UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELO NUMÉRICO DE LOS ACUÍFEROS HERRADURA Y JACÓ, CANTÓN DE GARABITO, PROVINCIA DE PUNTARENAS, COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geología para optar al grado de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos

ALONSO ALFARO MARTÍNEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

DEDICATORIA

A mis tatas Beto y Vicky…

A Evelyn, Mariela y Andrea las cuales son el motor de mi vida y me apoyaron incondicionalmente en todo el proceso de estudio...

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), por el apoyo incondicional en todo el proceso de estudio en el programa del Posgrado en Geología, la colaboración en el trabajo de campo y en la confección del presente documento, en especial a todo el personal de la Dirección de Investigación y Gestión Hídrica, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de la presente investigación.

Al comité asesor MSc. Sandra Arrendo Li, Msc. Roberto Ramírez Chavarría y PhD Marco Barahona Palomo por su constante asesoramiento, discusión profesional y guía en la construcción del presente trabajo de investigación.

A los compañeros del SENARA Jonathan Chinchilla y Pedro Bermúdez por el apoyo en el trabajo de campo.

A mi hermanillo Eric por sus constantes consejos, asesorías y sugerencias en la parte de climatología.

"Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geología de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar el grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos."

M.Sc. Ingrid Vargas Azofeifa
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado

M.Sc. Roberto Ramírez Chavarría
Director de Tesis

Dr. Marco Barahona Palomo
Asesor

M.Sc. Sandra Arredondo Li
Asesora

Dr. Maximiliano Garnier Villarreal
Representante del Director
Programa de Posgrado en Geología

Alonso Alfaro Martínez
Sustentante

CONTENIDO

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

HOJA DE APROBACIÓN iv

CONTENIDO v

RESUMEN ix

LISTA DE TABLAS xi

LISTA DE FIGURAS xiii

LISTA DE ABREVIATURAS xviii

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Localización de la zona de estudio 1
1.2 Antecedentes 1
1.3 Estudios geológicos e hidrogeológicos en el sector de Jacó, Herradura y alrededores en el Pacífico Central de Costa Rica 4
1.4 Modelos numéricos de acuíferos en Costa Rica 6
1.5 Justificación de la Investigación 9
1.6 Objetivo general 12
1.7 Objetivos específicos 12
1.8 Problema 12
1.9 Hipótesis 13

2. MARCO METODOLÓGICO 14

2.1 Enfoque del estudio 14
2.2 Unidades de análisis 14
2.3 Técnicas e instrumentos 14
2.4 Análisis de los datos 15
2.5 Fases de la investigación 16

2.5.1 Recopilación y procesamiento de estudios, mapas geológicos e hidrogeológicos ... 16

2.5.2 Definición de la geología, la geomorfología local y las estructuras geológicas 17

2.5.3 Análisis de las bases datos de pozos y concesiones 17

2.5.4 Recopilación y análisis de la información hidrológica 17

2.5.5 Extensión de la red de monitoreo de pozos 17

2.5.6 Uso de suelo 18

2.5.7 Definición de las unidades para el balance hídrico subterráneo 18

2.5.8 Construcción del modelo numérico de los acuíferos y evaluación de diferentes escenarios climáticos 18

2.5.9 Elaboración del informe final y defensa del trabajo final de graduación 19

2.6 Materiales y equipos utilizados 19

3. MARCO TEÓRICO 20

3.1 Modelos hidrogeológicos conceptuales 20
3.2 Modelos matemáticos de acuíferos 22
3.3 Balance hídrico y recarga potencial de agua a los acuíferos 26

4. GEOLOGÍA 30

4.1 Geología Regional 30

4.1.1 Complejo de Nicoya 30

4.1.2 Formación Punta Carballo 32

4.1.3 Depósitos Cuaternarios Aluviales 36

4.2 Geología estructural regional 37

4.2.1 Falla Herradura 37

4.2.2 Falla Tárcoles 38

4.2.3 Falla Pógeres 38

4.2.4 Falla Chiquero 39

4.2.5 Falla Jacó 39

4.3 Geomorfología regional 39
4.4 Geomorfología local 40

4.4.1 Modelo de Elevación Digital del Terreno 40

4.4.2 Mapa de Pendientes 40

4.4.3 Unidad Denudacional de Pendiente Fuerte a Muy Fuerte 42

4.4.4 Unidad Denudacional de Pendiente Moderada a Fuerte 42

4.4.5 Unidad Denudacional de Pendiente Baja a Moderada 45

4.4.6 Unidad de Sedimentación Fluvial de Pendiente Muy Baja a Moderada 45

4.5 Geología Local 49

4.5.1 Unidad de basaltos negros 49

4.5.2 Unidad de areniscas grises 50

4.5.3 Unidad de aluviones (arenas y gravas) 56

5 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 63

5.1 Subcuencas hidrográficas 63
5.2 Precipitación y temperatura 63
5.3 Evapotranspiración potencial 67
5.4 Uso del suelo 70

5.5 Aforos diferenciales en ríos y quebradas 72
5.6 Sondeos eléctricos verticales (SEVs) 76
5.7 Pozos perforados 79
5.8 Red de monitoreo de pozos 83

