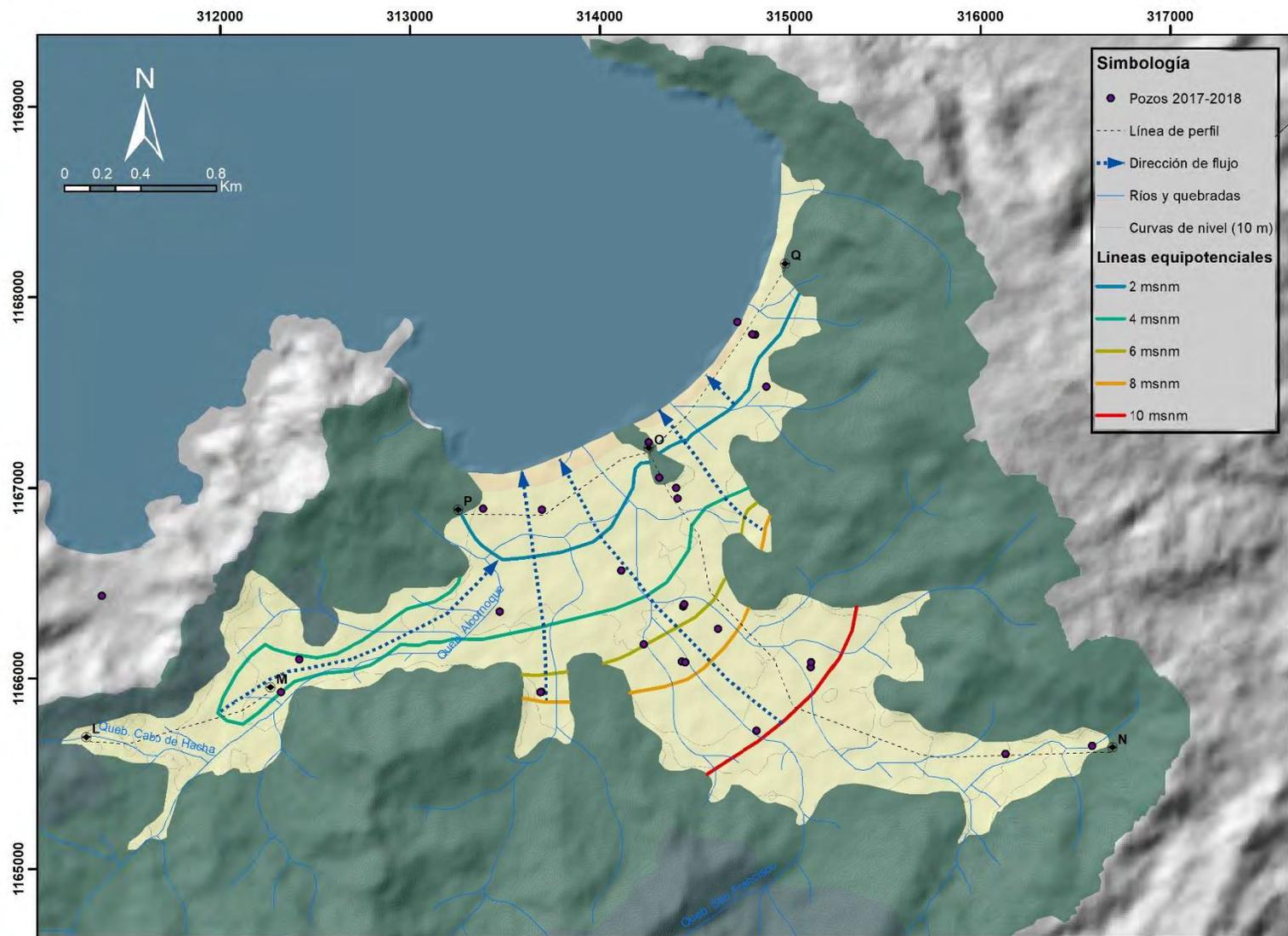


Figura 82 Mapa de la red de flujo años 2017 y 2018, El Coco

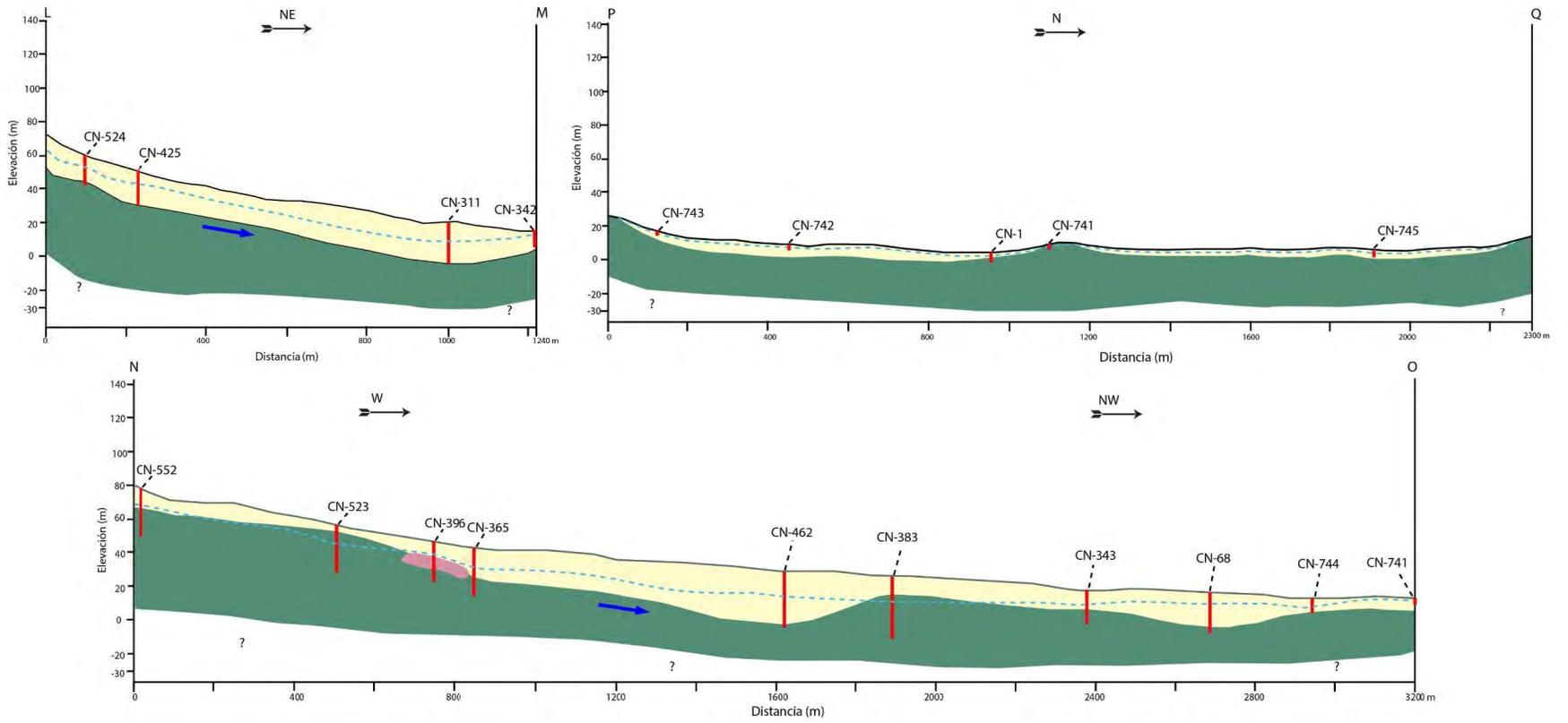


Figura 83 Lámina de perfiles, sistema acuífero El Coco

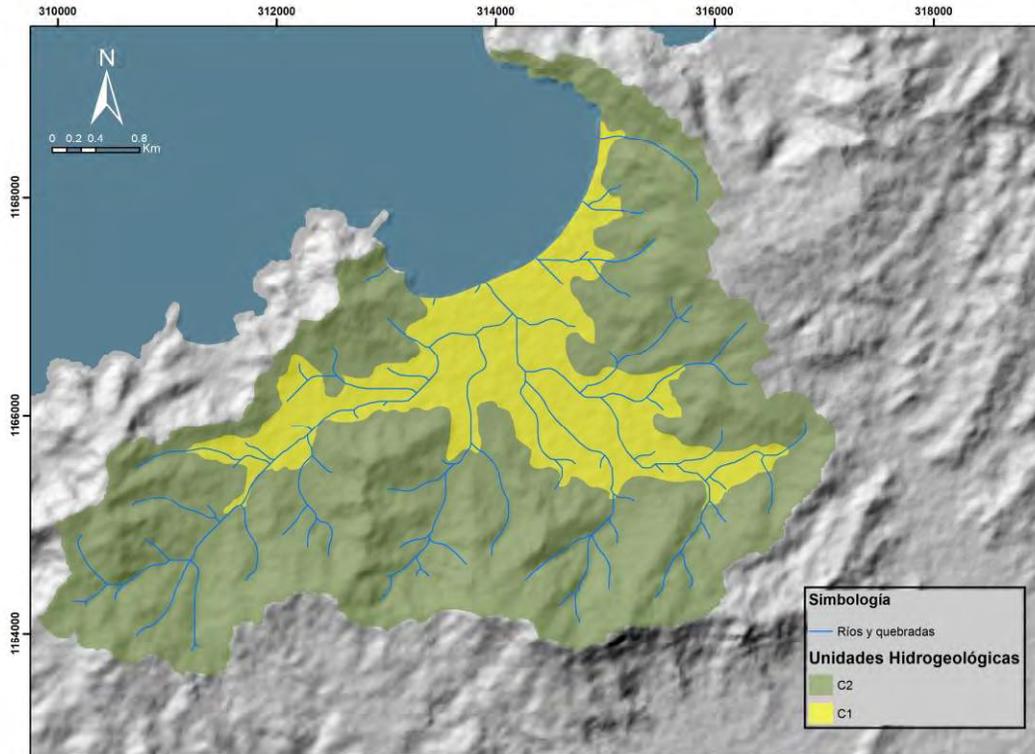


Figura 84 Mapa de unidades hidrogeológicas, El Coco

## 6.2 Infiltración

Tras la interpretación de imágenes satelitales del periodo 2017-2018, se identificaron 4 tipos de cobertura vegetal y uso del suelo, como se observa en la Figura 85. La cobertura predominante son los bosques con un 44% del total de la cuenca, seguidamente, los pastos abarcan un 43%, la infraestructura corresponde con aproximadamente 12%, y la costa 1%.

Tras una revisión de fotografías satelitales de acceso libre, la conversión de uso de suelo se ha dado de manera gradual y se concentra en el sector central de la cuenca y en la base de las zonas altas.

En la Figura 86 se observa que la mayor parte de la cuenca presenta los valores máximos del coeficiente de infiltración, se tienen los valores más bajos del coeficiente de infiltración en la base del sector montañoso en las que las fuertes pendientes disminuyen la capacidad de infiltración.

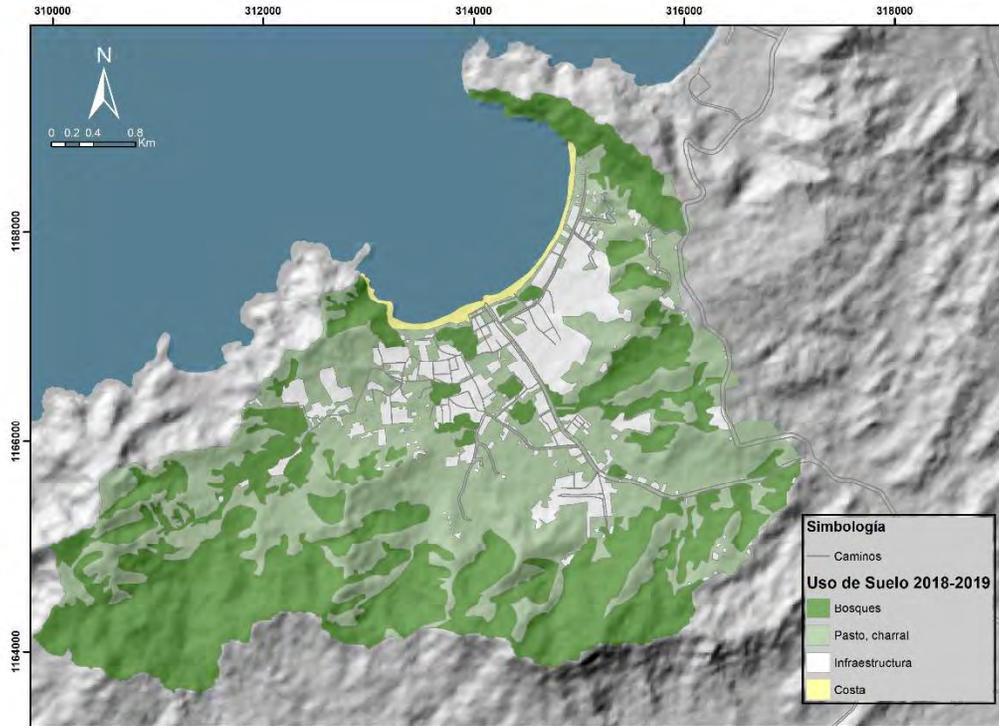


Figura 85 Mapa de uso de suelo, El Coco

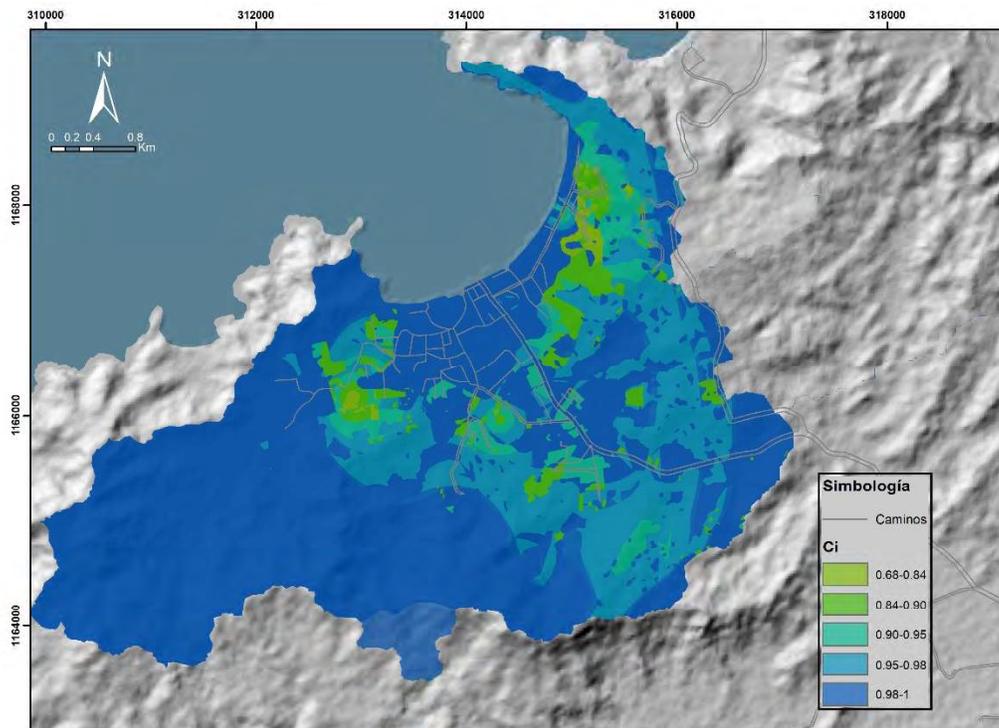


Figura 86 Mapa de coeficiente de infiltración, El Coco

### 6.2.1 Precipitación que se infiltra mensualmente

Como se observa en la Tabla 36, utilizando el promedio histórico de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Daniel Oduber, únicamente en los meses de enero, febrero y marzo hay menos de 5mm de precipitación por mes y durante todo el mes de diciembre el promedio es de 11 mm, que sigue siendo una cantidad baja y con escasa probabilidad de generar infiltración.

Tabla 36 Precipitación promedio histórica (1999-2017) El Cocco

Mes	Promedio histórico de precipitación Estación A. Daniel Oduber (mm/m2)	Cantidad de precipitación en la cuenca (megaL)	Precipitación que infiltra (megaL)	Porcentaje según el total de precipitación. (%)
Enero	1.30	26	0	0.0
Febrero	1.60	32	0	0.0
Marzo	2.40	48	0	0.0
Abril	36.30	727	593	81.6
Mayo	189.80	3799	3137	82.6
Junio	186.70	3737	3086	82.6
Julio	121.90	2440	2015	82.6
Agosto	204.00	4084	3372	82.6
Septiembre	356.40	7134	5891	82.6
Octubre	350.70	7002	5797	82.6
Noviembre	103.90	2074	1717	82.6
Diciembre	11	220	118	53.4
<b>Total</b>	<b>1566</b>	<b>31348</b>	<b>25726</b>	<b>82.1</b>

Tras realizar el cálculo de la cantidad de precipitación que se infiltra, se corrobora que durante los meses de enero, febrero y marzo efectivamente no hay precipitación suficiente para que ocurra infiltración. En la Tabla 36 se presenta la cantidad de precipitación que se infiltra por mes en la cuenca.

En la Figura 87 se presenta el mapa anual de la precipitación que infiltra en el suelo. Existen dos sectores de tamaño considerable en la que se infiltra menor cantidad de lluvia, hasta el 50% menos que en otras partes del área de estudio. Estos coinciden con los sectores con menor capacidad de infiltración que se observan en el mapa del coeficiente de infiltración (Figura 86).

La Figura 87, es un indicador de la equitativa importancia de los factores que intervienen en la infiltración, puesto que es necesario analizar el comportamiento de todos a la vez para poder comprender el mapa de la precipitación que infiltra en el suelo.

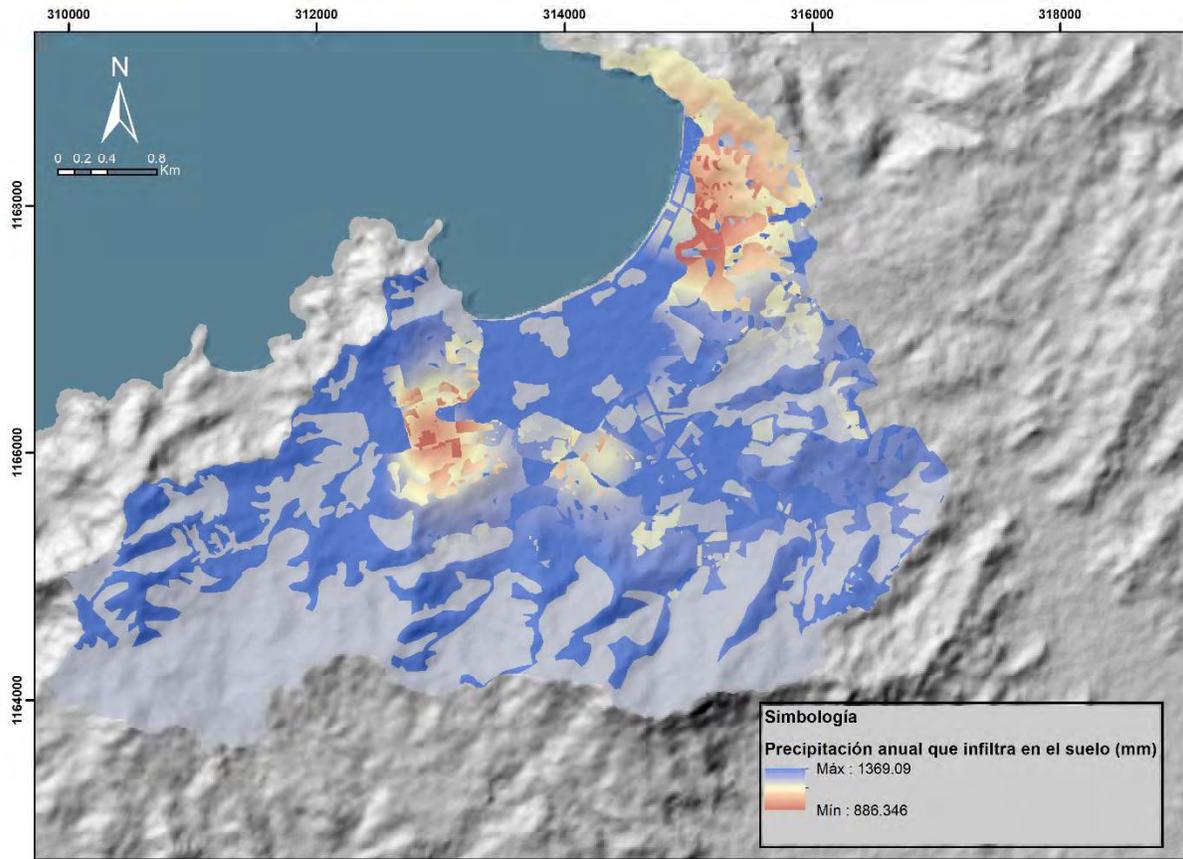


Figura 87 Mapa anual de la precipitación que infiltra en el suelo, El Coco

### 6.2.2 Escorrentía

Al igual que en el acuífero Playa Panamá, durante los tres primeros meses del año no ocurre escorrentía, esta ocurre a partir del mes de abril, según inicia la transición a la época lluviosa, y aumenta gradualmente hasta alcanzar los valores máximos durante los meses de agosto, septiembre y octubre. Como se observa en la Figura 88, los sitios identificados como los de menor capacidad de infiltración y en los que se infiltra menor cantidad de lluvia, son en los que se tiene mayor cantidad de escorrentía.