6 RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA A LOS ACUÍFEROS 86

6.1 Recarga potencial por medio del balance de humedad de suelos 86

6.1.1 Unidades de balance hídrico 86

6.1.2 Coeficiente de intercepción por el follaje (C_{fo}) 87

6.1.3 Coeficiente de infiltración (C_i) 88

6.1.4 Precipitación que Infiltra 101

6.1.5 Cálculo de la recarga potencial a los acuíferos 103

6.2 Cálculo de la recarga de agua subterránea con la fluctuación de la tabla de agua 107

6.2.1 Acuífero Herradura 107

7 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 112

7.1 Unidad hidrogeológica de muy bajo potencial en areniscas 112
7.2 Unidad hidrogeológica de bajo potencial en basaltos 115
7.3 Acuífero Herradura 118
7.4 Acuífero Jacó 124
7.5 Barrera hidrogeológica – sistemas de fallas regionales 130

8 MODELOS NUMÉRICOS DE LOS ACUÍFEROS HERRADURA Y JACÓ 131

8.1 Acuífero Herradura 131

8.1.1 Dominio del modelo numérico y discretización horizontal 131

8.1.2 Capas del modelo 132

8.1.3 Asignación de propiedades para las capas del modelo 133

8.1.4 Condiciones de frontera 137

8.1.5 Tiempo de modelación 142

8.1.6 Modelo numérico del acuífero Herradura en el escenario climático al año 2019 . 142

8.2 Acuífero Jacó 157

8.2.1 Dominio del modelo numérico y discretización 157

8.2.2 Capas del modelo 160

8.2.3 Asignación de propiedades para las capas del modelo 162

8.2.4 Condiciones de frontera 163

8.2.5 Modelo numérico del acuífero Jacó en el escenario climático al año 2019 166

9 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL AÑO 2080 Y EL AÑO 2100 180

9.1 Variación en la precipitación para los años 2080 y 2099 181
9.2 Variación en la temperatura y evapotranspiración potencial (ETP) para los años 2080 y 2099 183
9.3 Recarga potencial 185
9.4 Modelos numéricos del acuífero Herradura para los escenarios de cambio climático en los Años 2080 y 2099 189

9.4.1 Resultados de los modelos numéricos para el acuífero Herradura en los escenarios de los años 2080 y 2099 192

9.5 Modelos numéricos del acuífero Jacó para los escenarios de Cambio Climático en los Años 2080 y 2099 200

9.5.1 Resultados de los Modelos Numéricos para el acuífero Jacó en los escenarios de los años 2080 y 2099 202

10 CONCLUSIONES 210

11 RECOMENDACIONES 218

12 REFERENCIAS 220

13 ANEXOS 226

RESUMEN

ALFARO, A. (2021) MODELO NUMÉRICO DE LOS ACUIFEROS HERRADURA Y JACÓ, CANTÓN DE GARABITO, PROVINCIA DE PUNTARENAS, COSTA RICA.

En el sector costero de Herradura y Jacó en el Pacífico Central de Costa se construyó el modelo hidrogeológico conceptual para las rocas volcánicas del Complejo de Nicoya rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo y para los depósitos fluviales en los sectores planos de Herradura y Jacó (aluviones). La recarga potencial para la zona de estudio es en promedio de 994 mm/año, por lo que para un área de 70,9 km^2 se obtiene da una caudal de recarga de 2235 l/s que corresponde a un 38,7 % de la precipitación promedio anual. Se creó un modelo numérico estático por la metodología de diferencias finitas para el acuífero Herradura utilizando el código MODFLOW; el resultado es de una entrada-salida total de agua de unos 515 litros por segundo anualmente y se determinó un balance de las entradas y salidas para las dos capas (*Arenas finas y Aluvión*). El modelo numérico Herradura tiene una tendencia aceptable a que exista una igualdad entre los datos de las cargas hidráulicas observadas y las cargas hidráulicas simuladas, así como un ajuste muy bueno de la predicción del modelo numérico con respecto a los valores de las cargas hidráulicas simuladas. Para los escenarios de cambio climático en los años 2099 y 2099 la dirección del flujo se mantiene prácticamente sin ninguna variación hacia el SW, sin embargo el abatimiento proyectado es de aproximadamente un metro en el año 2080 con un aumento de un 50 % más de extracción de agua en los pozos y de dos metros para el año 2099 para un aumento del 100 % más de la extracción de agua en los pozos. El modelo numérico estático por la metodología de diferencias finitas para el acuífero Jacó da como resultado un balance de entradas y salidas de 1128 l/s y se desglosó un balance de las entradas y salidas para las dos capas (*Arenas finas y Aluvión*), tiene una tendencia baja a que exista una igualdad entre los datos de las cargas hidráulicas observadas y las cargas hidráulicas simuladas ya que se tienen pocos datos de niveles de pozos sin embargo el ajuste del modelo numérico en Jacó es bueno con respecto a la predicción del modelo numérico y los valores de las cargas hidráulicas simuladas. Para los escenarios de Cambio Climático en los años 2080 y 2099 la dirección del flujo del agua subterránea se mantiene prácticamente sin

ninguna variación ya que se conserva el gradiente muy bajo y la dirección hacia el sur y el suroeste. Con un aumento de un 50 % más de extracción en los pozos en el año 2080 y un aumento del 100% para el año 2099 los abatimientos proyectados para los escenarios de cambio climático son de aproximadamente 1,5 m y 3,5 m respectivamente. Los modelos numéricos arrojan resultados muy importantes sobre la conexión hidráulica de los ríos y quebradas con el acuífero en donde la zonas influentes son vitales para la recarga del flujo base y los sectores efluentes (drenajes) por los ríos y las quebradas tienen una gran relevancia en los ecosistemas dependientes del agua subterránea en los humedales de los sectores costeros y la dinámica con los mareas. Los modelos numéricos que se proponen para los acuíferos Herradura y Jacó son sujetos a una constante calibración conforme se genere más información en el campo, tienen que ser validados por las instituciones competentes para desarrollar un modelo de extracción sostenible del recurso hídrico subterráneo. Los mismos pueden ser utilizados como base para continuar modelando y validando el comportamiento hidráulico conforme se generen nuevos datos de escenarios con respecto al cambio climático en el sector del Pacífico de Costa Rica.

Palabras clave: geología, hidrogeología, modelos hidrogeológicos conceptuales, acuíferos costeros, balance hídrico, recarga potencial, modelo numérico, MODFLOW, ModelMuse, Jacó, Herradura, Garabito, Puntarenas.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Subcuencas hidrográficas en la zona de estudio 63

Tabla 2 Información básica de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio..... 64

Tabla 3 Datos de la precipitación promedio mensual en milímetros por mes de las estaciones meteorológicas Punta Leona, Jacó, Piedra Bruja y Muelle Herradura..... 66

Tabla 4 Datos climáticos de la estación meteorológica Damas (90009)..... 66

Tabla 5 Evapotranspiración potencial mensual (ETP) y temperatura media mensual de la estación meteorológica Damas (90009) 69

Tabla 6 Usos de suelo en la zona de estudio, sector Heradura y Jacó..... 70

Tabla 7 Sitios de aforo en la zona de estudio..... 72

Tabla 8 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) en la zona de estudio..... 76

Tabla 9 Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) 78

Tabla 10 Pozos perforados reportados en la Base de Datos del SENARA..... 79

Tabla 11 Red de monitoreo de niveles de aguas subterránea en pozos perforados y excavados..... 84

Tabla 12 Unidades definidas para el balance hídrico y la recarga potencial 87

Tabla 13 Coeficientes de intercepción (C_{fo})..... 88

Tabla 14 Datos y valores de las pruebas de infiltración..... 93

Tabla 15 Componente k_p para el coeficiente de infiltración 96

Tabla 16 Componente k_v por el uso de suelo..... 98

Tabla 17 Parámetros y recarga potencial anual por unidad de balance..... 103

Tabla 18 Cálculo de la recarga con la metodología de la fluctuación de la tabla de agua 110

Tabla 19 Comparación de las metodologías para el cálculo de la recarga en el acuífero Herradura 111

Tabla 20 Coordenadas de los vértices del dominio en la zona de Herradura..... 131

Tabla 21 Valores de la conductividad hidráulica para las capas del modelo 133

Tabla 22 Valores del coeficiente de almacenamiento (S) y porosidad (n) para las capas del modelo 137

Tabla 23 Pozos de extracción en el sector activo de modelación en el acuífero Herradura..... 140

Tabla 24 Datos de las cargas hidráulicas observadas y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico, acuífero Herradura 151

Tabla 25 Presupuesto volumétrico de agua para el modelo numérico del acuífero Herradura 153

Tabla 26 Coordenadas de los vértices del dominio en la zona del acuífero Jacó..... 157

Tabla 27 Valores de la conductividad hidráulica para las capas del modelo 162

Tabla 28 Valores del coeficiente de almacenamiento y porosidad para las capas del modelo 162

Tabla 29 Pozos de extracción en el sector activo de la modelación numérica en el acuífero Jacó. 165

Tabla 30 Datos de las cargas hidráulicas observadas en los pozos y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico, acuífero Jacó 174

Tabla 31 Presupuesto volumétrico para el modelo numérico del acuífero Jacó 176

Tabla 32 Variación de la precipitación promedio mensual para los años 2080 y 2099, con base en la precipitación promedio mensual al año 2019 en el sector Herradura-Jacó..... 183

Tabla 33 Cálculo de la ETP mensual en milímetros mensuales para los años 2080 y 2099 con base en el cambio en la temperatura media mensual del año 2019 para la estación Damas (90009) de Quepos 185

Tabla 34 Recarga potencial para los escenarios de cambio climático para los años 2080 y 2099 para cada unidad de balance 188

Tabla 35 Aumento del 50% de extracción de los pozos al año 2080 en el acuífero Herradura 190

Tabla 36 Aumento del 100 % de extracción de los pozos al año 2099 en el acuífero Herradura ... 191

Tabla 37 Aumento del 50 % de extracción de los pozos al año 2080 en el acuífero Jacó 200

Tabla 38 Aumento del 100 % de extracción de los pozos al año 2099 en el acuífero Jacó 201

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación de la zona de estudio 2

Figura 2 Mapa de los sectores a desarrollar los modelos numéricos 3

Figura 3 Pasos a seguir en un protocolo para la aplicación del modelo numérico (modificada de Andensor et al., 2015) 25

Figura 4 Columna estratigráfica regional del sector Pacífico 31

Figura 5 Mapa geológico regional 33

Figura 6 Mapa del modelo digital de elevación del terreno 41

Figura 7 Mapa de pendientes en grados 43

Figura 8 Unidad denudacional de pendiente fuerte a muy fuerte en la zona de cerro Fresco y fila Copey, sector Este de Jacó 44