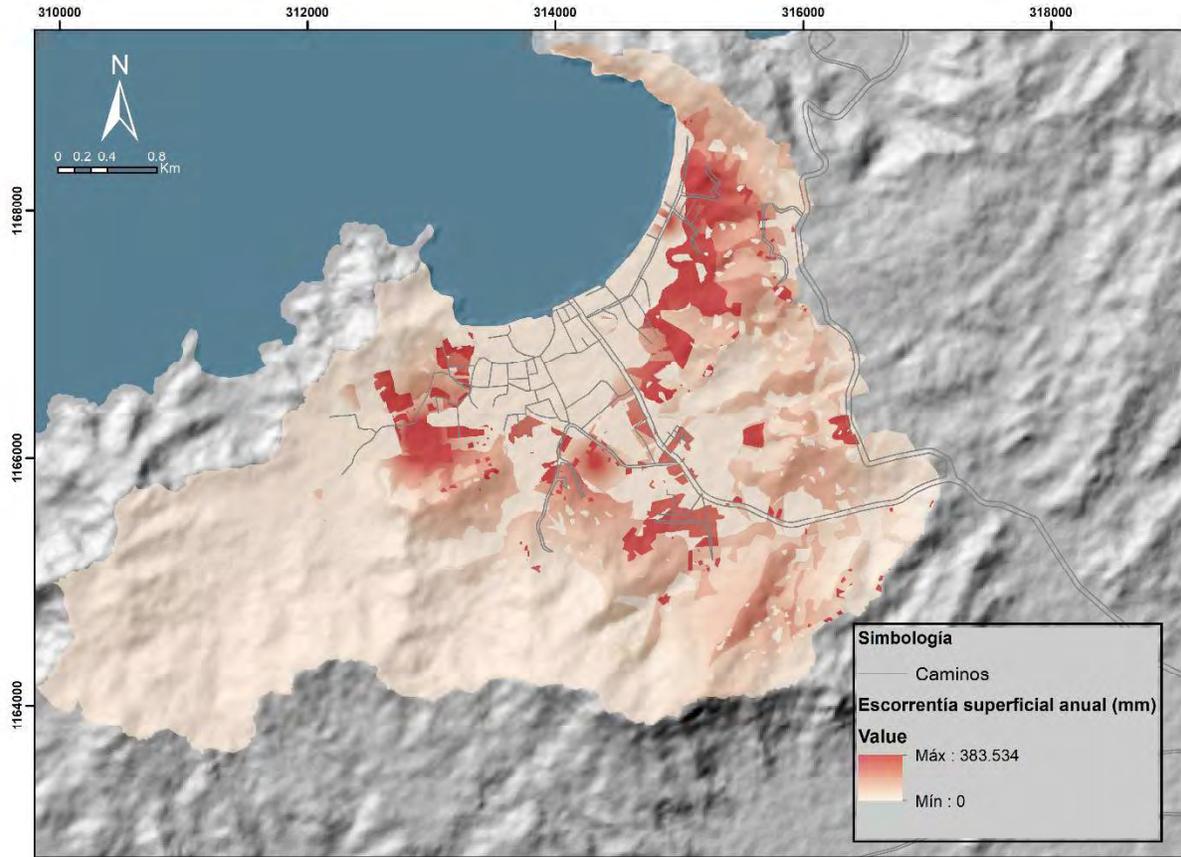


Figura 88 Mapa anual de escorrentía, El Coco

## 6.3 Recarga potencial

### 6.3.1 Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real presenta valores más altos principalmente en las áreas boscosas, en las cuales puede alcanzar hasta un 67% de la precipitación anual (Figura 89). Lo anterior debido a que es en estas áreas donde se tiene vegetación con mayor profundidad de raíces y desarrollo.

Durante los meses de la época seca ocurre menor evapotranspiración real, principalmente en febrero, marzo y abril. Lo que coincide con los meses en los que hay menor humedad disponible en el suelo.

En la época lluviosa sucede lo contrario, hay mayor humedad disponible, principalmente durante de septiembre, octubre y noviembre. Por lo tanto, la evapotranspiración real, es mayor en comparación con los meses de la época seca.

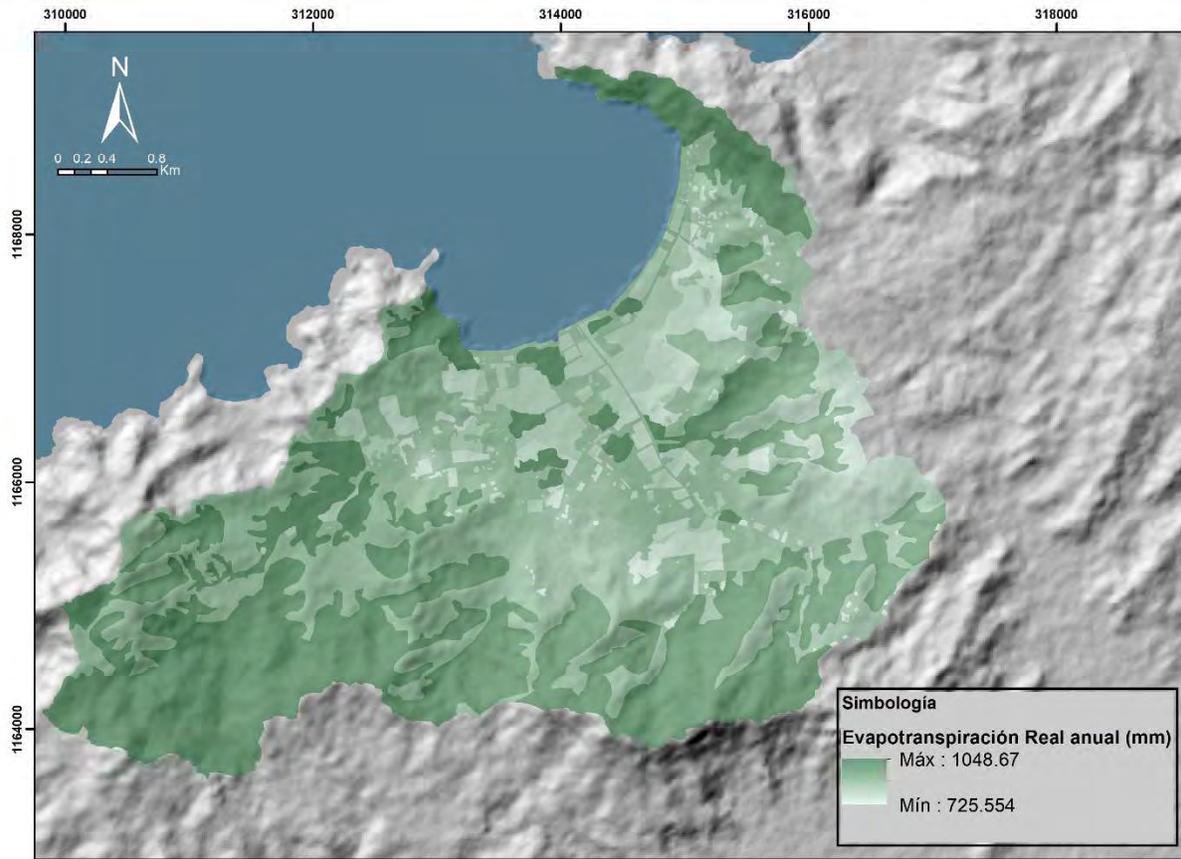


Figura 89 Mapa de evapotranspiración anual, El Coco

### 6.3.2 Recarga potencial mensual y anual

La recarga potencial anual en la cuenca es aproximadamente 7121 megalitros, lo cual corresponde con el 23% de la precipitación anual y el 28% de la cantidad de lluvia que se infiltra al suelo. Esta ocurre durante los meses de la época lluviosa (mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre), siendo septiembre y octubre los meses en los que ocurre el 88% de la recarga anual de la cuenca. En la Tabla 37 se presenta la recarga total en la cuenca por mes:

Tabla 37 Recarga mensual, El Coco

Mes	Recarga total en Playa Panamá (megal)	Porcentaje con respecto a la recarga anual
Enero	0	0
Febrero	0	0
Marzo	0	0
Abril	0	0
Mayo	85	1
Junio	298	4
Julio	44	1
Agosto	375	5
Septiembre	2738	38
Octubre	3567	50
Noviembre	15	0
Diciembre	0	0

En el mapa de recarga potencial anual (Figura 90) se observa la alta correlación entre las áreas donde ocurre la menor cantidad de recarga y las que presentan cobertura boscosa, las áreas cubiertas por pastos o matorrales son las que presentan mayor potencial de recarga.

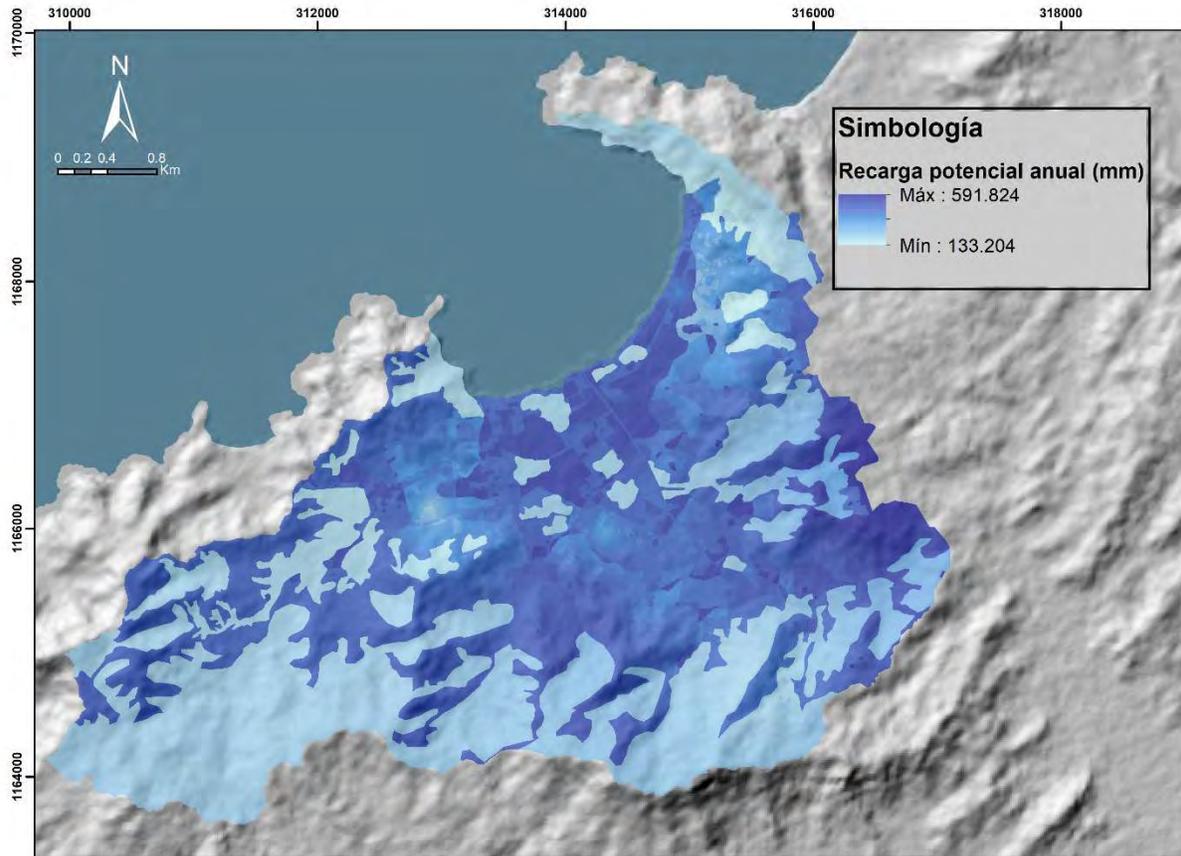


Figura 90 Mapa de recarga potencial anual, El Coco

Para obtener el volumen de recarga se procede a calcularlo de la misma manera que se realizó para el acuífero Playa Panamá y como lo realizó Corrales (2017). Primero, es necesario pasar el mapa de milímetros a metros, seguidamente, se multiplica por el área de cada pixel.

En este caso el tamaño de pixel de los mapas es de  $1 \text{ m}^2$ , por lo tanto, la recarga potencial anual en metros se multiplicó por  $1 \text{ m}^2$  y se obtuvo el volumen de recarga en metros cúbicos de cada pixel. Finalmente, se efectúa la sumatoria total con la herramienta *Raster Layer Statistics* del software QGIS para conocer el volumen de recarga potencial anual en las áreas deseadas, ya sea la totalidad de la cuenca o según las subunidades de recarga definidas, en este caso corresponden con las dos unidades hidrogeológicas descritas anteriormente y representadas en la Figura 84.

Tabla 38 Volumen de Recarga potencial anual, El Coco

Subunidad de Recarga	Área (km <sup>2</sup> )	Recarga potencial anual promedio por metro cuadrado (mm)	Volumen de recarga total (m <sup>3</sup> /año)
C-1 (Depósitos recientes) Acuífero libre	4.62	415.98	1,897,274
C-2 (Complejo de Nicoya) Acuitardo	15.39	339.64	5,223,048
Total El Coco	20.017	357.1033175	7,120,322

El sistema acuífero El Coco tiene una extensión de 20.017km<sup>2</sup> y recibe una recarga directa de 7,120,322 m<sup>3</sup>/año, esta, principalmente, se da en la subunidad de recarga C-2 asociada a los basaltos del Complejo de Nicoya. La subunidad de recarga C-1, tiene una extensión menor y un volumen de recarga menor, sin embargo, cuenta con un promedio de recarga de 415.98 mm/año en cada metro cuadrado, superando el promedio de la subunidad C-2 (Ver Tabla 38). Es importante mencionar que, según la red de flujo, la subunidad C-1 recibe una recarga lateral de la subunidad C-2.

Este resultado es del mismo orden de magnitud al calculado por Gómez (2005), 5,747,408 m<sup>3</sup>/año. De igual manera a lo mencionado para Playa Panamá, la diferencia entre ambos resultados se asocia principalmente a las variantes metodológicas para la determinación de los factores utilizados para la evapotranspiración real (C1,C2) , la precipitación que infiltra (Cfo, Kfc, Kp y Kv) y el nivel de detalle de la interpretación y zonificación del uso de suelo.

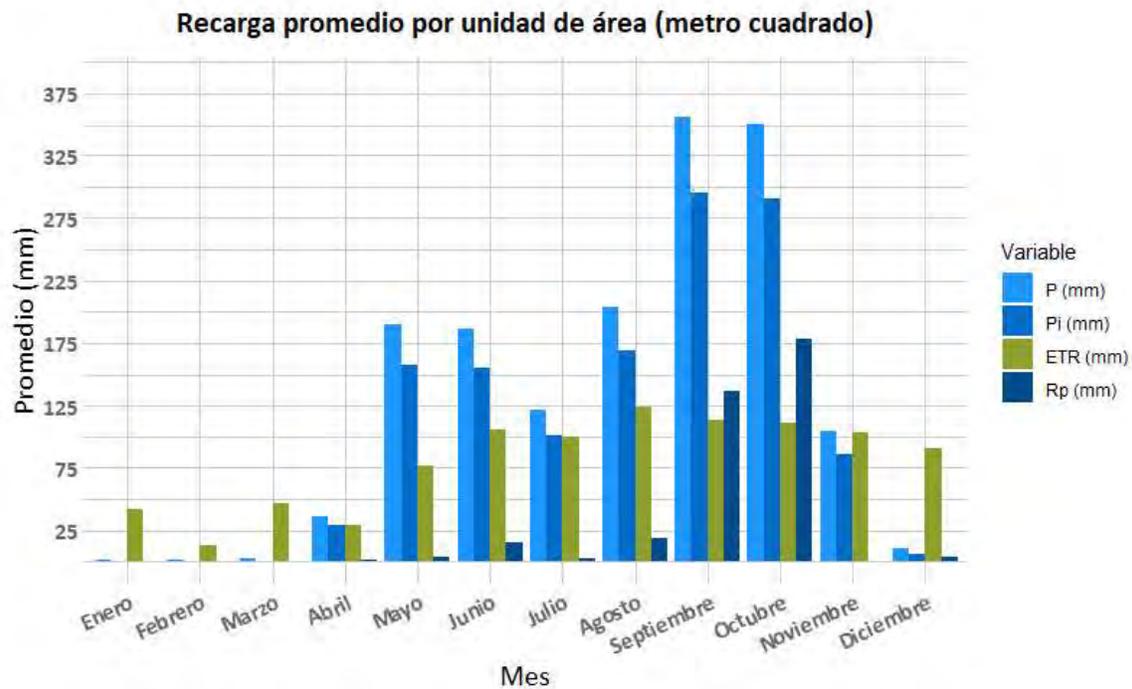


Figura 91 Recarga potencial promedio por unidad de área, El Coco

En la Figura 91 se visualiza la relación directa existente entre la precipitación, la precipitación que se infiltra, la evapotranspiración real y la recarga potencial junto con la drástica variación de cada factor en meses de la época seca y lluviosa. A pesar de que la precipitación inicia su aumento en abril y se mantiene durante siete meses, la recarga ocurre de manera significativa únicamente en cuatro meses. Este comportamiento tiene una tendencia idéntica con el observado en el acuífero Playa Panamá en la Figura 52.

## 6.4 Recarga real

### 6.4.1 Cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante el análisis de la influencia mareal

A pesar de que existen seis pozos con sensores de monitoreo horario, para esta técnica se utilizaron únicamente los pozos CN-741 y CN-742, ya que son los que reflejan una influencia mareal apreciable en sus hidrogramas (ver Figura 92).

De igual manera que se realizó para el acuífero Playa Panamá, se seleccionó un rango de datos adecuado en el cual el comportamiento de los datos se aproximara a la estacionariedad y se procedió a calcular la correlación cruzada entre la marea y el nivel de los pozos, tanto para el pozo CN-741 como para el CN-742 se utilizó el mes de abril 2017 (n=744). Como resultado se tiene que el nivel en el pozo CN-741 presenta un retraso de 2 horas con respecto al comportamiento de la marea (índice de correlación= .452) y el nivel del pozo CN-742 presenta un retraso de 3 horas con respecto al comportamiento de la marea (índice de correlación= .214).

Para calcular el coeficiente de almacenamiento es necesario conocer también la transmisividad del acuífero. De manera similar a lo aplicado para el acuífero Playa Panamá, debido a la distribución asimétrica de los datos disponibles se procedió a utilizar un valor de 849 m<sup>2</sup>/d correspondiente a la mediana de los datos disponibles.

Tabla 39 Registro histórico de pruebas de bombeo disponibles.