Figura 9 Unidad denudacional de pendiente fuerte a muy fuerte en la zona de los cerros Herradura 44

Figura 10 Unidad de sedimentación fluvial, parte baja de la quebrada Cañablancal en la zona de Herradura 47

Figura 11 Unidad de sedimentación fluvial en el sector plano del aluvión 47

Figura 12 Mapa geomorfológico local 48

Figura 13 Mapa geológico local 51

Figura 14 Afloramiento de la Unidad de Basaltos negros muy 52

Figura 15 Afloramiento de las rocas del Complejo de Nicoya (basaltos) 52

Figura 16 Perfil geológico A – B 53

Figura 17 Perfil geológico C – D 53

Figura 18 Perfil geológico E – F 54

Figura 19 Afloramiento de la unidad de Areniscas grises sobre la carretera costanera, ruta nacional 34 (coordenadas 428539/1071252) 55

Figura 20 Afloramiento de la Unidad de Areniscas grises meteorizadas y fracturadas, sobre el camino en la cuesta Chiquero hacia Herradura (coordenadas 428539/1071252) 55

Figura 21 Afloramiento de las arenas y gravas aluviales en la quebrada Cañablancal, sector de Herradura (coordenadas 430283/1070435) 59

Figura 22 Afloramiento de las arenas y gravas aluviales en el río Copey, sector NE de Jacó (coordenadas 432804/1062449) 59

Figura 23 Perfil geológico G – H 60

Figura 24 Perfil geológico I – J 60

Figura 25 Perfil geológico K – L 61

Figura 26 Perfil geológico M – N 61

Figura 27 Perfil geológico O – P..... 62

Figura 28 Mapa de subcuencas hidrográficas y estaciones meteorológicas 65

Figura 29 Gráfico de la distribución de la precipitación promedio mensual de las estaciones Punta Leona, Jacó, Piedra Bruja y Muelle Herradura 67

Figura 30 Gráfico de la evapotranspiración potencial y la temperatura media..... 70

Figura 31 Mapa de uso del suelo..... 71

Figura 32 Mapa de aforos diferenciales en la subcuenca de la quebrada Cañablancal..... 74

Figura 33 Mapa de aforos diferenciales en la subcuenca del río Naranjal..... 75

Figura 34 Mapa de ubicación de los pozos perforados 82

Figura 35 Porcentaje de pozos registrados por formación geológica..... 83

Figura 36 Mapa de ubicación de la red de monitoreo de pozos 85

Figura 37 Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración..... 92

Figura 38 Mapa de valores de K_{fc} 95

Figura 39 Mapa de valores de k_p..... 97

Figura 40 Mapa de valores de k_v..... 99

Figura 41 Mapa de valores de C_i..... 100

Figura 42 Mapa de la precipitación que infiltra 102

Figura 43 Gráfico de la precipitación promedio mensual (mm) y recarga promedio mensual (mm) 104

Figura 44 Mapa de recarga potencial 106

Figura 45 Gráfico de la variación del nivel de agua en el Pozo 4 (HE-183) de la red de monitoreo en el sector de Herradura 108

Figura 46 Gráfico de la variación del nivel de agua en el Pozo 6 (HE-184) de la red de monitoreo en el sector de Herradura 109

Figura 47 Gráfico de la variación del nivel del agua en el Pozo 7 (TS-170) de la red de monitoreo en el sector de Herradura 109

Figura 48 Gráfico de la variación del nivel del agua subterránea en el Pozo 8 (TS-166) de la red de monitoreo en el sector noroeste de Herradura..... 114

Figura 49 Gráfico de la variación del nivel en el Pozo 1 (HE-176) de la red de monitoreo en el sector noreste de Jacó..... 116

Figura 50 Mapa hidrogeológico local del sector de Herradura 122

Figura 51 Perfil Hidrogeológico A – B..... 123

Figura 52 Perfil Hidrogeológico E – F..... 123

Figura 53 Gráfico de la variación del nivel de agua en el pozo HE-19 de la red de monitoreo en el sector de Jacó 126

Figura 54 Mapa hidrogeológico local del sector de Jacó 128

Figura 55 Perfil Hidrogeológico G – H..... 129

Figura 56 Perfil Hidrogeológico I – J 129

Figura 57 Perfil Hidrogeológico O – P 130

Figura 58 Mapa del dominio y la zona activa a modelar en el acuífero Herradura 134

Figura 59 Mapa local del dominio, las celdas inactivas (color gris) y activas (color celeste) dentro del contorno rojo en el acuífero Herradura, el tamaño de celda es de 400 m^2 135

Figura 60 Corte esquemático donde se observa el piso de la capa de aluvión en el acuífero Herradura, nótese el espesor variable y la distribución espacial del piso 136

Figura 61 Corte esquemático donde se muestra el espesor de las dos capas (Arenas finas en la parte superior de color café y Aluvión en la parte inferior de color amarillo) del modelo numérico dentro de la zona activa (líneas verticales) en el acuífero Herradura 136

Figura 62 Esquema de la configuración de la carga constante cercana 0 metros sobre el nivel del mar (línea punteada de color rojo en la franja vertical de color azul) en el sector cercano a la costa en la playa Herradura 139

Figura 63 Geometría de la carga constante cercana al mar (línea en color rojo), la quebrada Cañablancal (color azul), la recarga en rectángulo con color morado en el borde y los pozos de extracción que son los puntos en color verde..... 141