Fecha	Pozo	Resultado de Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)			Referencia
-	CN-162	1288			Gómez (2005)
-	CN-161	1280			Gómez (2005)
3/12/2003	CN-412	966			Gómez (2005)
3/12/2003	CN-412	732			Gómez (2005)
1/9/1995	CN-311	332			Expediente SENARA
14/11/2007	CN-651	11.42			Expediente SENARA
Resumen estadístico (n=6)					
Promedio	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Asimetría
768	849	N/A	11.42	1288	-0.5

En la Tabla 40 y Tabla 41 se presentan los resultados de la aplicación de ambas técnicas en el pozo CN-741 y CN-742. Estos presentan alta similitud entre sí y con el resultado obtenido por Murillo (2007) en el acuífero Playa Panamá mediante una prueba de bombeo con pozo (0.03). Además, se encuentran entre 0.02-0.3, el rango de sugerido por Fetter (2014) para el tipo de sedimentos presentes en el acuífero.

Se propone que el coeficiente de almacenamiento promedio del acuífero corresponde con 0.034, obtenido utilizando el promedio de todas las mediciones de ambos métodos.



Figura 92 Comportamiento de la marea e hidrogramas de los pozos CN-741 y CN-742 durante 3 días

Tabla 40 Cálculo del coeficiente de almacenamiento, CN-741

CN-741								Eficiencia Mareal	Retraso Mareal
Mes	Semana	x (m)	T <sub>o</sub> (d)	Δh	ΔH <sub>o</sub>	EM	R (d)	S	S
Marzo 2017	Semana 1	230	0.5	0.08	2.43	0.033	0.29	0.030	0.034
	Semana 2	230	0.5	0.09	1.66	0.054	0.33	0.022	0.045
	Semana 3	230	0.5	0.06	3.33	0.018	0.29	0.041	0.034
	Semana 4	230	0.5	0.1	2.07	0.048	0.25	0.023	0.025
Marzo 2018	Semana 1	230	0.5	0.07	2.56	0.027	0.33	0.033	0.045
	Semana 2	230	0.5	0.05	2.95	0.017	0.33	0.042	0.045
	Semana 3	230	0.5	0.08	2.07	0.039	0.29	0.027	0.034
	Semana 4	230	0.5	0.07	2.72	0.026	0.38	0.034	0.057

Tabla 41 Cálculo del Coeficiente de almacenamiento, CN-742

CN-742								Eficiencia Mareal	Retraso Mareal
Mes	Semana	x (m)	t <sub>o</sub> (d)	Δh	ΔH <sub>o</sub>	EM	R (d)	S	S
Marzo 2017	Semana 1	259	0.5	0.04	2.43	0.016	0.33	0.034	0.035
	Semana 2	259	0.5	0.04	1.96	0.020	0.33	0.031	0.035
	Semana 3	259	0.5	0.02	3.25	0.006	0.29	0.052	0.027
	Semana 4	259	0.5	0.05	2.05	0.024	0.25	0.028	0.020
Marzo 2018	Semana 1	259	0.5	0.04	2.57	0.016	0.29	0.035	0.027
	Semana 2	259	0.5	0.03	2.16	0.014	0.38	0.037	0.045
	Semana 3	259	0.5	0.04	2.07	0.019	0.29	0.031	0.027
	Semana 4	259	0.5	0.04	2.76	0.014	0.29	0.036	0.027

#### 6.4.2 Comparación de metodologías para el cálculo de transmisividad y la conductividad hidráulica

Como se menciona anteriormente, para realizar el cálculo del coeficiente de almacenamiento mediante la eficiencia mareal y el retraso mareal era necesario conocer un valor aproximado de la transmisividad del acuífero. En el caso de El Coco se utilizó un valor de 849 m<sup>2</sup>/d, correspondiente con la mediana del registro histórico de pruebas de bombeo que se han realizado en el acuífero.

Con el objetivo de validar la extrapolación de este valor de transmisividad a los puntos CN-741 y CN-742 y tras analizar la similitud del contexto geológico y modelo conceptual de los acuíferos El Coco y Playa Panamá, se procedió utilizar el valor del coeficiente de almacenamiento calculado por Murillo (2007) a través de una prueba de bombeo con la observación de un pozo testigo en el acuífero Playa Panamá.

La conductividad hidráulica también fue calculada para complementar la comparación y validación entre los métodos utilizados, para esta se utilizó la transmisividad calculada por el retraso y la eficiencia mareal y el espesor aproximado, 25 m para ambos.

Tabla 42 Comparación de Parámetros hidráulicos según método de cálculo, El Coco

Parámetro	Método														
	Eficiencia Mareal					Retraso Mareal					Pruebas de bombeo				
	Min	Max	Promedio	Mediana	n	Min	Max	Promedio	Mediana	n	Min	Max	Promedio	Mediana	n
S	0.022	0.052	0.034	0.034	16	0.020	0.057	0.035	0.034	16	0.03				1
T (m <sup>2</sup> /d)	488	1174	795	760		1411	4025	2444	2332		11.42	1288	768	849	6
K (m/d)	19.5	46.9	31.8	30.4		56.4	161.0	97.8	93.3		25.25	62.32	41.7	39.62	6

Como se observa en la Tabla 42, los resultados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del método de la eficiencia mareal son concordantes con los obtenidos a través de las pruebas de bombeo. En cuanto al método del retraso mareal, este generó resultados de coeficiente de almacenamiento concordantes con los obtenidos a través de pruebas de bombeo, sin embargo, sobreestima considerablemente los valores de la transmisividad.

#### 6.4.3 Recarga neta anual En la

Tabla 43 se presentan los resultados del cálculo de la recarga neta del año 2017 por cada área de influencia de cada pozo y el porcentaje recargado según lo llovido en el área. En total hubo una recarga de neta de  $1.38E+14$   $\text{mm}^3$ , un 1.49% de la precipitación anual llovido en el área de cálculo.

Tabla 43 Valores del cálculo de la recarga neta del año 2017, El Coco

Pozo	CN-735	CN-741	CN-742	CN-743	CN-744	CN-245
Nivel inicial (mbns)	6.62	1.7	0.93	4.79	3.17	1.92
Nivel final (mbns)	4.83	1.4	0.85	4.73	1.96	1.76
$\Delta h$ (mm)	1790	300	80	60	1210	160
Tiempo (años)	1	1	1	1	1	1
Coefficiente de almacenamiento	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
Recarga neta (mm/año)	60.86	10.2	2.72	2.04	41.14	5.44
Área de influencia (mm <sup>2</sup> /año)	1.86E+12	2.46E+11	6.21E+11	1.17E+12	3.98E+11	3.27E+11
Volumen recargado (mm <sup>3</sup> /año)	1.13E+14	2.51E+12	1.69E+12	2.38E+12	1.64E+13	1.78E+12
Volumen llovido (mm <sup>3</sup> /año)	3.73E+15	4.95E+14	1.25E+15	2.35E+15	7.99E+14	6.58E+14
Porcentaje recargado (%)	3.03	0.51	0.14	0.10	2.05	0.27

#### 6.4.4 Recarga neta durante la época lluviosa

Durante la época lluviosa del año 2017 se registraron 1936.4 mm de lluvia, aproximadamente el 96% del total anual. Septiembre y octubre se caracterizan por ser los meses más lluviosos del año según el comportamiento histórico, en el año 2017 registraron el 47% de la precipitación del año (936.6 mm).

Durante los siete meses de la época lluviosa se recargaron 5.78252E+14 mm<sup>3</sup>, si lo comparamos con la cantidad total de lluvia, corresponde con el 6.37% del total precipitado en toda el área durante los siete meses (Ver Tabla 44).

Tabla 44 Valores del cálculo de la recarga neta de la época lluviosa 2017, El Coco

Pozo	CN-735	CN-741	CN-742	CN-743	CN-744	CN-245
Nivel inicial ( mbns)	10.14	2.2	1.41	5.51	4.62	2.62
Nivel final ( mbns)	2.91	1.25	0.71	4.48	1.55	1.19
$\Delta h$ (mm)	7230	950	700	1030	3070	1430
Coefficiente de almacenamiento	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
Recarga neta (mm)	245.82	32.3	23.8	35.02	104.38	48.62
Área de influencia (mm <sup>2</sup> )	1.86E+12	2.46E+11	6.21E+11	1.17E+12	3.98E+11	3.27E+11
Volumen recargado (mm <sup>3</sup> )	4.57E+14	7.96E+12	1.48E+13	4.09E+13	4.15E+13	1.59E+13
Volumen llovido (mm <sup>3</sup> )	3.65E+15	4.84E+14	1.22E+15	2.30E+15	7.81E+14	6.43E+14
Porcentaje recargado (%)	12.52	1.65	1.21	1.78	5.32	2.48

Durante septiembre y octubre se recargaron 3.5833E+14 mm<sup>3</sup>, si lo comparamos con la cantidad total de lluvia, corresponde con el 8.28% del total precipitado en toda el área en ese periodo de tiempo y el 62% de la recarga de toda la época lluviosa (Ver Tabla 45).

Tabla 45 Valores del cálculo de la recarga neta de septiembre y octubre 2017, El Coco

Pozo	CN-735	CN-741	CN-742	CN-743	CN-744	CN-245
Nivel inicial ( mbns )	6.64	1.24	0.76	4.58	2.7	1.39
Nivel final ( mbns)	1.84	1.02	0.56	4.05	1.26	0.65
$\Delta h$ (mm)	4800	220	200	530	1440	740

Coefficiente de almacenamiento	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
Recarga neta (mm)	163.2	7.48	6.8	18.02	48.96	25.16
Área de influencia (mm <sup>2</sup> )	1.86E+12	2.46E+11	6.21E+11	1.17E+12	3.98E+11	3.27E+11
Volumen recargado (mm <sup>3</sup> )	3.03E+14	1.84E+12	4.22E+12	2.11E+13	1.95E+13	8.24E+12
Volumen llovido (mm <sup>3</sup> )	1.74E+15	2.31E+14	5.82E+14	1.09E+15	3.73E+14	3.07E+14
Porcentaje recargado (%)	17.42	0.80	0.73	1.92	5.23	2.69

#### 6.4.5 Recarga total durante el Huracán Otto

Producto de las 12 horas de intensa lluvia provocadas por este huracán (ver Figura 93), los niveles de agua en los puntos de monitoreo ascendieron, lo que permitió realizar la estimación de la recarga y el volumen total de recarga producto de este fenómeno. En la Figura 94 y Figura 95, se observa la variación de niveles en cada punto de observación posterior a las lluvias. Para hacer la estimación se trabaja de manera individual con cada uno de los puntos de observación con la intención de visualizar claramente el cambio del nivel.



Figura 93 Precipitación del 24 al medio al 25 de noviembre 2016 producto del Huracán Otto



Figura 94 Fluctuación de niveles en los pozos CN-735, CN-741, CN-742 y CN-743 producto del Huracán Otto



Figura 95 Fluctuación de niveles en los pozos CN-744 y CN-245 producto del Huracán Otto

Se tiene que hubo una recarga un total de  $6.7345E+13\text{mm}^3$ , el 13.28% de la precipitación que ocurrió producto de la tormenta tropical. En la Tabla 46 se presentan todos los valores obtenidos de recarga y volumen de recarga.

Tabla 46 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto del Huracán Otto, El Coco

Pozo	$\Delta h$ (mm)	Sy	$\Delta t$ (h)	R (mm/h)	Área de influencia (mm <sup>2</sup> )	Volumen recarga (mm <sup>3</sup> )	Volumen total llovido (mm <sup>3</sup> )	Porcentaje de volumen de lluvia recargado
CN-735	270	0.034	18	0.51	1.86E+12	1.71E+13	2.04E+14	8.37%
CN-741	360	0.034	9	1.36	2.46E+11	3.014E+12	2.70E+13	11.16%
CN-742	540	0.034	7	2.623	6.21E+11	1.14E+13	6.82E+13	16.74%
CN-743	570	0.034	9	2.153	1.17E+12	2.27E+13	1.28E+14	17.67%
CN-744	210	0.034	10	0.714	3.98E+11	2.84E+12	4.37E+13	6.51%
CN-245	930	0.034	6	5.27	3.27E+11	1.04E+13	3.59E+13	28.82%
					<b>Total</b>	<b>6.73E+13</b>	<b>5.07E+14</b>	<b>13.28%</b>

### 6.4.6 Recarga total durante la Tormenta Tropical Nate

Como se observa en la Figura 97, el ascenso en los niveles de los puntos de monitoreo producto de las lluvias ocasionadas por la tormenta tropical fue considerable, lo que facilitó la aplicación del método. La recarga se estimó utilizando el intervalo completo de precipitaciones asociadas a la Tormenta Tropical Nate (48 horas).

La fluctuación del nivel ocurrió de manera más inmediata, luego de iniciar las precipitaciones, que en comparación con el Huracán Otto, esto puede estar asociado a que durante el mes de octubre el suelo se conserva más húmedo al ser uno de los meses con mayor concentración de lluvias de la época lluviosa (ver Figura 97 y Figura 98).

Tras la aplicación de esta metodología se tiene que, tras las 48 horas de precipitaciones de la tormenta tropical, se recargó  $3.70E+14$  mm<sup>3</sup>, un 20.3 % del total llovido en ese periodo de tiempo. En la Tabla 47 se presentan todos los valores obtenidos de recarga y volumen de recarga.

Tabla 47 Valores del cálculo del volumen de recarga total producto de la Tormenta Tropical Nate, El Coco

Pozo	$\Delta h$ (mm)	Sy	$\Delta t$ (d)	R (mm/d)	Área de influencia (mm <sup>2</sup> )	Volumen recarga (mm <sup>3</sup> )	Volumen total llovido (mm <sup>3</sup> )	Porcentaje de volumen de lluvia recargado
CN-735	3570	0.034	2	0.0607	1.86E+12	2.26E+14	7.33E+14	30.8 %
CN-741	750	0.034	2	0.0128	2.46E+11	6.28E+12	9.71E+13	6.5 %
CN-742	360	0.034	2	0.00612	6.21E+11	7.60E+12	2.45E+14	3.1 %
CN-743	2580	0.034	2	0.0439	1.17E+12	1.03E+14	4.61E+14	22.2 %
CN-744	1650	0.034	2	0.0281	3.98E+11	2.23E+13	1.57E+14	14.2 %
CN-245	530	0.034	2	0.00901	3.27E+11	5.90E+12	1.29E+14	4.6 %
					<b>Total</b>	<b>3.70E+14</b>	<b>1.82E+15</b>	<b>20.3 %</b>



Figura 96 Precipitación del 3 al 7 de octubre 2007 producto de la Tormenta Tropical Nate



Figura 97 Fluctuación de niveles en los pozos CN-732, CN-741, CN-742 y CN-743 producto de la Tormenta Tropical Nate



Figura 98 Fluctuación de niveles en los pozos CN-744 y CN-245 producto de la Tormenta Tropical Nate

#### 6.4.7 Comparación de la recarga real en diferentes periodos

En el primer periodo de aplicación, el anual, se tiene un valor de recarga neta del 1.49% de la precipitación anual en la cuenca, porcentaje muy diferente al porcentaje de recarga anual estimado a través de la metodología de Schosinsky (2006).

Al realizar el cálculo mediante esta metodología para el inicio y final de la época lluviosa, un periodo de tiempo más corto y con mayor cantidad de precipitación. Los resultados obtenidos superan la recarga neta calculada para todo el año, lo que evidencia una disminución en la subestimación de la recarga, sin embargo corresponde con un 6.37%, muy alejado al 23% calculado mediante el balance de suelos de Schosinsky (2006).

Considerando que durante septiembre y octubre ocurrió el 47% la precipitación anual, se procedió a aplicar la metodología únicamente para estos meses. La cantidad de recarga neta calculada para El Coco en estos dos meses corresponde con el 62% de toda la recarga calculada para los 7 meses de la época lluviosa, y únicamente el 8.28% de la precipitación de esos dos meses.

Según el cálculo aplicado a las variaciones de nivel en los puntos de monitoreo durante la tormenta tropical Nate, durante estas 48 horas se recargó el 20.3 % de lo llovido, resultado cercano al estimado mediante el balance de suelos de Schosinsky (2006). Esta similitud entre los resultados de ambas metodologías es un indicio de que la efectividad del método WTF es mayor cuando se aplica en periodos cortos de tiempo y posterior a eventos importantes de precipitación.

Para el caso del Huracán Otto, que presentó un periodo de lluvia intensa de 12 horas, el resultado fue de 13.28% de lo llovido. Se considera que la diferencia de intensidad de las lluvias durante ambos eventos climáticos dificulta la comparación entre ambos. Además, otro factor importante es que el Huracán Otto ocurre en la última semana de noviembre del 2016, prácticamente al inicio de la época seca, en cambio la Tormenta Tropical Nate sucede a inicios del mes de octubre 2017, en el periodo de mayor intensidad de la época lluviosa.

Es posible identificar en los hidrogramas de los puntos de monitoreo de ambos acuíferos que, los pozos más alejados de la costa como lo son el pozo CN-735 en El Coco tienen fluctuaciones más abruptas de nivel a lo largo del año y los más cercanos a la costa presentan un comportamiento más estable en el nivel de agua como se observa en la Figura 99 y Figura 100.

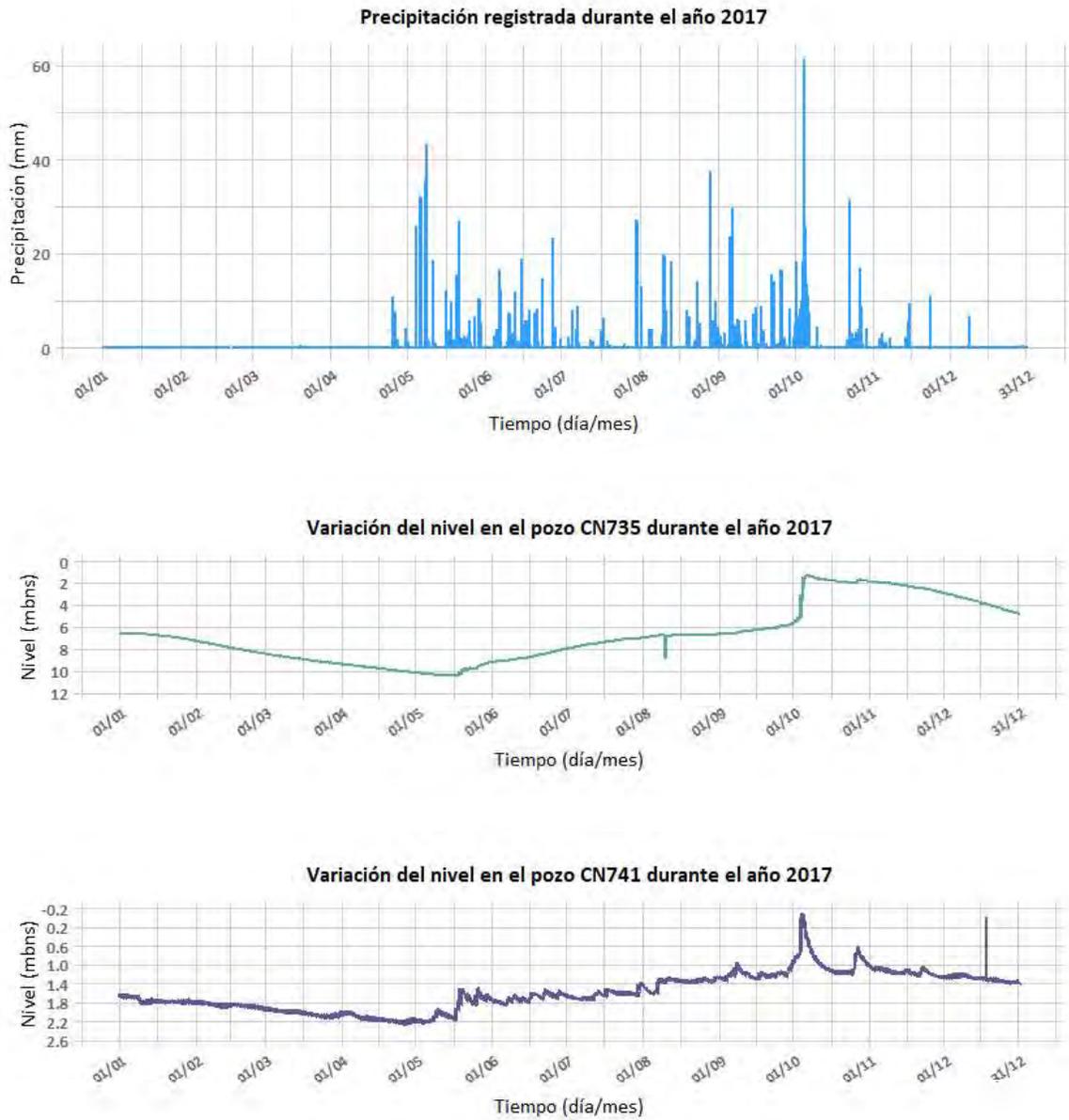


Figura 99 Precipitación registrada durante el año 2017 y la fluctuación de niveles en los pozos CN-735 y CN-741 durante el año



Figura 100 Fluctuación de niveles en los pozos CN-742, CN-743, CN-744 y CN-245 durante el año 2017

## 6.5 Calidad de agua

### 6.5.1 Características físicas

#### 6.5.1.1 Temperatura

A partir del análisis de los datos horarios reportados por los sensores automáticos ubicados en los pozos monitoreados, se identificó que la variación de la temperatura del agua del acuífero es mínima y a lo largo de los periodos presentados en la Tabla 48, el rango de esta variación es menor a un grado centígrado, lo que concuerda con los resultados observados en el acuífero Playa Panamá y con lo estipulado por Custodio & Llamas (1996). Como excepción a lo anterior, se tiene que en los pozos CN-245 y CN-742 la variabilidad de la temperatura durante el periodo es mayor y se comporta en un rango de alrededor de 2.7 °C.

Tabla 48 Temperatura del agua subterránea, El Coco

Pozo	Periodo	Temperatura (C°)						Nivel (m)	Distancia de la costa (m)
		Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo	Promedio	
CN-245 (n=12615)	1/1/2017- 10/6/2018	29.27	29.36	29.51	0.0932	26.75	29.62	2.17	100
CN-741 (n=12615)	1/1/2017- 10/6/2018	29.02	29.01	29.02	0.0175	28.63	29.27	1.84	120
CN-742 (n=12068)	1/1/2017- 17/5/2018	28.23	28.33	28.48	0.1778	26.3	28.98	0.99	230
Cn-743 (n=4059)	1/1/2017- 17/5/2018	29.16	29.17	29.18	0.00226	29.04	29.28	5.32	185
CN-744 (9276)	1/1/2017- 21/1/2018	29.22	29.27	29.32	0.0215	28.65	29.46	2.87	460
CN-735 (n=12615)	1/1/2017- 10/6/2018	28.64	28.67	28.68	0.00394	28.5	29.03	7.37	1200

La temperatura aparenta tener un comportamiento espacial bastante homogéneo dentro del acuífero manteniendo temperaturas muy cercanas a 29 °C en diferentes puntos de monitoreo. Es importante destacar que no se identifica variación de temperatura producto de la influencia mareal en ninguno de los pozos monitoreados.

Los pozos CN-742 y CN-735 presentan temperaturas ligeramente menores, esto se asocia a que se encuentran ubicados en el sector central del aluvión donde el espesor es mayor y, por lo tanto, se tiene mayor capacidad de almacenamiento y flujo de agua.

En cuanto a la variación temporal, el patrón general es similar al identificado en el acuífero Playa Panamá. La temperatura aumenta durante la época seca y según inician las lluvias y la recarga por infiltración, las temperaturas disminuyen. En la Figura 101 y Figura 102 se observa de manera significativa este comportamiento en los pozos artesanales monitoreados (CN-741, CN-742, CN-744, CN-245). Por otra parte, en el piezómetro CN-735 la temperatura posee un comportamiento más estable y variaciones graduales.



Figura 101 Variación de la temperatura en los pozos CN-735, CN-741 y CN-742 durante el año 2017



Figura 102 Variación de la temperatura en los pozos CN-744 y CN-245 durante el año 2017

### 6.5.1.2 Conductividad eléctrica, TDS y Salinidad

Gómez (2005), a partir del muestreo de agua en la época lluviosa y época seca, obtuvo un rango entre 289 y 472  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un promedio de 413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Analizando el registro del monitoreo semestral realizado por el LNA entre los años 2007 y 2018 en los pozos 1,2,4 y 6 del acueducto y los pozos “Escuelita” y “Oasis” (Tabla 49) se tiene un valor promedio de 408  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Existe una diferencia entre los valores de conductividad de la época seca y lluviosa, sin embargo, la variación ronda los 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esta variación es concordante con lo estipulado por Saha et al. (2008) y Rodríguez et al. (2010) que mencionan el caudal de cuerpos de agua superficiales y la infiltración de la precipitación como factores influyentes en las variaciones de este parámetro.

Tabla 49 Resumen estadístico de mediciones semestrales conductividad eléctrica, El Coco

Época	Mínimo ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Máximo ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Promedio ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Mediana ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Seca (n=76)	198	503	411.43	413.5
Lluviosa (n=75)	292	504	404.14	398

Los pozos CN-245, CN-741 y CN-742 cuentan con sensores automáticos que registran la conductividad eléctrica. Se presenta a continuación el resumen estadístico de las mediciones para el periodo de datos disponibles para cada punto de monitoreo.

Tabla 50 Resumen estadístico de mediciones automáticas de conductividad eléctrica, El Coco

Pozo	Periodo	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )						Nivel (m)	Distancia de la costa (m)
		Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo	Promedio	
CN-245 (n=12 613)	1/1/2017- 10/6/2018	684.55	679.33	672.13	3046.75	425.63	923.57	2.17	100
CN-741 (n=12 614)	1/1/2017- 10/6/2018	953.76	942.36	750	29893.12	745.25	1765.35	1.84	120
CN-742 (n=12 065)	1/1/2017- 16/5/2018	724.09	728.01	641.91	10368.84	424.43	1051.22	0.99	230

En el registro del pozo CN-245 se identificó claramente la relación directa entre los descensos del nivel del pozo debido al bombeo periódico con ascenso en las mediciones de conductividad eléctrica. De igual manera los ascensos del nivel asociados a la infiltración por la precipitación generan descensos en el valor de conductividad medido por el sensor. Como se observa en el cuadro anterior y en la Figura 104, a pesar de estar en producción, este es el punto de monitoreo cuyos datos presentan menor variabilidad a lo largo del periodo analizado.

Los pozos CN-741 y CN-742 al inicio presentan valores de conductividad eléctrica de 1230 y 960  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una tendencia de disminución constante que durante de la época lluviosa es alterada y ocurre un leve ascenso. Esto se asocia con que las precipitaciones generan infiltración y durante el proceso de infiltración el agua, puede disolver sales presentes en la superficie y la zona vadosa y generar un aumento en su conductividad eléctrica. Al final de la época lluviosa se estabiliza la tendencia a la disminución y finalizan el ciclo hidrológico con valores de 798 y 741  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El impacto de las lluvias de la época lluviosa y eventos climáticos extremos tienen un efecto claro y visible en los pozos, este es temporal y pronto se retorna a la tendencia general del parámetro en los pozos de observación. Esto es visible en la Figura 103 y Figura 104, específicamente en los ascensos y descensos que ocurren posterior al mes de mayo y en octubre posterior al Huracán Nate.

En las mediciones de los sensores ubicados en pozos ubicados a lo largo de la costa, se tienen valores de conductividad en promedio mayores a 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que puede estar relacionado con su interacción con el agua de mar. Es importante destacar que no se identifica variación de conductividad o salinidad producto de la influencia mareal en ninguno de los pozos monitoreados.

Las mediciones del monitoreo semestral del LNA realizadas en los pozos del acueducto del AYA, ubicado aproximadamente a 1,2 km de la costa, corresponden estadísticamente con valores de hasta 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  menores, lo cual se puede asociar a una menor interacción directa con el agua de mar y menor cercanía de fuentes puntuales de contaminación.

Esta variación espacial en el acuífero también es visible a través del análisis de los resultados de la campaña de muestreo y análisis de iones mayores realizada durante los días 30 y 31 de julio del año 2019 para esta investigación, donde los resultados de los muestreos en las zonas más lejanas a la costa tienen valores entre 314 y 369  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los valores de los pozos cercanos a la costa se encuentran entre 607 y 716  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

También destaca que los pozos cercanos a la costa, pero ubicados en las áreas laterales del aluvión donde presenta menor espesor y donde según la red de flujo reciben menor recarga, tienen valores de conductividad mayores que en sector central.

De manera general, la campaña de muestreo realizada para esta investigación tiene datos que se encuentran en un rango entre 314 y 716  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un promedio de 548  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos valores son estadísticamente mayores que los resultados obtenidos hace 15 años por Gómez (2005) (ver Tabla 51)

Tabla 51 Resumen estadístico de las campañas de muestreo.

Muestreo	n	Promedio	Mediana	Mínima	Máximo
Gómez (2005)	12	413.4	373.5	289	594
Esta Investigación	8	548	617	314	716

Lo anterior sugiere que a pesar de las variaciones dentro de los ciclos hidrológicos, de manera neta, la conductividad eléctrica en el acuífero ha aumentado. La comparación se considera apropiada ya que ambas campañas de muestreo toman en cuenta mediciones distribuidas a lo largo del acuífero.

Como se mencionó para el acuífero Playa Panamá, el comportamiento de la salinidad y total de sólidos disueltos registrado en el periodo de datos disponibles por los sensores automáticos es semejante el de la conductividad eléctrica debido a su grado de correlación (ver Figura 70).



Figura 103 Variación de la conductividad eléctrica en el pozo CN-741 durante el año 2017



Figura 104 Variación de la conductividad eléctrica en el pozo CN-72 y CN-245 durante el año 2017

Tabla 52 Resumen estadístico de mediciones automáticas de TDS, El Coco

Pozo	Periodo	TDS (mg/L)					
		Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo
CN-245 (n=12242)	1/10/2017- 6/6/2018	440.83	440.68	430.38	736.69	276.66	571.14
CN-741 (n=12063)	1/1/2017- 6/6/2018	625.72	614.91	487.47	12419.2	486.26	1147.48
CN-742 (n=12068)	1/1/2017- 17/5/2018	470.647	473.2	417.24	4381.29	275.88	683.29

El pozo CN-741 al igual que con la conductividad eléctrica es el que presenta mayor variabilidad en su registro y valores más altos con respecto a los otros dos pozos de la línea costera. Para este sector costero del acuífero se tiene una media de 512.4 mg/L, un valor máximo de 1147.48 mg/L y un mínimo de 275.88 mg/L. Estos valores se encuentran dentro del rango típico para aguas dulces mencionado por Custodio & Llamas (1996).

En cuanto a la salinidad, según los resultados obtenidos y la clasificación de Swenson & Baldwin (1965), la salinidad en la zona costera del acuífero es de aguas dulces y, según la clasificación de Mayer et al. (2005), también, sin embargo, los valores más altos registrados superiores a 0.5 se clasifican como aguas marginales no recomendadas para consumir y son aptas para el riego aunque pueden tener consecuencias adversas como la reducción de la permeabilidad de los suelos. Incluso durante el mes de mayo 2017 se alcanzó un valor de 0.9, muy cercano a valores típicos de aguas salobres.

Tabla 53 Resumen estadístico de mediciones automáticas de salinidad, El Coco

Pozo	Periodo	S (PSU)					
		Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo
CN-245 (n=12557)	1/10/2017- 6/6/2018	0.33	0.33	0.33	0.00075	0.21	0.46
CN-741 (n=12555)	1/1/2017- 6/6/2018	0.47	0.47	0.47	0.00816	0.37	0.9
CN-742 (n=12068)	1/1/2017- 17/5/2018	0.35	0.36	0.38	0.00272	0.21	0.53

En los resultados de la campaña de muestreo realizada en el mes de julio del año 2019 se tuvo un promedio de 0.2625 PSU, valor máximo de 0.3 y mínimo de 0.2. Donde los puntos de muestreo con valores de 0.3 son los cercanos a la línea de costa (PM-0.3, PM-04, PM-05, PM-06 y PM-08) y los que se encuentran más alejados tienen resultados de 0.2 (PM-09, PM-10, PM-11).

### 6.5.1.3 pH, Alcalinidad y Dureza Total

Los resultados de los 12 muestreos de agua subterránea realizados por Gómez (2005) presentan valores de pH promedio iguales a 7.15 con valores mínimos de 6.88 y máximo de 7.48 y una desviación estándar de 0.18. Posteriormente utilizando con los resultados del monitoreo semestral del LNA, entre el año 2007 a inicios del 2019, y el muestreo realizado para esta investigación en julio 2019, se tienen 150 mediciones con las cuales se identifica un valor promedio de 7.20 con valores mínimos de 4.19 y máximo de 8.42 y una desviación estándar de 0.478. Este aumento en la variabilidad de los valores entre ambos muestreos se asocia a la diferencia del rango temporal de los periodos de muestreo.

De manera general, el promedio del pH se mantiene relativamente constante y cercano a 7. De un total de 170 mediciones, el 77.5% se encuentran entre 6.5 y 7.5, el 19.5% son superiores a 7.5 y únicamente el 2.9% menores a 6.5. No se identificó una variación temporal o espacial significativa.

Integrando los valores de alcalinidad obtenidos a partir del muestreo realizado por Gómez (2005), el realizado para esta investigación en julio 2019 y el monitoreo semestral del LNA con datos entre el año 2007 a inicios del 2019 se obtiene:

Tabla 54 Resumen estadístico de resultados de alcalinidad del registro histórico, El Coco (n=164)

Acuífero	Periodo	Alcalinidad (mg/L)					
		Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo
El Coco	2003-2019	197	195	179	786	135	284

De igual manera para el análisis de la dureza total:

Tabla 55 Resumen estadístico de resultados de dureza total del registro histórico, El Coco (n=146)

Acuífero	Periodo	Dureza Total (mg/L)					
		Promedio	Mediana	Moda	Varianza	Mínima	Máximo
El Coco	2003-2019	201.77	193	189	1093.55	143	369

Ambos parámetros poseen un comportamiento relativamente constante en cada uno de los puntos monitoreados a lo largo del periodo. En los resultados del muestreo realizado en junio del 2019 se identificó una tendencia espacial de ambos parámetros. Las muestras PM09, PM10 y PM11, tomadas en sectores más alejados de la costa y más cercanas a las partes altas de la cuenca, presentan valores significativamente menores de alcalinidad y dureza (ver Figura 105). De manera general, según la clasificación sugerida por el USGS (2020) para la dureza del agua, los resultados de los análisis del registro histórico y los resultados de las muestras tomadas en el sector costero y central del acuífero corresponden con aguas predominantemente muy duras; las muestras tomadas en sectores más distantes se clasifican como aguas duras.

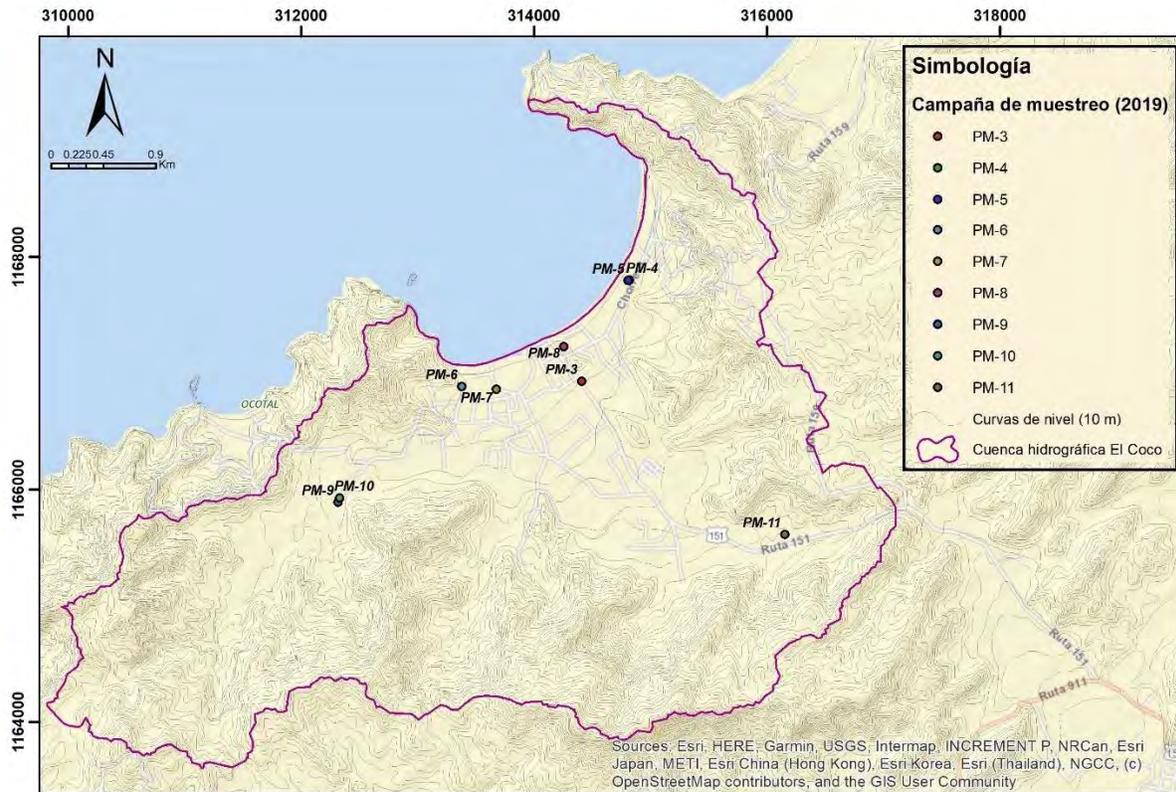


Figura 105 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de agua

Tabla 56 Resultados de alcalinidad y dureza, muestreo julio 2019, El Coco

Pozo	Alcalinidad	Dureza
PM-03	267	323
PM-04	284	369
PM-05	245	336
PM-06	238	341
PM-08	267	355
PM-09	172	181
PM-10	173	189
PM-11	137	153

#### 6.5.1.4 Iones Mayores

##### 6.5.1.4.1 Cationes

La concentración de los cationes predominantes en el agua subterránea de este acuífero, según el registro histórico, mantiene el siguiente orden:  $Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^{+} > K^{+}$ . Los valores de concentración de calcio en el acuífero se encuentran dentro del rango admisible definido por el MINSa (2005), donde se fija un valor máximo admisible de 100 mg/L, además, el rango es concordante con lo registrado el acuífero Playa Panamá y en otros acuíferos vecinos como los son Potrero y Brasilito (Monge, 2015).

El magnesio es el segundo más abundante y los valores registrados se encuentran dentro del rango recomendado por el Reglamento de Agua potable en vigencia (MINSa, 2005), en el cual se tiene un valor recomendado de 30mg/L y un valor máximo admisible de 50 mg/L. En el registro histórico no se tenían antecedentes de mediciones de los valores de magnesio que sobrepasaran este valor recomendado, en el muestreo realizado en julio 2019 las muestras PM04, PM05 Y PM08 presentan valores de 37.8, 33.8 y 32.8 mg/L respectivamente.

Al igual que el ion potasio, los resultados de la concentración de sodio se encuentran dentro de los valores recomendados por el MINSa (2005). A continuación, se muestran los resultados del análisis del registro histórico disponible:

Tabla 57 Resumen estadístico de la concentración de cationes mayores del registro histórico, El Coco

Cación	n	Promedio (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Reglamento de Agua Potable (MINSa,2005)	
						Valor recomendado (mg/L)	Valor máximo admisible (mg/L)
$Ca^{+2}$	122	47.05	45.05	4.5	94.1	<b>100</b>	-
$Mg^{+2}$	122	20.25	19.6	13.9	37.8	<b>30</b>	<b>50</b>
$Na^{+}$	114	10.77	9.8	7.2	34.9	<b>25</b>	<b>200</b>
$K^{+}$	74	1.11	0.8	0.1	5.97	-	<b>10</b>

Si bien es cierto, las concentraciones históricas cumplen con el estándar de calidad de agua potable vigente. Se identificó un aumento en la concentración general de todos los cationes entre el muestreo efectuado por Gómez (2005) y el realizado en julio 2019 para esta investigación. Ambas campañas de muestreo poseen sitios distribuidos a lo largo de todo el acuífero. La mayor diferencia está en las concentraciones de calcio y magnesio, el promedio de los resultados de la campaña realizada en el 2019 se acerca a los valores recomendados lo que implica un detrimento de la calidad de agua para consumo en los últimos años.