Figura 64 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa superior de Arenas finas en el Acuífero Herradura (las celdas blancas dentro de la zona activa están secas) 143

Figura 65 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa de Aluvión en el Acuífero Herradura 144

Figura 66 Mapa de ubicación de las líneas de perfil, modelo numérico Herradura..... 145

Figura 67 Perfiles hidrogeológicos con las cargas hidráulicas en metros sobre el nivel del mar en el acuífero Herradura (Perfiles A), B), C) y D) con una exageración vertical seis veces la escala horizontal. Perfiles E), F) y G) con una exageración vertical ocho veces la escala horizontal) 148

Figura 68 Bloque diagrama esquemático que muestra la distribución espacial de las cargas hidráulicas y la dirección de flujo en el acuífero Herradura 150

Figura 69 Gráfico de las cargas hidráulicas observadas en los pozos y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico en el acuífero Herradura..... 152

Figura 70 Gráfico del balance volumétrico de agua para cada capa en el Acuífero Herradura 155

Figura 71 Bloque esquemático de balance volumétrico de agua en el acuífero Herradura, las flechas verdes indican ingresos y las flechas rojas salidas del sistema 156

Figura 72 Mapa del dominio y la zona activa a modelar en el acuífero Jacó 158

Figura 73 Mapa local del dominio, las celdas inactivas (color gris) y activas (color amarillo) dentro del contorno café en el área activa del acuífero Jacó 159

Figura 74 Corte esquemático donde se observa el piso de la capa de aluvión en el acuífero Jacó, nótese el espesor variable y la distribución espacial del piso del acuífero..... 161

Figura 75 Perfil esquemático donde se muestra el espesor de las dos capas (Arenas finas en la parte superior y Aluvión en la parte inferior) del modelo numérico dentro de la zona activa (líneas verticales) en el acuífero Jacó 161

Figura 76 Esquema de la configuración de la carga constante cercana 0 metros sobre el nivel del mar (línea punteada de color rojo en la franja vertical de color azul) en el sector cercano a la costa en la playa Jacó 164

Figura 77 Configuración de la carga constante cercana al mar (color rojo), los ríos y quebradas (color azul), la recarga en rectángulo con color celeste en el borde y los pozos de extracción que son los puntos en color anaranjado..... 166

Figura 78 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa superior de Arenas finas en el acuífero Jacó 168

Figura 79 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección deflujo en la capa inferior de Aluvión en el acuífero Jacó..... 169

Figura 80 Mapa de ubicación de las líneas del perfil en el modelo numérico Jacó 170

Figura 81 Perfiles hidrogeológicos con las cargas hidráulicas en el acuífero Jacó; exageración vertical diez veces la escala horizontal 172

Figura 82 Bloque diagrama que muestra la distribución espacial de las cargas hidráulicas, la dirección de flujo, los ríos y los pozos en el acuífero Jacó 173

Figura 83 Grafico de las cargas hidráulicas observadas en los pozos y las cargas hidráulicas simuladas para el modelo numérico en el acuífero Jacó 175

Figura 84 Gráfico del balance volumétrico de agua por capa del modelo numérico en el Acuífero Jacó 178

Figura 85 Bloque esquemático del Balance Volumétrico de Agua para el Acuífero Jacó, las flechas verdes indican ingresos y las flechas rojas revelan salidas del sistema 179

Figura 86 Gráfico de la recarga potencial para el escenarios de cambio climáticos al año 2080 ... 187

Figura 87 Gráfico de la recarga potencial para el escenarios de cambio climáticos al año 2099 ... 188

Figura 88 Gráfico de la recarga potencial por unidad de balance para los escenarios climáticos de los años 2080 y 2099 (afectando solo la ETP para los escenarios climáticos) 189

Figura 89 Mapas de las curvas isopotenciales del acuífero Herradura para los años 2019 a), 2080 b) y 2099 c)..... 194

Figura 90 Mapas de abatimientos en el acuífero Herradura para el año 2019 a), para el año 2080 b) y para el año 2099 c) 196

Figura 91 Perfiles transversales con los abatimientos en el acuífero Herradura para el año 2019 a), para el año 2080 b) y para el año 2099 c); (exageración vertical seis veces la horizontal) 198

Figura 92 Gráfico del balance volumétrico de agua para los modelos numéricos del Acuífero Herradura (años 2019, 2080 y 2099)..... 199

Figura 93 Mapas de las curvas isopotenciales del acuífero Jacó para los años 2019 a), 2080 b) y 2099 c)..... 204

Figura 94 Mapas de los abatimientos proyectados en el acuífero Jacó..... 206

Figura 95 Perfiles transversales con los abatimientos en el acuífero Jacó para el año 2019 a), para el año 2080 b) y para el año 2099 c); (exageración vertical seis veces la horizontal) 207

Figura 96 Gráfico del balance volumétrico de agua para los modelos numéricos del Acuífero Jacó (años 2019, 2080 y 2099)..... 209

LISTA DE ABREVIATURAS

ASADA: Asociación Administradora de Acueducto.

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

CIGEFI: Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica.

COVID19: Forma de la enfermedad del Coronavirus la cual se debe al nuevo virus SARS-CoV2.

CRTM05: Sistema oficial de coordenadas para Costa Rica, según decreto N° 33797-MJ-MOPT. El cual está asociado al datum horizontal para Costa Rica CR05 y al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).