Tabla 58 Comparación de resultados de las campañas de muestreo 2005 y 2019, El Coco

Cación	Gómez (2005) (n=12)				Julio 2019 (n=8)			
	Ca <sup>+2</sup> (mg/l)	Mg <sup>+2</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Ca <sup>+2</sup> (mg/l)	Mg <sup>+2</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)
Mínimo	37	16	8.5	1	35.23	15.75	10.08	0.23
Máximo	74	30	20	1	94.1	37.8	34.9	5.97
Promedio	49.5	21.08	13.45	1	69.49	26.06	19.25	2.32
Mediana	42.5	19.5	12.5	1	80.6	27.1	18.52	2.05

A partir de un análisis detallado de la variación temporal de los cationes en los pozos del acueducto durante el periodo 2007-2019, se observó un comportamiento estable de las concentraciones de sodio, potasio y magnesio, en el caso del calcio se observa mayor variabilidad en los valores registrados. Estos pozos se encuentran concentrados en el sector central del acuífero.

En la Figura 106 se muestra el registro del pozo 4, el cual, debido a su cercanía, se considera representativo para los pozos mencionados. En este se observa un incremento importante en la concentración del calcio durante la época lluviosa del año 2009 y los meses posteriores, luego, este comportamiento se repite en menor magnitud durante los años 2010, 2011 y 2014.

Posterior a dos años de ocurrencia del fenómeno El Niño (2014 y 2015) en noviembre 2016 se registró un aumento significativo que se mantiene constante hasta registrar un nuevo aumento entre setiembre 2017 y mayo 2018. Estos ascensos en la concentración del calcio podrían estar asociados a la lixiviación de carbonatos presentes en el suelo como consecuencia del aumento de la cantidad de precipitación producto de la ocurrencia del fenómeno de la Niña y eventos climáticos extremos como lo fueron el Huracán Otto (noviembre 2016) y la Tormenta Tropical Nate (octubre 2017).

En los resultados del muestreo realizado para esta investigación, se identificó una tendencia espacial de las concentraciones de los cationes. Este comportamiento coincide con lo observado para los parámetros analizados en la sección anterior. Las muestras PM09, PM10 y PM11 tomadas en sitios alejados de la costa presentan concentraciones menores, cercanas a la mitad de las concentraciones que registran las muestras PM3, PM4, PM5, PM6 Y PM8.

Tabla 59 Tendencia espacial de las concentraciones de cationes, El Coco

Sector	Muestra	Cación (mg/l)			
		Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
Costero	PM-03	82.5	28.4	17.89	0.25
	PM-04	85.4	37.8	21.8	3.39
	PM-05	78.7	33.8	19.15	3.3
	PM-06	94.1	25.8	34.9	5.97
	PM-08	88.1	32.8	20.73	0.23
Medio	PM-09	46	16.19	16.16	-
	PM-10	45.9	17.94	13.32	-
	PM-11	35.23	15.75	10.08	0.8

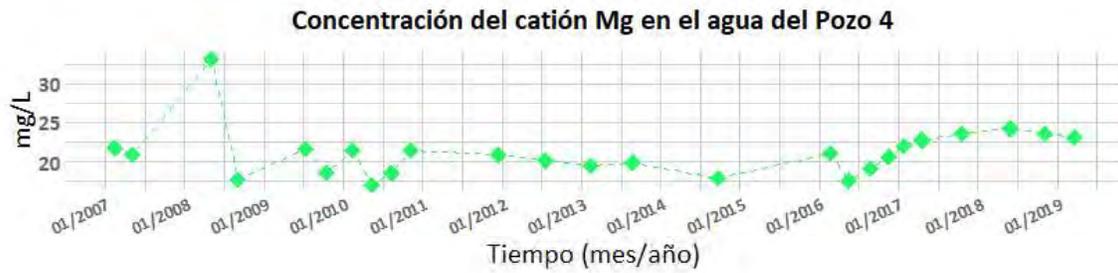
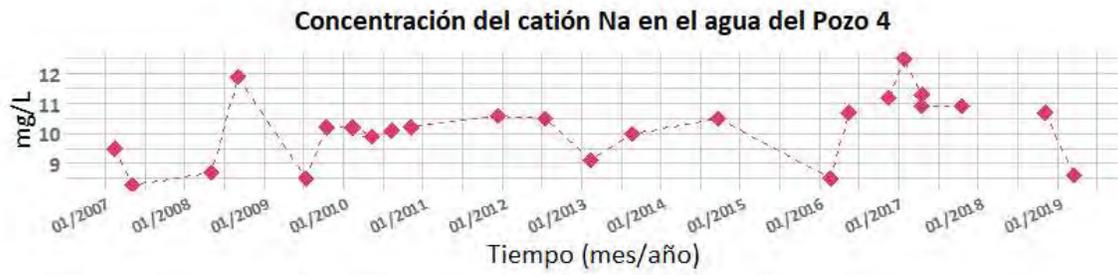


Figura 106 Registro de monitoreo del Pozo 4, concentración de cationes en el agua

#### 6.5.1.4.2 Aniones

La concentración de los aniones predominantes en el agua subterránea de este acuífero, según el registro histórico, mantiene el siguiente orden:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ . Lo anterior es una tendencia consistente entre todos los sitios de los cuales se tienen mediciones y se mantiene a lo largo del periodo analizado. El ion bicarbonato es el más abundante con concentraciones en el rango de 132 a 346 mg/L y con un valor promedio de 204.77 mg/L.

Según el registro histórico, todos los anteriores, de manera general, se encuentran dentro del rango de potabilidad del reglamento vigente, sin embargo, se tiene registro de valores por encima del valor recomendado e incluso cercanos al valor máximo admisible.

Tabla 60 Resumen estadístico de la concentración de cationes mayores del registro histórico, El Coco

Anión	n	Promedio (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Reglamento de Agua Potable (MINSA,2005)	
						Valor recomendado (mg/L)	Valor máximo admisible (mg/L)
$\text{Cl}^-$	96	8.49	6.3	2.8	48.67	25	250
$\text{SO}_4^{2-}$	95	14.83	13.2	4	54	25	250
$\text{NO}_3^-$	90	12.07	11.68	0.81	49.9	25	50
$\text{HCO}_3^-$	123	204.77	198.45	132	346	-	-

No obstante, las concentraciones históricas cumplen con el estándar de calidad de agua potable vigente. Se identificó un aumento en la concentración general de todos los aniones entre el muestreo efectuado por Gómez (2005) y el realizado en julio 2019 para esta investigación. Ambas campañas de muestreo poseen sitios distribuidos a lo largo de todo el acuífero. La mayor diferencia está en las concentraciones de sulfato y nitrato, el promedio de los resultados de la campaña realizada en el 2019 duplica los resultados presentados hace 15 años. Lo anterior es preocupante ya que el aumento tanto del sulfato como del nitrato podrían estar asociados a contaminación antropogénica.

Tabla 61 Comparación de resultados de las campañas de muestreo 2005 y 2019, El Coco.

Anión	Gómez (2005) (n=12)				Julio 2019 (n=8)			
	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)
Mínimo	194	4	0.81	3.75	167	9.4	5.2	2.8
Máximo	307	25.81	24.9	48.67	346	54	49.9	28.5
Promedio	251.16	12.26	8.63	13.3	271.62	28.9	19.76	15.65
Mediana	244	8.16	6.4	6	294	31.25	18.1	18.25



Figura 107 Registro de monitoreo del Pozo 4, concentración de aniones en el agua

El análisis de la variación de la concentración de los aniones en los pozos del acueducto se dificulta debido a la discontinuidad temporal en el registro del monitoreo. Sin embargo, como se observa en la Figura 107, la variabilidad del cloruro, sulfato y nitrato tiene cierta relación con la estacionalidad climática y destacan dos periodos en el que aumentan las concentraciones de los tres aniones, el año 2012 y el periodo 2017-2018.

En los resultados del muestreo realizado para esta investigación se identificó una tendencia espacial de las concentraciones de los aniones (Ver Tabla 62). Este comportamiento coincide con los resultados de las secciones anteriores. Las muestras PM09, PM10 y PM11 tomadas en sitios alejados de la costa presentan un promedio 5.5 veces menor de cloruro, 2.9 veces menor de sulfato, 3.6 veces menor de nitrato y 1.6 veces menor que las concentraciones que registran las muestras PM3, PM4, PM5, PM6 Y PM8, tomadas en pozos cercanos a la costa.

Tabla 62 Tendencia espacial de las concentraciones de aniones, El Coco

Sector	Muestra	Anión (mg/l)			
		Cl	NO3	SO4	HCO3
Costero	PM-03	16.2	11.8	28.7	325
	PM-04	24.5	19.8	44	346
	PM-05	20.3	22.1	33.8	298
	PM-06	23.5	49.9	54	290
	PM-08	28.5	27.4	38.2	326
Medio	PM-09	4.9	5.5	11.2	210
	PM-10	4.5	5.2	9.4	211
	PM-11	2.9	16.4	11.9	167

#### 6.5.1.4.3 Índices Hidrogeoquímicos

Según Custodio & Llamas (1996), la determinación de la relación entre los iones disueltos indica la acción de fenómenos modificadores o características específicas del agua. Por esta razón, se procedió a utilizar estos índices con la intención de comprender las posibles causas de la diferenciación espacial en la concentración de aniones y cationes visualizada en los resultados de la campaña de muestreo realizada en julio 2019.

Tabla 63 Comportamiento espacial de los índices hidrogeoquímicos, El Coco

Sector	Muestra	rMg/rCa	rCa/rMg	rNa/rCl	rK/rNa	rCl/rHCO3	rSO4/rCl	ICB	ICB-
Costero	PM-03	0.57	2.90	1.68	0.01	0.09	1.29	-0.69	-0.05
	PM-04	0.74	2.26	1.35	0.09	0.12	1.31	-0.48	-0.05
	PM-05	0.72	2.33	1.44	0.10	0.12	1.21	-0.58	-0.06
	PM-06	0.46	3.65	2.26	0.10	0.14	1.68	-1.49	-0.15
	PM-08	0.62	2.69	1.11	0.01	0.15	0.98	-0.11	-0.01
Medio	PM-09	0.75	2.84	3.17	--	0.04	2.00	-2.17	-0.08
	PM-10	0.65	2.56	4.50	-	0.04	1.52	-3.50	-0.12
	PM-11	0.75	2.24	5.48	0.05	0.03	3.10	-4.73	-0.12

Según Castillo & Morell (1988) y Custodio & Llamas (1996), un aumento en la concentración de cloruro, junto a un aumento en la relación rMg/rCa, es un indicador de intrusión marina. En este caso esto no se cumple ya que esta relación presenta valores relativamente uniformes en los sitios muestreados, por lo tanto, es un indicio de que el aumento de la concentración de cloruro en el sector costero, con respecto al distal, podría no estar relacionado con la interacción con una zona de mezcla. El rango típico de esta relación para aguas continentales está entre 0.3 y 1.5 y para el agua de mar cercano a 5. En cuanto a rCa/rMg, Kumar et al. (2009) menciona que relaciones con valores superiores a 2 sugieren la disolución de silicatos.

La relación rNa/rCl es utilizada para identificar proceso de cambio de bases, debido a que el ión cloruro no es afectado por la retención con el terreno y el ión sodio si, esta puede verse alterada por la alteración de silicatos que potencialmente liberan sodio al agua (Herrera Lameli, 2001). Según Kumar et al. (2009), la meteorización de silicatos provoca valores de esta relación superiores a 1. En el sector distal se tienen altos valores de esta relación, evidenciando un "exceso" de sodio con respecto al cloruro. En el sector costero la concentración de ambos iones es mayor, sin embargo, el aumento del ion cloruro causa un descenso en esta relación. Esta disminución puede estar

asociada a procesos de disolución de sales provenientes del suelo o mezcla del agua subterránea con aguas residuales (Panno et al., 2006).

Según Custodio & Llamas (1996), la relación  $rK/rNa$  decrece según aumenta la salinidad, sin embargo, esta relación se ve alterada considerablemente producto de la interacción entre el agua subterránea y el medio, ya sea suelo o roca. Los resultados del muestreo realizado en julio 2019 se encuentran dentro del rango típico para aguas dulces, entre 0.001 y 1, para el agua marina se tiene un rango típico entre 0.02-0.025 (Custodio & Llamas, 1996).

Revelle (1941) establece la importancia de la relación  $rCl/rHCO_3$  para la identificación de posibles interacciones del agua subterránea con el agua del mar ya que el cloruro es el ion predominante en el agua de mar y posee un rol pasivo en aguas subterráneas y que el bicarbonato es el anión más abundante en aguas subterráneas pero poco abundante en el agua de mar. Mtoni et al. (2013) definen que relaciones menores a 0.5 corresponden con aguas sin efectos de salinización, 0.5-6.6 corresponden con aguas con un efecto moderado y mayor a 6.6 para aguas fuertemente afectadas. En este caso no están afectadas por salinización.

La relación  $rSO_4/rCl$  suele utilizarse para identificar procesos de intrusión salina ya que el sulfato tiene una tendencia constante en aguas poco salinas (Custodio & Llamas, 1996). Sin embargo, los autores Castillo & Morell (1988) coinciden en que esta relación pierde peso cuando se tienen aportes externos de sulfato o existen procesos de reducción de sulfatos que alteren la tendencia natural del sulfato. Para este caso en específico, la concentración de sulfato es mayor en el sector costero (comportamiento idéntico al del nitrato), lo que sugiere que existe un aporte de sulfatos posiblemente relacionado a la mezcla con aguas residuales o superficiales contaminadas. El cloruro también posee un aumento, pero la causa de este puede ser tanto por la mezcla con agua de mar o aguas residuales.

El índice de desequilibrio entre cloruros y alcalinos, o el índice de cambio de bases (ICB), indica el sentido e intensidad de los procesos de intercambio iónico (Castillo & Morell, 1988). Custodio & Llamas (1996) indica que un aumento del índice se debe a endurecimiento del agua y una disminución indica un ablandamiento, además, menciona que los aumentos de salinidad pueden generar disminuciones en este índice. Los resultados del cálculo indican un endurecimiento de las aguas subterráneas en el sector costero, lo cual es coincidente con los valores de dureza obtenidos.

#### 6.5.1.4.4 Diagrama Piper

A partir del análisis de este diagrama y la información presentada previamente, se identificó que los resultados, indiferentemente de la distribución espacial y temporal, presentan la uniformidad necesaria para identificar la correspondencia con un único acuífero, el cual, de manera general basado en el análisis de sus iones mayores, ha presentado escasa variación en su composición, manteniendo la caracterización realizada por Gómez (2005) como aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas. En la Figura 108 se observa claramente la diferencia de las concentraciones de sulfato, cloruro y nitrato entre las muestras tomadas en sitios cercanos a la costa y las tomadas en sitios más alejados.

#### 6.5.2 Características microbiológicas

Gómez (2005) identificó cantidades elevadas de coliformes fecales en la quebrada San Francisco y el mar. Además, identificó los drenajes y tanques sépticos como focos potenciales de contaminación para el agua subterránea. El registro histórico del periodo 1999 al 2019, del monitoreo realizado por el LNA, cuenta con mediciones mensuales en los pozos del acueducto El Coco.

De un total de 1003 mediciones en los diferentes pozos, únicamente 15 presentaron resultados positivos a presencia de coliformes fecales, con valor mínimo de  $1 \times 100/ml$  y máximo  $29.9 \times 100/ml$ , cuando el MINSA (2005) estipula que deben estar ausentes. En cuanto a las mediciones de bacteria *Escherichia coli*, únicamente tres mediciones la reportaron presente.

Estas mediciones se encuentran distribuidas a lo largo de los años de manera esporádica, por lo tanto, se considera que en este sector, a la fecha, no existe contaminación microbiológica en el acuífero. Sin embargo, esto

no se descarta en otros sectores del acuífero ni en otros puntos de extracción ya que intervienen diversos factores específicos. Se recomienda, de igual manera, monitorear estos parámetros debido a su antecedente en las aguas superficiales.

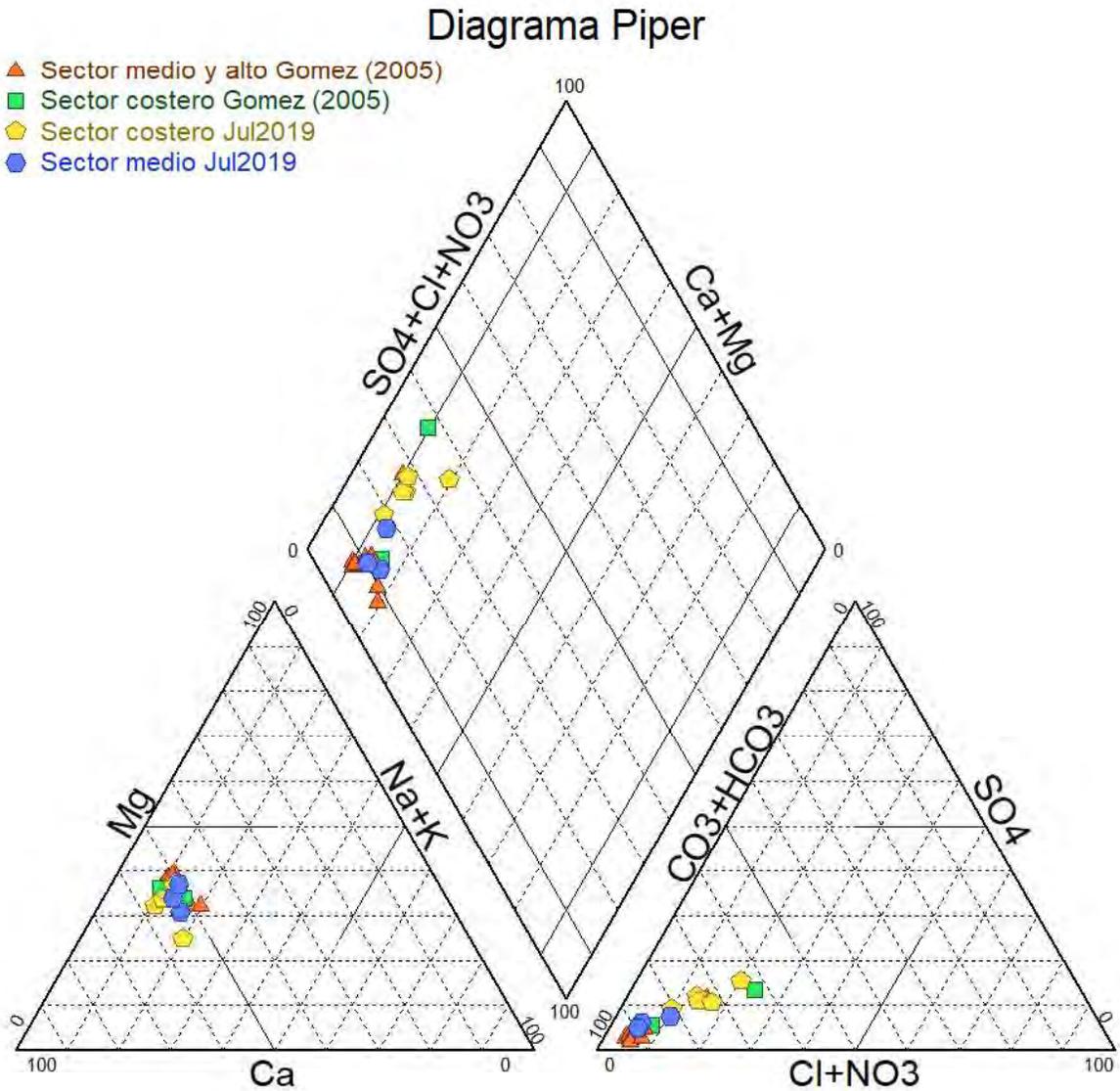


Figura 108 Diagrama Piper del registro histórico de análisis de iones mayores, El Coco

## 6.6 Vulnerabilidad del acuífero

Gómez (2005) identificó como principales focos de contaminación, la deforestación, drenajes de aguas grises y negras a las quebradas, tanques sépticos mal diseñados, botaderos clandestinos, industria de pescados y el crecimiento urbano turístico de la mano de la carencia de acueductos. La autora aplicó el método GOD obteniendo valores de vulnerabilidad alta y extrema, aproximadamente en el 70% de la extensión del acuífero. La vulnerabilidad extrema fue identificada principalmente a lo largo de la línea de costa, sector que, según los datos presentados en la sección anterior, presenta la mayor deficiencia en calidad del agua tomando en consideración la conductividad eléctrica y concentración de iones como el nitrato, indicador de contaminación antropogénica.

Para determinar la vulnerabilidad del acuífero se aplicó el método DRASTIC. Para esto se generaron mapas para cada uno de los siete factores, estos se adicionan para generar el mapa del índice DRASTIC tanto para contaminantes no pesticidas y pesticidas (ver Figura 109 y Figura 110). En ambas figuras es posible visualizar que las tendencias espaciales de los factores de profundidad del agua subterránea y topografía son las que poseen mayor influencia en el resultado final.

El índice se clasificó según lo presentado en la Tabla 14 para representar la vulnerabilidad relativa del acuífero de los depósitos aluviales de la cuenca. Las zonas identificadas como de vulnerabilidad relativa alta para pesticidas y media para otros contaminantes se encuentran en los límites laterales de los depósitos recientes, especialmente en los sitios donde el agua se encuentra a mayor profundidad y hay mayores ángulos de pendiente. Esta representa los rangos entre 149-180 para pesticidas y 116-140 para otros contaminantes.

Las zonas que califican como de vulnerabilidad relativa muy alta para pesticidas y alta para ambos tipos de contaminantes, como se observa en la Figura 109 y Figura 110, presentan un alto grado de desarrollo e infraestructura. El Coco es el principal centro de comercio de la zona, además del predominante desarrollo turístico como hoteles, bares y restaurantes, también hay gran cantidad de domicilios, apartamentos y condominios, así como tiendas de conveniencia, escuelas, colegios, sucursales bancarias y un servicentro. Es importante que se apliquen medidas de gestión ambiental preventivas, así como un manejo riguroso de las aguas residuales y desechos sólidos.

Tras un análisis e inventariado de la infraestructura presente en la cuenca, además de las casas de habitación se tiene registro de ocho hoteles, noventa y nueve casas o villas de alquiler vacacional, veinticinco restaurantes, nueve supermercados, treinta comercios, una gasolinera entre otros.

Es importante mencionar que los pozos artesanales y perforados, en caso de un uso incorrecto o por falta de protección, pueden ser fuentes de contaminación ya que brindan acceso directo al agua subterránea. En la campaña de muestreo y análisis físico químicos, realizados para esta investigación en julio 2019, se registraron conductividades eléctricas superiores a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y se encontraron concentraciones de ion nitrato promedio de 19 mg/L, cercanas al límite recomendado por el (MINSA, 2005), coincidentemente con pozos ubicados dentro de las zonas de mayor vulnerabilidad.

En el Anexo 12 se presenta el mapa y el listado de los comercios identificados y existentes a la fecha de elaboración del presente trabajo. En este listado se presenta las coordenadas de su ubicación y nombre comercial.

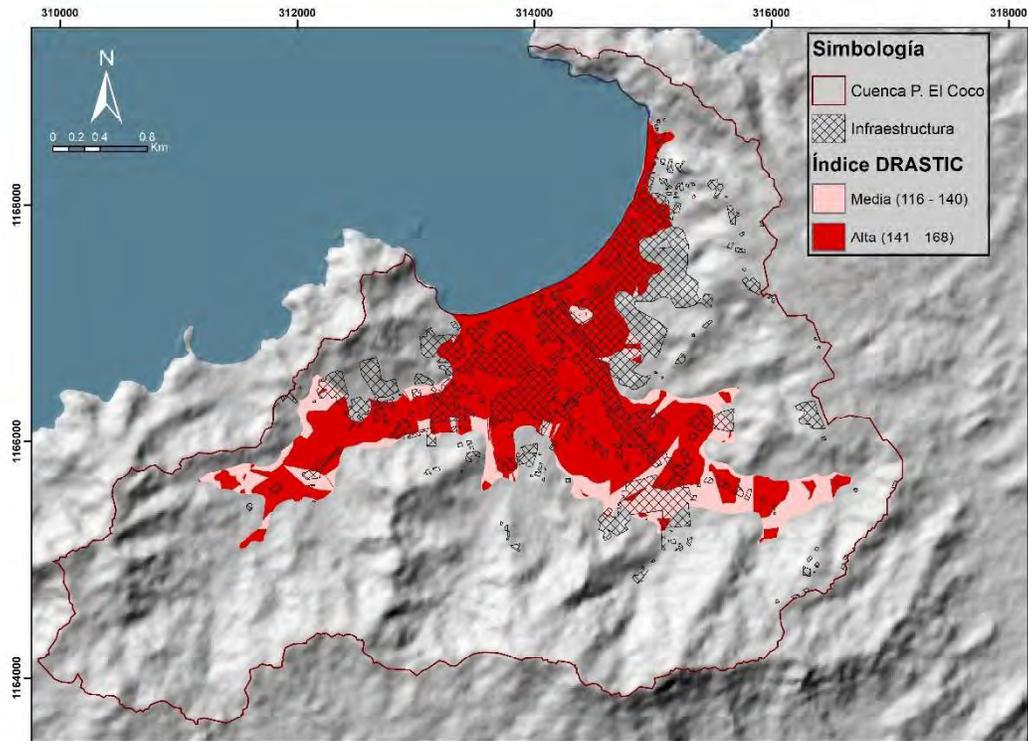


Figura 109 Mapa de vulnerabilidad relativa, El Coco

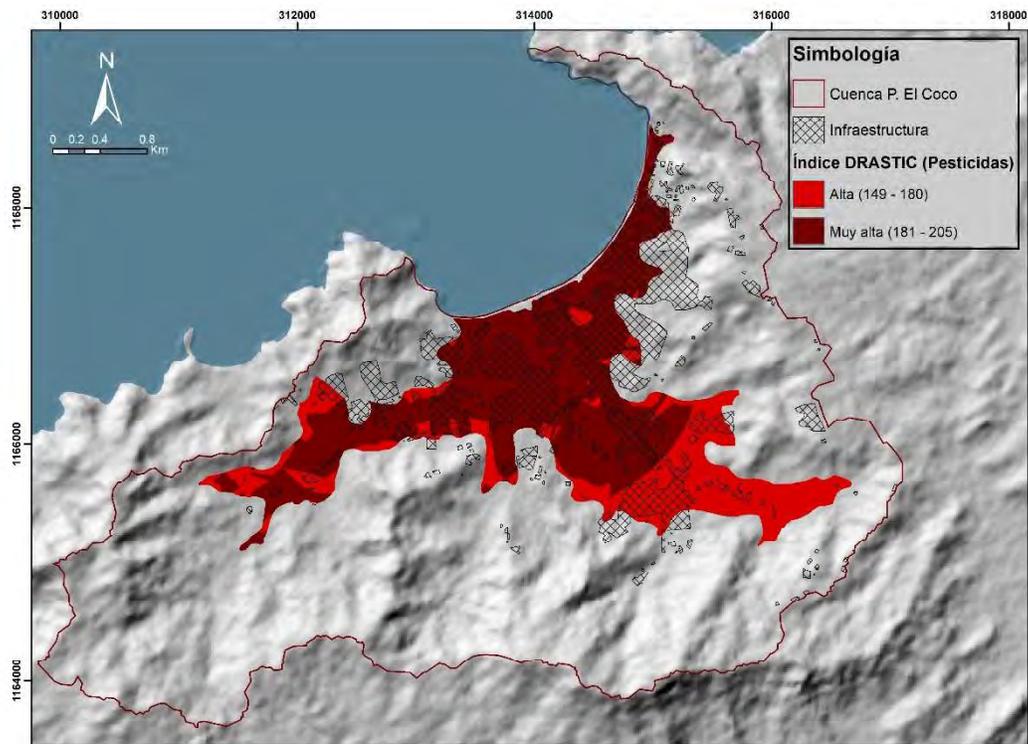


Figura 110 Mapa de vulnerabilidad relativa (pesticidas) El Coco

## 7 Síntesis del Modelo Conceptual

Las cuencas Playa Panamá y El Coco se encuentran dentro de un contexto geológico semejante y, por su cercanía, están sujetas a condiciones climáticas similares. El acuífero principal de cada uno de los sistemas corresponde con los depósitos recientes inconsolidados, ubicados en la parte baja de las cuencas.

La recarga de los sistemas acuíferos se da durante la época lluviosa, principalmente durante los meses de mayor intensidad y cantidad de lluvia (septiembre y octubre). Se estima que la recarga potencial total del sistema corresponde con el 25,8% de la precipitación anual para Playa Panamá y el 23% en el sistema acuífero El Coco. A través del análisis de hidrogramas de pozos de los dos acuíferos principales, se determinó que la recarga directa tiene un efecto inmediato en la profundidad del agua subterránea y, producto de la falta de precipitación durante la época seca, el nivel freático puede descender entre tres y cinco metros.

En el caso del acuífero Playa Panamá, la recarga potencial directa corresponde con el 15.5% del total anual del sistema acuífero y, según el modelo propuesto en investigaciones previas, el restante 84.5% recargado directamente en los acuíferos secundarios descarga en el acuífero principal generando recarga indirecta. De igual manera sucede en el sistema acuífero El Coco. La recarga directa en el acuífero principal corresponde con el 26.6% de la recarga potencial total anual del sistema y el restante 73.4% corresponde con la recarga directa potencial que reciben los acuíferos secundarios, los cuales descargan en el acuífero principal.

Es importante destacar que a pesar de que los depósitos recientes de ambos sistemas acuíferos se consideran los acuíferos principales, la capacidad acuífera demostrada de los acuíferos secundarios correspondientes con el Complejo de Nicoya y la Formación Bagaces, puede ser de gran utilidad para el abastecimiento de los habitantes de ambas cuencas. Además la recarga lateral que estos generan en el acuífero principal posee un papel esencial para la estabilidad del sistema acuífero.

Ambos acuíferos principales descargan directamente en el Océano Pacífico, esta conexión hidráulica directa con el océano genera naturalmente una transición difusa entre el agua dulce continental y el agua de mar. La morfología y penetración de esta zona de transición es completamente dependiente de cualquier variación del flujo del agua proveniente de la descarga de los acuíferos o de las variaciones de presión que genera la marea sobre los acuíferos. Con base en los datos generados y analizados en esta investigación no se identifican indicios de contaminación por intrusión salina en pozos de abastecimiento público en ninguno de los dos acuíferos. Sin embargo es necesario profundizar y aplicar análisis químicos de iones menores y traza así como métodos geofísicos para identificar la posible variación de ubicación de las zonas de mezcla e intrusión de la misma en ambos acuíferos.

Las concentraciones de iones mayores en disolución, según el resultado de los análisis físico-químicos realizados en julio 2019, son inferiores al valor máximo admisible en el reglamento de agua potable vigente. Sin embargo, el valor promedio de conductividad eléctrica de ambos acuíferos es superior a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (valor recomendado, MINSA (2005)), esto implica que su consumo posee un riesgo mínimo o aceptable.

La vulnerabilidad intrínseca es mayor en los sectores de menor pendiente y donde el nivel de agua se encuentra a menor profundidad. También los sectores costeros debido a la interacción directa con la zona de dispersión salina poseen altos índices de vulnerabilidad. Además de su condición natural de vulnerabilidad, los sectores costeros cuentan con el mayor grado de desarrollo turístico y comercial, ocasionando que posean menor calidad de agua subterránea para consumo humano respecto a las demás zonas.

En la Tabla 64 se presenta un resumen de las propiedades hidrogeológicas de ambos acuíferos como la geometría, parámetros hidráulicos, recarga y calidad de agua.

Tabla 64 Resumen de las propiedades de los acuíferos principales de las cuencas de estudio

	Acuífero Playa Panamá	Acuífero El Coco	
Área (km <sup>2</sup> )	3.38	4.62	
Composición	Depósitos aluviales coluviales y costeros	Depósitos aluviales coluviales y costeros	
Tipo	Poroso libre	Poroso libre	
Espesor promedio (m)	20	15	
Dirección de flujo predominante	NW	N	
Coefficiente de almacenamiento	0.024-0.03	0.03-0.034	
Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	462-1197	768-795	
Conductividad hidráulica (K) (m/día)	27.4-81.7	31.8-41.7	
Gradiente hidráulico (i)	0.012	0.006	
Precipitación promedio histórica (mm)	1566		
Volumen de recarga directa potencial (m <sup>3</sup> /año)	1,254,036	1,897,274	
Volumen de recarga indirecta potencial (m <sup>3</sup> /año)	6,823,486	5,223,048	
Recarga total Huracán Otto (% del total llovido)	3.34	13.28	
Recarga total Tormenta Tropical Nate (% del total llovido)	10.9	20.3	
Temperatura (C°)	28.7-30.4	28.6-29.3	
Conductividad eléctrica promedio (μS/cm)	423.5	Sector costero	Sector medio
		736	413
Concentración Ca <sup>+2</sup> promedio (2019)	59.45	85.76	42.37
Concentración Mg <sup>+2</sup> promedio (2019)	23.54	31.72	16.6
Concentración Na <sup>+</sup> promedio (2019)	16.41	22.89	13.18
Concentración K <sup>+</sup> promedio (2019)	0.175	2.628	0.8
Concentración Cl <sup>-</sup> promedio (2019)	6.6	22.6	4.1
Concentración SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> promedio (2019)	8.8	38.2	10.8
Concentración NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> promedio (2019)	5.75	26.2	9
Concentración HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> promedio (2019)	282.5	317	196
Clasificación según Piper	Bicarbonatadas cálcico-magnésicas	Bicarbonatadas cálcico-magnésicas	
Índice DRASTIC de vulnerabilidad	Media (99-140) y Alta (141-157)	Media (116-140) y Alta (141-168)	

En la Figura 111 y Figura 112 se presenta un esquema en tres dimensiones del modelo hidrogeológico conceptual de cada sistema acuífero.

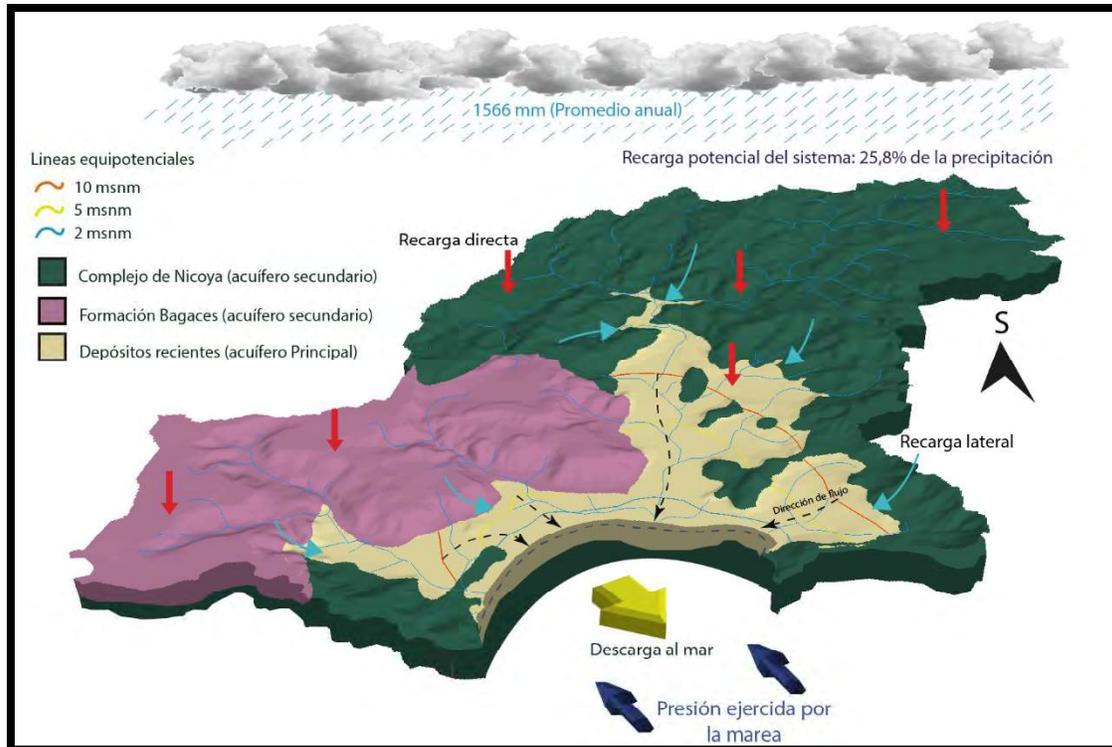


Figura 111 Esquema del Modelo Conceptual Hidrogeológico. Acuífero Playa Panamá

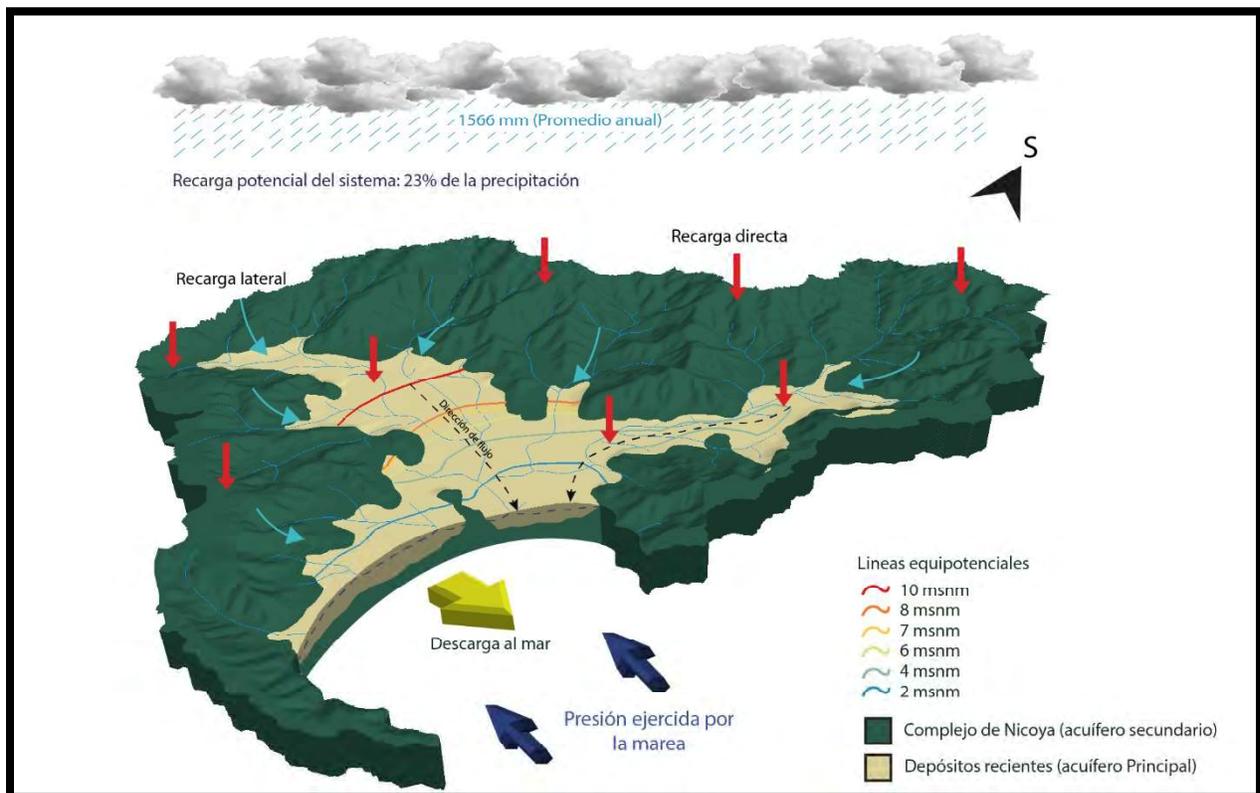


Figura 112 Esquema del Modelo Conceptual Hidrogeológico. Acuífero El Coco

## 8 Conclusiones

Se actualizó el modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos costeros Playa Panamá y El Coco por medio del cálculo de la recarga empleando diferentes metodologías, de las cuales algunas no habían sido aplicadas en los estudios previos realizados en estos acuíferos. Además, se realizó la caracterización hidrogeoquímica del agua y se revisó a la luz de la relación de varios índices hidrogeoquímicos y su comportamiento temporal.