DA: Dirección de Agua del MINAE.

DCC: Dirección de cambio Climático

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

IMN: Instituto Meteorológico Nacional.

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés.

ITEC: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

ONU: Organización de Naciones Unidas.

SEP: Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad de Costa Rica.

SENARA: Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial.

UEN: Unidad Estratégica de Negocios.

UCR: Universidad de Costa Rica.

UNA: Universidad Nacional de Costa Rica.

USGS: Servicio Geológico de los Estado Unidos de América, por sus siglas en inglés.

WGS84: Sistema de Posicionamiento Global que utiliza el Sistema Geodésico Mundial (*World Geodetic System* 1984).

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

SEP Sistema de Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Alonso Alfaro Martínez, con cédula de identidad 204730763, en mi condición de autor del TFG titulado MODELO NUMÉRICO DE LOS ACUIFEROS HERRADURA Y JACÓ, CANTÓN DE GARABITO, PROVINCIA DE PUNTARENAS

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. **SI** [X] **NO** *[ ]

***En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).**

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Localización de la zona de estudio

El área de estudio se sitúa en el cantón de Garabito en el sector costero de las localidades de Herradura-Jacó y alrededores, específicamente entre las coordenadas 427190-437215 E y 1061000-1072805 N de la proyección CRTM05, la misma abarca un área total de 70,9 km^2. La zona a investigar comprende las microcuencas costeras de las quebradas Caña Blancal, playa Balsal, Herradura Sur, Bonita, Doña María y el río Naranjal (Figura 1).

Las elevaciones del terreno varían entre 0 m.s.n.m. en las zonas de las playas Herradura y Jacó hasta los 620 m.s.n.m en los filas y los cerros que bordean la zona de interés al norte, al este y al sureste. Los modelos numéricos se desarrollarán específicamente en las unidades hidrogeológicas de los depósitos cuaternarios aluviales en las zonas planas del acuífero Herradura con un área de unos 3,26 km^2 y el sector SW del acuífero Jacó con un área de 6,30 km^2 para un área total de 9,56 km^2, tomando como bordes de frontera y basamento hidrogeológico las rocas volcánicas del Complejo de Nicoya y las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo (Figura 2).

1.2 Antecedentes

Se muestra a continuación la investigación de fuentes bibliográficas de la información geológica e hidrogeológica que se ha generado en las zonas de Agujas, Herradura, Jacó y playa Hermosa en el cantón de Garabito en el Pacífico Central de Costa Rica, las fuentes en donde se ha recopilado la información son las bibliotecas de la Universidad de Costa Rica (UCR) y la Universidad Nacional (UNA) por medios electrónicos y el archivo documental del Servicio Nacional de Agua Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). Primero se hará un recuento de los estudios geológicos e hidrogeológicos en la zona de estudio y luego se hará un listado de los modelos numéricos de acuíferos desarrollados en Costa Rica.