A partir de la metodología del balance hídrico, se recalculó la recarga potencial anual de ambos sistemas acuíferos. Se tiene que el sistema acuífero Playa Panamá, recibe aproximadamente 8,077,522 m<sup>3</sup>/año a través de recarga directa y el sistema acuífero El Coco, recibe una recarga directa de 7,120,322 m<sup>3</sup>/año. Ambos resultados son semejantes a los obtenidos en las investigaciones previas. Un total de 6,496,423 m<sup>3</sup>/año por Murillo (2007) y 8,019,614 m<sup>3</sup>/año por Arredondo (2009) para Playa Panamá y 5,747,408 m<sup>3</sup>/año por Gómez (2005) para El Coco. La diferencia entre los resultados se atribuye principalmente a variantes metodológicas para la determinación de los factores utilizados para la evapotranspiración real (C1,C2) , la precipitación que infiltra (Cfo, Kfc, Kp y Kv) y el nivel de detalle de la interpretación y zonificación del uso de suelo actual, no precisamente a variaciones significativas en la cobertura y uso de suelo.

El 59.9% de la recarga directa potencial del sistema acuífero Playa Panamá ocurre en los basaltos del Complejo de Nicoya, el 24.6% ocurre en la formación Bagaces y el 15% ocurre en los depósitos aluvionales. Estos últimos son considerados el acuífero principal debido a que según la red de flujo estos reciben recarga indirecta de los basaltos del Complejo de Nicoya y la formación Bagaces.

El 73.4% de la recarga directa potencial del sistema acuífero El Coco ocurre en los basaltos del Complejo de Nicoya, el restante 26.6% ocurre en los depósitos aluvionales. De igual manera que para el sistema acuífero Playa Panamá, estos últimos son considerados el acuífero principal debido a que según la red de flujo estos reciben recarga indirecta de los basaltos del Complejo de Nicoya, otorgándole mayor capacidad acuífera.

Se analizó la influencia mareal el acuífero principal de la cuenca Playa Panamá y se aplicó la metodología de la eficiencia mareal y el retraso mareal para la determinación de los parámetros hidráulicos. A través de la primera metodología se obtuvo valores promedio de transmisividad (494 m<sup>2</sup>/d), coeficiente de almacenamiento (0.024) y conductividad hidráulica (27.4 m/d) concordantes con resultados de análisis de pruebas de bombeo preexistentes. Por otro lado, tras la aplicación de la segunda metodología se obtuvieron resultados para los tres parámetros que difieren hasta por dos órdenes de magnitud respecto a los otros dos métodos.

De igual manera para El Coco, se analizó la influencia mareal el acuífero principal y se aplicó la metodología de la eficiencia mareal y el retraso mareal para la determinación de los parámetros hidráulicos. A través de la primera metodología se obtuvo valores promedio de transmisividad (795 m<sup>2</sup>/d), coeficiente de almacenamiento (0.034) y conductividad hidráulica (31.8 m/d), estos son concordantes con resultados de análisis de pruebas de bombeo preexistentes. Tras aplicar el método del retraso mareal, se obtuvo valores promedio de transmisividad (2444 m<sup>2</sup>/d), coeficiente de almacenamiento (0.035) y conductividad hidráulica (97.8 m/d). De los anteriores se únicamente el coeficiente de almacenamiento es concordante con los otros dos métodos aplicados, los valores de transmisividad y conductividad hidráulica difieren por dos y un orden de magnitud respectivamente.

El método de la eficiencia mareal se considera un método válido y aplicable para la determinación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos costeros, este representa un complemento ideal para métodos tradicionales como las pruebas de bombeo.

El método del retraso mareal se considera un método válido y aplicable para la determinación del coeficiente de almacenamiento de los acuíferos costeros que presenten retrasos mareales mayores a 1 hora. Además, es importante destacar que este método sobreestima la transmisividad y conductividad hidráulica entre uno y dos órdenes de magnitud los resultados obtenidos por las pruebas de bombeo y el método de la eficiencia mareal.

Se calculó la recarga real de los acuíferos principales de ambas cuencas mediante el método del análisis de fluctuaciones de nivel en hidrogramas de pozos, este se aplicó en cinco periodos diferentes de tiempo. Lo anterior permitió determinar que este método subestima la recarga real, el grado de subestimación depende del periodo de análisis.

En el caso del acuífero principal de Playa Panamá, al aplicar el método para estimar la recarga neta anual se obtuvo que el 2.07% de la precipitación anual del año 2017 fue recargado, al reducir el periodo de cálculo a dos meses (setiembre y octubre) se obtuvo que el 2.84% de lo llovido fue recargado y al aplicarlo específicamente para la recarga neta producto del Huracán Otto y la Tormenta Tropical Nate se recargó un 3.34 y 10.9%.

Para el acuífero principal de El Coco, al calcular la recarga neta anual se obtuvo que el 1.49% de la precipitación anual del año 2017 fue recargado, al reducir el periodo de cálculo a dos meses (setiembre y octubre) se obtuvo que el 8.28% de lo llovido fue recargado y al aplicarlo específicamente para la recarga neta producto del Huracán Otto y la Tormenta Tropical Nate se recargó un 13.28 y 20.3%.

La diferencia entre los resultados para el acuífero Playa Panamá y El Coco se relaciona con que para el segundo fue posible aplicar el método en 6 puntos de monitoreo distribuidos a lo largo de todo el acuífero, en cambio, para el primero únicamente fue posible realizar el cálculo con tres puntos de monitoreo ubicados en un mismo sector.

El método WTF se considera método válido para la recarga neta de los acuíferos. Para tener la mayor efectividad del método, debe aplicarse idealmente tras periodos de precipitación y en periodos reducidos de tiempo. La diferencia entre la recarga estimada producto del Huracán Otto y la Tormenta Tropical Nate se asocia a la diferencia de intensidad de las lluvias durante ambos eventos climáticos. Además, el Huracán Otto ocurre al inicio de la época seca, en cambio, la Tormenta Tropical Nate sucede en el periodo de mayor intensidad de la época lluviosa. Esto implica diferencias considerables en la humedad y condiciones del suelo.

Se determinó la calidad del agua subterránea actual de los acuíferos principales de ambas cuencas y se analizó su comportamiento temporal mediante los análisis de la concentración de iones mayores en disolución disponibles y el monitoreo automático de parámetros.

Para el acuífero principal de Playa Panamá, se tiene que los iones calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato y nitrato se encuentran dentro del rango de potabilidad indicado por el reglamento del MINSA (2005). Sin embargo la conductividad eléctrica histórica promedio (423.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) supera el valor recomendado por este reglamento. Es importante destacar que específicamente el pozo CN-246 utilizado para abastecimiento público ha mantenido valores en el rango de 450 a 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durante los últimos 5 años según el encargado de la ASADA, lo anterior se corroboró en el muestreo realizado en 2019 (500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). El pozo CN-259 presenta mediciones recientes con promedio de 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Por último, el piezómetro de monitoreo CN-736 ubicado a 75 m de la costa presenta valores promedio de conductividad eléctrica (12.91 mS/cm) y salinidad (7.63 PSU) típicos de zona de mezcla. La ubicación de la zona de mezcla a esta distancia de la costa es concordante con lo identificado por Murillo (2007).

En cuanto al acuífero El Coco, el registro histórico de mediciones de los iones calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato y nitrato presentan concentraciones dentro del rango de potabilidad indicado por el reglamento del MINSa (2005). La conductividad eléctrica promedio histórica (408  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) supera el valor recomendado por este reglamento

Producto de la campaña de muestreo realizada para esta investigación, se tiene registro de concentraciones promedio de iones mayores significativamente mayores a los valores promedio del muestreo realizado por Gómez (2005). El ion calcio aumentó su concentración en un 29%, magnesio 19%, sodio 30%, potasio 57%, bicarbonato 8%, cloruro 15%, sulfato 58 % y nitrato 56%. A pesar de este aumento en promedio, el ion calcio, magnesio, sodio, potasio y cloruro se encuentran dentro del rango de potabilidad indicado por el reglamento del MINSa (2005); el ion sulfato (28.9 (mg/l) y nitrato (19.76 (mg/l) superan el valor recomendado por este reglamento. La conductividad eléctrica también aumentó (548  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), un 25% con respecto al medido por Gómez (2005).

Se identificó una tendencia espacial de la calidad del agua subterránea, el sector costero presenta valores de conductividad eléctrica y concentraciones de aniones y cationes significativamente superiores, por tanto una calidad de agua menor en comparación con los pozos muestreados en el sector medio.

Se determinó la vulnerabilidad relativa mediante la aplicación del método DRASTIC en ambos acuíferos principales. La vulnerabilidad va de media a muy alta ante contaminación por pesticidas y de media a alta por otros contaminantes. Los valores de mayor vulnerabilidad se encuentran en las zonas cercanas a la costa donde el nivel del agua subterránea es más somero y donde hay una mayor presencia de infraestructura. La zonificación generada por este método posee mayor resolución y detalle que la zonificación determinada a través del método GOD en investigaciones previas, sin embargo, ambas se consideran concordantes y efectivas. Ambas zonificaciones se validan tras una comparación con la tendencia espacial de la concentración del ion nitrato, asociado a contaminación antropogénica.

A partir del análisis de la variación de la precipitación, la recarga y la concentración de iones mayores en disolución, y mediante la comparación de los resultados de la presente investigación con investigaciones previas, se determinó que no ha ocurrido una variación del flujo apreciable en ninguno de los dos acuíferos principales. Por otra parte, se determinó que la calidad del agua subterránea ha sufrido un deterioro evidente en el aumento de la conductividad eléctrica y las concentraciones de iones en disolución en ambos acuíferos pero con mayor grado en el acuífero El Coco. Lo anterior asociado a la posible contaminación antropogénica en las cercanías de los puntos monitoreados.

Aproximadamente 15 años posteriores a la elaboración del primer modelo hidrogeológico conceptual de ambas cuencas, se determina que los cambios del uso de suelo no han sido lo suficientemente abruptos como para generar una reducción de la recarga potencial de ambos sistemas acuíferos. No se identificó disminución en la recarga del acuífero debido a la variabilidad climática. Para esto será necesario contar con un registro de datos que abarque mayor cantidad de años con los cuales se pueda analizar el efecto de fenómenos cíclicos como el ENOS y su efecto en la recarga de ambos acuíferos.

Con base en los datos generados y analizados en esta investigación no se identifican indicios de contaminación por intrusión salina en pozos de abastecimiento público en ninguno de los dos acuíferos. Sin embargo es necesario profundizar y aplicar análisis químicos de iones menores y traza así como métodos geofísicos para identificar la posible contaminación por intrusión salina o variación de ubicación de las zonas de mezcla e intrusión de la misma en ambos acuíferos.

Es importante destacar que, el aumento en la concentración del nitrato y el sulfato indican que el manejo inapropiado de las aguas residuales, las actividades humanas cotidianas y asociadas al desarrollo en las cuencas ha

causado un deterioro de la calidad de agua. Consecuentemente, se considera importante la implementación de planes de gestión y protección del recurso hídrico, así como la continua actualización del modelo conceptual de los acuíferos y su continuo monitoreo.

## 9 Recomendaciones

Realizar pruebas de bombeo con pozo testigo que permitan el cálculo de los parámetros hidráulicos de los acuíferos secundarios de ambos sistemas acuíferos, así como adicionar puntos de muestreo de suelos en estos sectores para mejorar la interpolación de los datos relacionados.

Detallar el modelo geológico y estructural local de la Formación Bagaces para identificar posibles acuíferos colgados y conocer la verdadera capacidad acuífera de los diferentes niveles de depósitos epivolcanoclásticos así como para corroborar el posible basculamiento de los estratos de esta formación producto de la Falla Los Chanchos.

Mantener y fortalecer el actual plan de monitoreo automático, mensual y semestral en ambos sistemas acuíferos. Mejorarlo a través de aforos periódicos de los cuerpos de agua superficiales, la automatización de la extracción de la información los sensores automáticos y a través de la adición de nuevos puntos de monitoreo en los acuíferos secundarios de ambos sistemas. Como parte de la recomendación, en el Anexo 11 se sugieren posibles sitios para la perforación de piezómetros y pozos existentes para la instalación de sensores de monitoreo, lo anterior, junto con la debida justificación.

Complementar el monitoreo automático a través de la instalación de equipo para el monitoreo de la zona vadosa, que permita estudiar el flujo y la hidrogeoquímica del agua de poro que se infiltra en la superficie y recarga de los acuíferos.

Realizar un monitoreo sistemático de la calidad del agua de los acuíferos que permita profundizar el análisis de las concentraciones de iones mayores y su relación con las distintas fases del fenómeno ENOS como lo son la fase Neutra, El Niño y La Niña.

Profundizar el análisis de hidrogramas de pozos y el análisis de las concentraciones de iones mayores posterior a eventos climáticos extremos, para comprender la inmediatez y la temporalidad de su influencia sobre el comportamiento del nivel freático y concentración de iones en disolución. Incluir una estación meteorológica en las cuencas monitoreadas que permita mejorar la precisión de las investigaciones y metodologías aplicadas.

Definir la ubicación actual de la zona de dispersión salina en ambos sistemas acuíferos utilizando métodos geofísicos y estudiar la posible contaminación por intrusión salina mediante análisis de isótopos ambientales o elementos traza como el bromo.

Elaborar un plan de desarrollo y ordenamiento territorial en ambas cuencas que contemple los mapas de vulnerabilidad intrínseca, permitiendo un desarrollo sostenible sin ocasionar cambios abruptos o desmedidos de la cobertura vegetal y uso del suelo.

Elaborar un sistema de alcantarillado diseñado para controlar la escorrentía y el drenaje de las aguas superficiales y residuales.

Aplicar la metodología utilizada en esta investigación para el cálculo de la recarga real en diferentes escalas de tiempo utilizando hidrogramas de pozos en un acuífero poroso cercano (por ejemplo Sardinal) para realizar un análisis comparativo y comprender las posibles variantes entre la aplicación del método, los resultados y el grado de subestimación de la recarga entre un acuífero costero y uno que no lo sea.

Desarrollar un script de programación que automatice el cálculo del procesamiento de los archivos ráster de cada uno de los insumos necesarios para el cálculo de la recarga potencial mediante el balance hídrico de suelos.

Desarrollar un script de programación que automatice el análisis estadístico, clasifique los eventos de precipitación según su intensidad y capacidad de producir recarga y, posteriormente, realice el cálculo de la recarga real de manera automática utilizando los datos de monitoreo horario y precipitación horaria.

## 10 Bibliografía

- Agüero-Valverde, J., & Pujol-Mesalles, R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. *Presentado En La VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía*, (September 2000), 20–22.
- Ajdary, K., & Kazemi, G. A. (2014). Quantification des variations du niveau et de la chimie de la nappe de Shahrood, Nord-Est de l'Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(2), 469–480. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1042-8>
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO (Vol. 56). <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529143>
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *NWWA/Epa-600/2-87-035*, 455.
- Alley, W., Reilly, T., & Franke, O. L. (1999). Sustainability of Groundwater Resources. *US Geological Survey Circular*, 1186. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00062-1>
- Alvarado, G., & Gans, P. . (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. *Revista Geológica de América Central*2, 46, 7–122.
- Alvarado, L. F., Contreras, W., Alfaro, M., Jimenez, E., & Solano, P. (2012). Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica. San José: Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Alvarado Piedra, P. (2018). *Hidrogeología de la margen izquierda del río Tempisque, sector central del cantón de Liberia, Guanacaste*.
- Angulo, F. (2015). Gestión del recurso hídrico y saneamiento en Costa Rica. En *Vigésimoprimer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José: Programa Estado de la Nación.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). Amsterdam, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90585-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90585-1)
- Arellano, F., & Vargas, A. (2001). Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la Península de Nicoya (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, 25, 77–84. Recuperado de <http://aguas.igme.es/igme/publica/tiac-01/Area IV-11.pdf>
- Arias, M. E. (2007). La primera experiencia en la aplicación de los métodos electromagnéticos en acuíferos costeros de Costa Rica: El caso de Tamarindo, Guanacaste. *Boletín Geológico y Minero*. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/705/2/1730>
- Arias, M. E., & Vargas, A. (2003). Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos costeros de costa rica. *Instituto Geológico y Minero de España*, (June).
- Arredondo, S. (2009). *Estudio Hidrogeológico para el balance hídrico y determinación de la disponibilidad de agua del acuífero aluvial de Playa Panamá, Guanacaste, Costa Rica*.
- Astorga, Y. (2009). Situación del Recurso Hídrico. In *Decimoquinto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José: Programa Estado de la Nación.
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E., & Lockington, D. A. (1999). Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 216(216), 17–31.
- Barrantes, Geisel. (2018). *Modelo volcanosedimentario e historia geológica del sector noreste de Lomas Barbudal (Guanacaste, Costa Rica)*. Universidad de Costa Rica.
- Barrantes, Gerardo, & Jiménez, L. (2004). El estado de las aguas continentales en Costa Rica, superficial y subterránea. En *Décimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José: Programa

Estado de la Nación.

- Blanco-Coronas, A. M., López-Chicano, M., Calvache, M. L., Sánchez-Úbeda, J. P., & Duque, C. (2018). Efectos producidos por la marea oceanográfica sobre la temperatura y la conductividad eléctrica del agua en el acuífero costero de Motril-Salobreña. En B. Andreo Navarro, E. Gimenez Forcada, & J. J. Durán Valsero (Eds.), *Agua Subterránea, Medio Ambiente, Salud y Patrimonio*. Salamanca.
- Bocanegra, E., & Custodio, E. (1994). Utilización de acuíferos costeros para abastecimiento. *Ingeniería Del Agua*, 1(4), 49–78.
- Boulding, J. R., & Ginn, J. S. (2004). *Practical Handbook of Soil, Vadose Zone, and Ground-Water Contamination: Assessment, Prevention, and Remediation* (2nd ed.). Lewis Publishers.
- Cardona, Y., Fernández, J. M., Toro Botero, M., & Monsalve Gómez, M. (2002). Análisis de mareas por el método de la descomposición en armónicos. In *VI Congreso Colombiano de Meteorología "Perspectivas Climáticas y el Desarrollo Sostenible en el siglo XXI"* (Vol. 5, pp. 83–89). Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Carr, P. A., & Van der Kamp, G. S. (1969). Determining Aquifer Characteristics by the Tidal Method. *Water Resources Research*, 5(5), 1023–1030.
- Castillo, E., & Morell, I. (1988). La hidroquímica en los estudios de intrusión marina en los acuíferos españoles. *TIAC* 88, 198(1), 19–73.
- Castro, L. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a partir de métodos geofísicos y determinación del potencial hídrico en el acuífero aluvial Naranjito, Quepos, Puntarenas*. Universidad de Costa Rica.
- Cheng, A. H. D., & Ouazar, D. (Eds.). (2004). *Coastal Aquifer Management, monitoring, modeling and case studies* (Vol. 136). Washington D.C.: Lewis Publishers.
- Clima de Costa Rica y Variabilidad Climática. (n.d.). Recuperado el 1 de mayo, 2019, de <https://www.imn.ac.cr/52>
- Convenio de AyA, ICT y ASADA garantizará agua a Playa Panamá. (2020). Recuperado el 8 de enero, 2020, de <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2020/02/convenio-de-aya-ict-y-asada-garantizara-agua-a-playa-panama/>
- Corrales, C. (2017). *Estudio hidrogeológico para el cálculo de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en las cuencas de las playas Mantas y Agujas, Pacífico Central, Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Cruz, M. F. (2016). Playas Hermosa y Panamá se quedan sin agua pese a advertencias de estudios desde hace 15 años. *La Voz de Guanacaste*, p. 1. Recuperado de <https://vozdeguanacaste.com/playas-hermosa-y-panama-se-quedan-sin-agua-pese-a-advertencias-de-estudios-desde-hace-15-anos/>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología Subterránea* (Segunda). Barcelona: Ediciones Omega.
- Custodio, Emilio. (2004). Hydrogeology of volcanic rocks. In V. . Kovalevsky, G. . Kruseman, & K. R. Rushton (Eds.), *Groundwater studies* (pp. 395–430). United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.
- CWERC. (2014). Groundwater Quality Interpretation Guide, Understanding your water quality results. Recuperado de [http://cwerc.colorado.edu/docs/cwerc\\_interpretation\\_guide.pdf](http://cwerc.colorado.edu/docs/cwerc_interpretation_guide.pdf)
- Delin, G. N., Healy, R. W., Lorenz, D. L., & Nimmo, J. R. (2007). Comparison of local to regional scale estimates of groundwater recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology*, 334(1–2), 231–249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.010>
- Denyer, P., Aguilar, T., & Montero, W. (2014). *Cartografía Geológica de la Península de Nicoya* (1st ed.). Editorial UCR.
- Denyer, P., & Alvarado, G. E. (2019). Estratigrafía volcánica del neógeno y cuaternario. En P. Denyer (Ed.), *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica* (pp. 101–235). San José, Costa Rica: Editorial UCR.
- Denyer, P., & Arias, O. (1993). Geología del Norte de la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 16, 69–84.

- Denyer, P., & Baumgartner, P. O. (2006). Emplacement of Jurassic-Lower Cretaceous radiolarites of the Nicoya Complex (Costa Rica). *Geológica Acta*, 4(1–2), 203–218.
- Denyer, P., Montero, W., Aguilar, T., Herrera, P., Alvarado, G. E., Barrantes, M., & Chavarría, M. (2019). Mapa Geológico de la Hoja Carrillo Norte. San José, Costa Rica: Editorial UCR.
- Denyer, P., Vargas, C., Lücke, O., & Solano, J. P. (2019). Deformación y geomorfología. En P. Denyer (Ed.), *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica* (pp. 275–299). San José, Costa Rica: Editorial UCR.
- Ducci, D., & Sellerino, M. (2013). Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers. *Science of The Total Environment*, 447, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.090>
- Erskine, A. D. (1991). The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK. *Ground Water*.
- Fakir, Y., & Razack, M. (2003). Hydrodynamic characterization of a Sahelian coastal aquifer using the ocean tide effect (Dridrate Aquifer, Morocco). *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 441–454. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.441.45281>
- FAO. (2011). Introducción a la evapotranspiración del cultivo. *Evapotranspiración Del Cultivo Guías Para La Determinación de Los Requerimientos de Agua de Los Cultivos. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE 56.*, 323.
- Ferris, J. G. (1952). Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. *Ground Water*.
- Fetter, C. . (2014). *Applied Hydrogeology* (4th ed.). Pearson Education Limited.
- Foster, S., & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. (2nd ed.). Lima, Perú: CEPIS.
- Garnier Villarreal, M. (2020). *Geología Numérica: Ciencia de Datos para Geociencias*. Recuperado de <https://geologia-numerica.netlify.app/>
- Ghazavi, R., & Ebrahimi, Z. (2015). Assessing groundwater vulnerability to contamination in an arid environment using DRASTIC and GOD models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 2909–2918. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0813-2>
- Gomez, M. (2005). *Estudio Hidrogeológico integral de las cuencas hidrográficas de los poblados El Coco y Ocotál, Carrillo, Guanacaste*. Universidad de Costa Rica.
- González, M. (2017). *Determinación de la interfase agua dulce - agua salada en el acuífero aluvial de Puerto Jiménez, Puntarenas, Pacífico Sur*. Universidad de Costa Rica.
- Guevara Díaz, J. M. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra*, 30(47), 79–102.
- Gutiérrez, E. A., & Soley, J. F. (1988). Características del Nivel del Mar en los Litorales Costarricenses. *Ciencia y Tecnología*, 12(1–2), 117–131.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. [https://doi.org/0883-8542/85/0102-0096\\$02.00](https://doi.org/0883-8542/85/0102-0096$02.00)
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Heras, R. (1972). *Manual de hidrología. Vol 5 Hidrología Agrícola*. España: Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas.
- Herrera, J. (2017). Uso y estado de los recursos, recurso hídrico. En *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenibles: Programa Estado de la Nación*.
- Herrera Lameli, C. (2001). *Caracterización hidrogeoquímica del macizo de Betancuria. Fuerteventura, Archipiélago de Canarias*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from

<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93527>

- Hoernle, K., Hauff, F., & Van Den Boogard, P. (2004). 70my history (139–69Ma) for the Caribbean Large Igneous province. *Geology*, 32(8), 697–700. <https://doi.org/10.1130/G20574.1>
- IMN. (2016). *Huracán Otto*. Instituto Meteorológico Nacional. San José Costa Rica.
- IMN. (2017). *DESCRIPCION DEL CLIMA Cantón de Liberia*. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Recuperado de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/DescripciondelClimaSERIE/DescripcionClimaCantonLiberia/offline/download.pdf>
- Impactos Tormenta Tropical Nate. (2017). Recuperado de <https://presidencia.go.cr/nate/>
- Instituto Meteorológico de Costa Rica. (n.d.). Boletín ENOS. Retrieved August 17, 2019, recuperado de <https://www.imn.ac.cr/boletin-enos>
- Instituto Meteorológico de Costa Rica. (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. San José. Recuperado de [http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el\\_clima\\_variabilidad\\_y\\_cambio\\_climatico\\_en\\_cr\\_version\\_final.pdf](http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf)
- Jacob, C. E. (1950). Flow of groundwater. In H. Rouse & J. Wiley (Eds.), *Engineering Hydraulics* (pp. 321–386). New York.
- Jha, M. K., Jayalekshmi, K., Machiwal, D., Kamii, Y., & Chikamori, K. (2004). Determination of hydraulic parameters of an unconfined alluvial aquifer by the floodwave-response technique. *Hydrogeology Journal*, 12(6), 628–642. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0376-7>
- Jha, M. K., & Kamii, Y. (2009). Efficacy of direct tidal methods for identifying hydraulic parameters of coastal aquifers, 58(March), 155–166.
- Jha, M. K., Kamii, Y., & Chikamori, K. (2003). On the estimation of phreatic aquifer parameters by the tidal response technique. *Water Resources Management*, 17(1), 69–88. <https://doi.org/10.1023/A:1023018107685>
- Jung, C. G., Lee, D. R., & Moon, J. W. (2016). Comparison of the Penman-Monteith method and regional calibration of the Hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-simulated results in the Seolma-cheon basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, 61(4), 793–800. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943231>
- Karro, E. (1999). Long-term changes in groundwater chemistry in four coastal water supply plants in southern Finland. *Boreal Environment Research*, 4(2), 175–186.
- Kefford, B., Dunlop, J., Nuggeoda, D., & Choy, S. (2007). Understanding salinity thresholds in freshwater biodiversity: freshwater to saline transition. In S. Lovett, P. Price, & B. Edgar (Eds.), *Salt, Nutrient, Sediment And Interactions* (pp. 9–27). Land & Water Australia.
- Kong, J., Shen, C. J., Xin, P., Song, Z., Li, L., Barry, D. A., ... Parlange, J. Y. (2013). Capillary effect on water table fluctuations in unconfined aquifers. *Water Resources Research*, 49(5), 3064–3069. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20237>
- Kong, J., Xin, P., Hua, G. F., Luo, Z. Y., Shen, C. J., Chen, D., & Li, L. (2015). Effects of vadose zone on groundwater table fluctuations in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 528, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.045>
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1564–1571. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1564>
- KRUPANIDHI, K. (1984). Mechanism of groundwater pollution in village wells. *Journal of the Geological Society of India*, 25(5), 301–302.
- Kumar, M., Kumari, K., Singh, U. K., & Ramanathan, A. (2009). Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: Conventional graphical and multivariate statistical approach.

- Environmental Geology*, 57(4), 873–884. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1367-0>
- Lathamani, R., Janardhana, M. R., Mahalingam, B., & Suresha, S. (2015). Evaluation of Aquifer Vulnerability Using Drastic Model and GIS: A Case Study of Mysore City, Karnataka, India. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1031–1038. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.130>
- Levanon, E., Shalev, E., Yecheili, Y., & Gvirtzman, H. (2016). Fluctuations of fresh-saline water interface and of water table induced by sea tides in unconfined aquifers. *Advances in Water Resources*, 96, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.06.013>
- Levanon, E., Yecheili, Y., Gvirtzman, H., & Shalev, E. (2017). Tide-induced fluctuations of salinity and groundwater level in unconfined aquifers – Field measurements and numerical model. *Journal of Hydrology*, 551, 665–675. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.045>
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1982). *Hidrology For engineers*. (J. V. Brown & S. Hazlett, Eds.) (3rd ed.). New York: McGraw Hill College.
- Madrigal, P., Gazel, E., & Denyer, P. (2019). Petrografía ígnea del basamento. In P. Denyer (Ed.), *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica* (1st ed., pp. 9–42). San José Costa Rica: Editorial UCR.
- Mayer, X., Ruprecht, J., & Bari, M. (2005). *Stream salinity status and trends in south-west Western Australia*. Department of Environment, Salinity and Land Use Impact Series, Report No. SLUI 38.
- Millham, N. P., & Howes, B. L. (1995). A comparison of methods to determine K in a Shallow coastal aquifer. *Ground Water*, 33(1), 49–57.
- MINSA. (2005). Reglamento para la Calidad del Agua Potable Decreto N° 32327-S. *La Gaceta No. 84*, (84), 1–16.
- Monge, M. (2015). *Estudio Hidrogeológico y Balance Hídrico de los acuíferos de Playa Potrero y Playa Brasilito, Santa Cruz, Guanacaste*. Universidad de Costa Rica.
- Mora, D. (1978). *Aspectos hidrogeológicos de la Península de Nicoya*. Universidad de Costa Rica.
- Morgan, C. P., & Stolt, M. H. (2004). A comparison of several approaches to monitor water table fluctuations. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 562–566. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.5620>
- Mtoni, Y., Mjemah, I. C., Bakundukize, C., Van Camp, M., Martens, K., & Walraevens, K. (2013). Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es Salaam, Tanzania. *Environmental Earth Sciences*, 70(3), 1091–1111. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2197-7>
- Murillo, D. (2007). *Análise hidrogeológica, com ênfase na aplicação de métodos geofísicos, do aquífero costeiro na bacia hidrográfica de Playa Panamá, Província de Guanacaste, Costa Rica*. Universidade Federal do Paraná.
- Murillo, D., Da Rosa Filho, E. F., & Chemas Hindi, E. (2007). Identificação da zona de dispersão salina com aplicação dos métodos eléctrico e eletromagnético no domínio da frequência no aquífero costeiro de playa panamá, costa rica. *Águas Subterraneas*, 21, 35–50.
- Murillo, J. (2017). *Modelación Numérica del acuífero costero Palmar Cortés, bajo diferentes escenarios hidrológicos*. Universidad de Costa Rica.
- Murillo, L. M. (1990). La predicción continua de las mareas para las costas costarricenses para los años 1991-2000. *Tecnología En Marcha*, 11(4).
- Murillo, L. M. (1991). La circulación de las mareas en el Golfo de Nicoya. *Tecnología En Marcha*, 10(4), 51–76.
- Murillo, L. M. (2001). Las mareas en Costa Rica. *Inter Sedes*, 2, 93–108.
- Nielsen, P. (1991). Tidal dynamics of the water table in beaches: reply. *Water Resources Research*, 27(10), 2803–.
- Nieto López, J. M., Navarro, B. A., & Mudarra Martínez, M. (2016). Estimación de parámetros hidrogeológicos en los acuíferos costeros del Bajo Guadalhorce ( Málaga ) mediante el análisis de la influencia de las mareas. *Geogaceta*, 59, 39–42.

- Nuevo acueducto Sardinal-El Coco-Ocotol beneficiará a 34.000 personas en Carrillo. (2019). Recuperado el 8 de enero, 2020, de <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2019/03/nuevo-acueducto-sardinal-el-coco-ocotal-beneficiara-a-34-000-personas-en-carrillo/>
- Obando, A. (2017). *Modelo Hidrogeológico conceptual de las cuencas de los ríos Reventado y Toyogres, Provincia de Cartago, Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- ONU. (1972). *Manual de instrucciones, Estudios hidrológicos. Programa de Ampliación y Mejoramiento de los Servicios Hidrometeorológicos e hidrológicos den el Istmo Centroamericano*. San José, Costa Rica.
- Panno, S. V., Hackley, K. C., Hwang, H. H., Greenberg, S. E., Krapac, I. G., Landsberger, S., & O'Kelly, D. J. (2006). Characterization and identification of Na-Cl sources in ground water. *Ground Water*, 44(2), 176–187. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00127.x>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Journal of Computers and Geosciences*.
- Piper, A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914–928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Polemio, M., Casarano, D., & Limoni, P. P. (2009). Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1461–1470. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1461-2009>
- Programme, E. C. (n.d.). Copernicus Marine Service. Retrieved February 6, 2020, from <https://marine.copernicus.eu/science-learning/observation-requirements/>
- Raubenheimer, B., Guza, R. T., & Elgar, S. (1999). Tidal water table fluctuations in a sandy ocean beach. *Water Resources Research*, 35(8), 2313–2320. <https://doi.org/10.1029/1999WR900105>
- Reglamento de registro de pozos sin número y habilitar el trámite de concesión de aguas subterráneas N° 35882-MINAET*. (2010). *La Gaceta Oficial n° 88*. San José: Imprenta Nacional.
- Revelle, R. (1941). Criteria for recognition of the sea water in ground-waters. *Transactions, American Geophysical Union*, 22(3), 593. <https://doi.org/10.1029/TR022i003p00593>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Nakhostin Rouhi, M., Sarkar, S., & Rahimpour, T. (2018). Groundwater vulnerability assessment using the DRASTIC model under GIS platform in the Ajabshir Plain, southeast coast of Urmia Lake, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3928-1>
- Robinson, C., Li, L., & Barry, D. A. (2007). Effect of tidal forcing on a subterranean estuary. *Advances in Water Resources*, 30(4), 851–865. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.07.006>
- Rodriguez, C. I., Duque, C., Calvache, M. L., & López-Chicano, M. (2010). Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, España. *Geogaceta*, 49, 107–110.
- Roscoe Moss, C. (1990). *Handbook of Ground Water Development*. Los Angeles, California: John Wiley & Sons, Inc.
- Saha, D., Dhar, Y. ., & Sikdar, P. . (2008). Geochemical evolution of groundwater in the Pleistocene aquifers of South Ganga Plain. *Journal of Geological Society of India*, 73(4), 473–482.
- Sánchez Ú, J. P., Calvache Q, M. L., López C, M., Duque, C., & Rosales, W. M. (2013). Influencia de las mareas en las medidas de piezometría de la zona de descarga del acuífero costero Motril-Salobreña (Granada). *Geogaceta*, 53, 121–124.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for environmental engineering and science* (5th ed.). McGraw Hill Higher Education.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>

- Schloeder, C. A., Zimmerman, N. E., & Jacobs, M. J. (2001). Comparison of Methods for Interpolating Soil Properties Using Limited Data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 470–479. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652470x>
- Schosinsky, G. (Escuela C. de G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante Un Balance Hídrico De Suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34/35, 13–30.
- Schosinsky, G. (Escuela C. de G., & Losilla, M. (2000). MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43–55.
- Schureman, P. (1958). *Manual of harmonic analysis and prediction of tides. Special publication. U.S. Coast and Geodetic Survey*, 98. US Department of Commerce & Coast and Geodetic Survey.
- SENARA. (2016). Zona con características Hídricas especiales, Acuíferos Ocotol, Coco, Hermosa y Panamá. Dirección de Investigación y Gestión Hídrica. San José, Costa Rica. Recuperado el 11 de agosto, 2021, de <http://www.senara.or.cr/proyectos/aguassubterraneeas/acuiferos/Acuiferos%20Ocotol,%20Coco,%20Hermosa,%20Panama.jpg>.
- Sethy, S. N., Syed, T. H., Kumar, A., & Sinha, D. (2016). Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater in parts of Southern Gangetic Plain. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5049-4>
- Sinton, C. ., Duncan, R. ., & Denyer, P. (1997). Nicoya Peninsula, A single suite of Caribbean oceanic plateau magmas. *Journal of Geophysics Research*, 102(B7), 15507–15520.
- Solano Monge, J. P. (2018). *Estratigrafía y petrografía del Plio-Pleistoceno del noroeste de Costa Rica: formación Bagaces y lavas Pelón de la Bajura*. Universidad de Costa Rica.
- Solano Monge, J. P., Denyer, P., & Pérez, W. (2019). Caracterización petrográfica de la Formación Bagaces y las Lavas Pelón de la Bajura. En P. Denyer (Ed.), *Perspectiva geológica del noroeste de Costa Rica* (p. 347). San José, Costa Rica: Editorial UCR.
- Swenson, H. A., & Baldwin, H. . (1965). *A primer water quality* (1990 repri). USGS. <https://doi.org/10.3133/7000057>
- Thayalakumaran, T., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., & Fass, T. (2008). Geochemical conditions in groundwater systems: Implications for the attenuation of agricultural nitrate. *Agricultural Water Management*, 95(2), 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.003>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). Groundwater hydrology. <https://doi.org/10.1002/0470871660>
- Trefry, M. G., & Bekele, E. (2004). Structural characterization of an island aquifer via tidal methods. *Water Resources Research*, 40(1), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2003WR002003>
- Turner, I. L., Coates, B. P., & Acworth, R. I. (1997). Tides , Waves and the Super-elevation of Groundwater at the Coast. *Journal of Coastal Research*, 13(1), 46–60.
- USGS. (2020). Water Science School. Recuperado el 12 de enero, 2021, de <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science>
- USGS Groudwater Information. (2016). Recuperado el 30 de octubre, 2018, de <http://water.usgs.gov/ogw/aquiferbasics/index.html>
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense: Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(1), 95–105.
- Voudouris, K., Kazakis, N., Polemio, M., & Kareklas, K. (2010). Assessment of intrinsic vulnerability using DRASTIC model and GIS in Kiti aquifer, Cyprus. *European Water*, (January).
- Vrba, J., & Lipponen, A. (Eds.). (2007). *Groundwater Resources Sustainability Indicators* (IHP-VI,14). Francia: United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.

- Vrba, J., & Zaporozec, A. (Eds.). (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability* (16th ed.). IAH International contributions to Hydrogeology.
- Wuebbles, D. J., Easterling, D. R., Hayhoe, K., T., K., Kopp, R. E., Kossin, J. P., ... Wehner, M. F. (2017). Our Globally Changing Climate. En D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. Dokken, B. C. Stewart, & T. K. Maycock (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment* (pp. 35–72). Washington D.C.: U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J08S4N35.1.1>
- Xin, P., Wang, S. S. J., Lu, C., Robinson, C., & Li, L. (2015). Nonlinear interactions of waves and tides in a subterranean estuary. *Geophysical Research Letters*, 42(7). <https://doi.org/10.1002/2015GL063643>
- Zghibi, A., Merzougui, A., Chenini, I., Ergaieg, K., Zouhri, L., & Tarhouni, J. (2016). Groundwater vulnerability analysis of Tunisian coastal aquifer: An application of DRASTIC index method in GIS environment. *Groundwater for Sustainable Development*, 2–3, 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.10.001>

## 11 Anexos

Por la naturaleza de la información presentada como anexo a este documento, se adjuntan en formato digital. En el siguiente orden:

1. Registro Fotográfico
2. Expedientes de pozos digitalizados
3. Base de datos de los pozos
4. Perfiles litológicos de los pozos
5. Base de datos SIMASTIR
6. Datos del monitoreo manual DA-MINAE
7. Datos de estaciones meteorológicas
8. Datos de mareas MIO-CIMAR
9. Datos del monitoreo del LNA
10. Resultados de los análisis físico químicos
11. Recomendaciones para el monitoreo
12. Inventario de posibles fuentes de contaminación