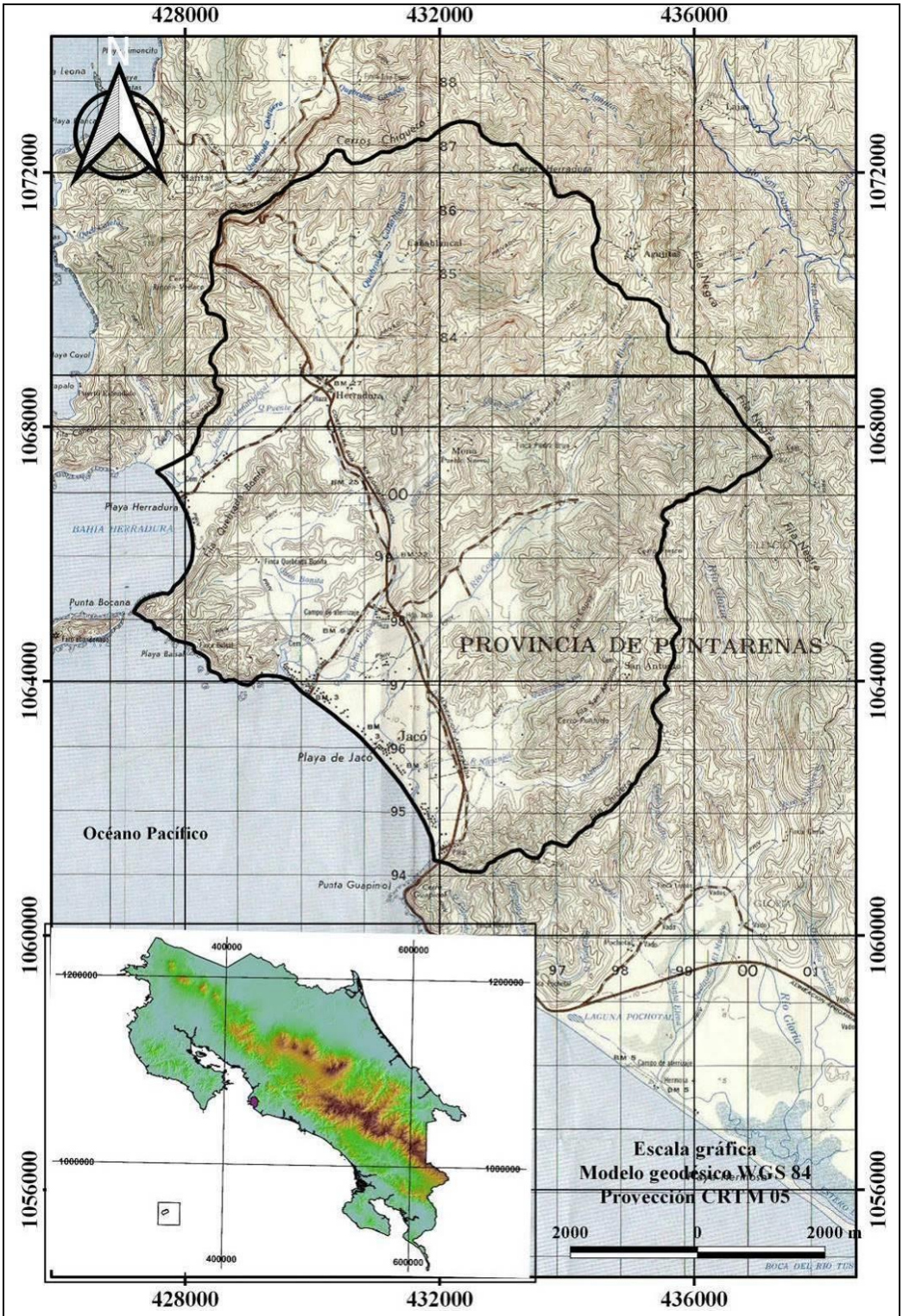


Figura 1 Mapa de ubicación de la zona de estudio
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

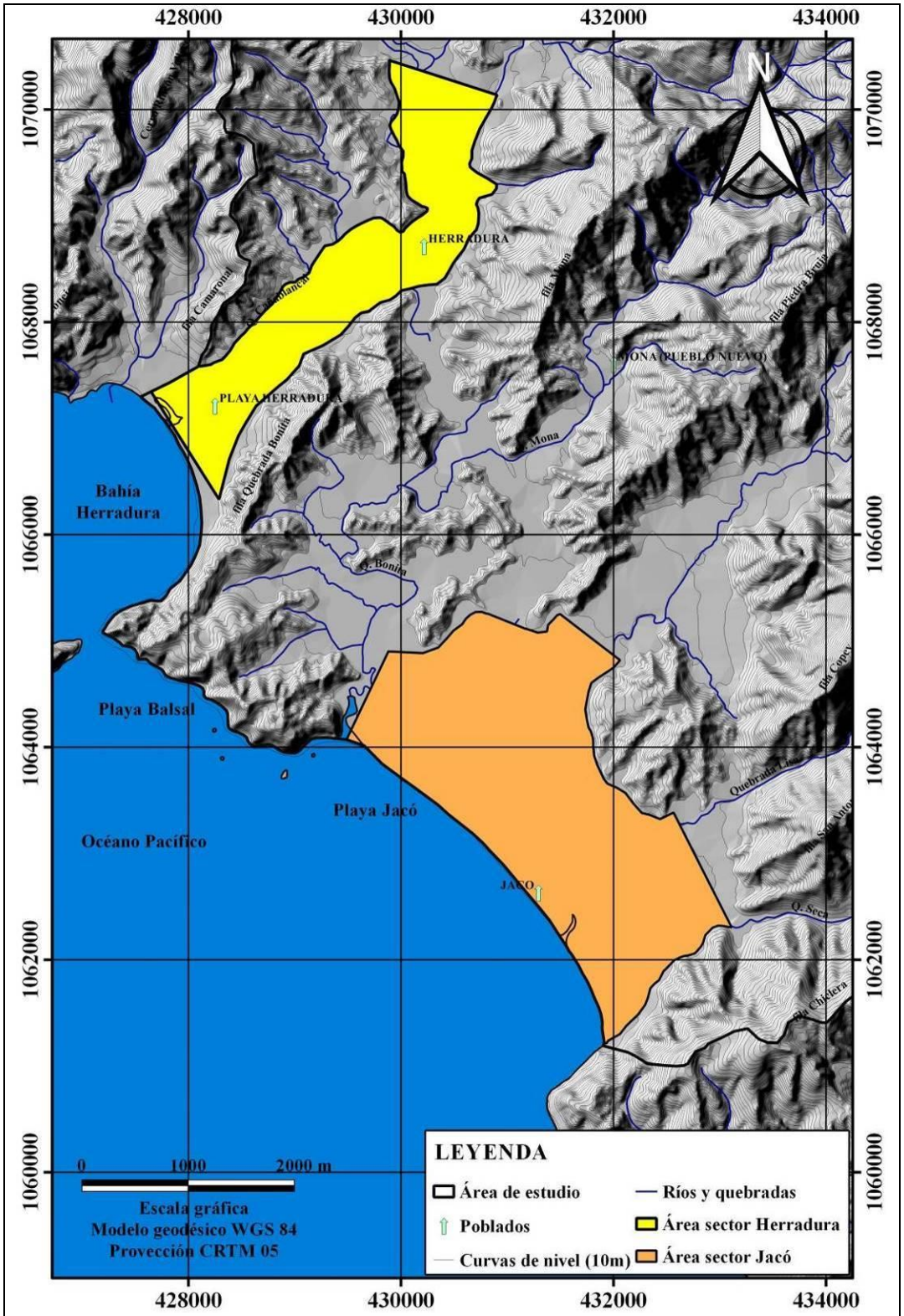


Figura 2 Mapa de los sectores a desarrollar los modelos numéricos
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

1.3 Estudios geológicos e hidrogeológicos en el sector de Jacó, Herradura y alrededores en el Pacífico Central de Costa Rica

Las zonas costeras de Herradura y Jacó en el Cantón de Garabito de Puntarenas forman parte de un proyecto de investigación del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, el cual tiene un alcance más regional sobre la caracterización de los acuíferos costeros del Pacífico Central y Pacífico Sur de Costa Rica a escala 1:100.000, el cual está desarrollando la Dirección de Investigación y Gestión Hídrica a través de la Unidad de Investigación Hidrogeológica. Por lo que el detalle y alcance de esta investigación es una escala 1:25.000 con un enfoque más local.

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) en el año 2000 realizó un estudio hidrogeológico – geofísico de la zona del acuífero aluvial de Jacó, el cual incluye la realización de sondeos eléctricos verticales, monitoreo de niveles de agua subterránea en pozos, medición de la conductividad eléctrica, cálculo del tiempo de tránsito de contaminantes, clasificación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y la definición de un modelo hidrogeológico del acuífero. Este estudio incluyó también algunas recomendaciones para el manejo del recurso hídrico en la zona de estudio.

Arias (2003) definió la formación Tulín en la zona este de Jacó y Herradura, separando los basaltos del Complejo de Nicoya geoquímicamente, la principal litología son basaltos vesiculares en almohadillas y con textura microdolerítica, constituidos por plagioclasa, augita, olivino y minerales opacos, provenientes de un magma basáltico primitivo fraccionado tipo E-MORB.

El SENARA en el año 2005 desarrolló un diagnóstico de las aguas subterráneas en las hojas Tárcoles, Herradura y Candelaria a escala 1:50.000, mediante un inventario de pozos, concesiones y sistemas de abastecimiento público así como una caracterización hidrogeológica de los acuíferos Herradura, Jacó, Playa Hermosa; en este trabajo se caracteriza hidrogeológicamente a escala regional 1:50.000 las rocas de las formaciones Punta Carballo, Complejo de Nicoya y Punta Judas.

En el año 2007 se publicó el Mapa Geológico de Costa Rica por parte de Denyer y Alvarado (2007) a escala 1:400.000; en el cual se definen a nivel regional las unidades geológicas formales para la zona de estudio, cabe destacar que uno de los mapas geológicos oficiales publicado para ese sector por lo cual será utilizado como el mapa base de la presente investigación.

El SENARA desde el año 2016 y hasta el año 2020, ha estado desarrollando estudios hidrogeológicos en la zona del Pacífico Central de Costa Rica, principalmente generando información básica como la perforación de pozos exploratorios, realizando estudios de suelos, medición de niveles del agua subterránea en ocho pozos, y hasta la fecha se han tomado ocho mediciones de los niveles estáticos y dinámicos. También se hicieron seis sondeos eléctricos verticales, información que será de gran utilidad para la calibración de los modelos numéricos propuestos en los sectores de Herradura y Jacó.

Corrales (2017) elaboró un modelo hidrogeológico conceptual, un balance hídrico y un análisis de vulnerabilidad en los sectores de Quebrada Ganado y las playas Pita, Agujas, Mantas y Caletas, sectores localizados al norte y noreste de la zona de Herradura y la quebrada Herradura, esta área se localiza al norte del sector de Herradura y contiene información muy útil sobre muestreos de suelos y pruebas de infiltración en los suelos de las formaciones Punta Carballo y el Complejo de Nicoya.

Gómez et al. (2019) efectuaron un mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero Jacó; definiendo un modelo hidrogeológico conceptual de un acuífero, libre, detrítico, albergado en materiales no consolidados tipo arenas, limos y gravas con una capa de suelo de poco espesor. Así mismo reportan que el nivel de agua se encuentra entre 0,50 y 5,00 m de profundidad, con equipotenciales entre los 0,50 y 15,00 m.s.n.m. La dirección del flujo del agua en este acuífero es hacia el suroeste (SW) y con un gradiente hidráulico de 0,01.

La información que se ha elaborado en la zona de estudio y alrededores es una base muy importante como referencia para el desarrollo del modelo geológico e hidrogeológico local, la cual será complementada y ampliada con trabajo de campo local.

1.4 Modelos numéricos de acuíferos en Costa Rica

En Costa Rica se han realizado once trabajos de investigación hidrogeológica que involucran el proceso de la elaboración de modelos numéricos aplicados al flujo del agua subterránea; a continuación se tiene una breve descripción de cada uno:

En el marco del Proyecto desarrollado entre el Servicio Geológico Británico, el AyA y el SENARA; se desarrolló en el año de 1988 un modelo hidrogeológico y un modelo matemático para los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.

Collins (1999) elaboró un modelo numérico del acuífero Bagaces en la provincia de Guanacaste; usando los datos físicos, trazadores químicos y una simulación numérica con el objetivo de verificar el desarrollo del modelo en la zona con respecto la cantidad y calidad del agua subterránea hidrogeológico; se concluye que existe suficiente agua subterránea del acuífero semi-confinado Bagaces, inclusive duplicando el caudal de extracción y con abatimientos de 2,50 metros y sugiere dos zonas de explotación para futuros pozos de abastecimiento público.

Vásquez (2005) construyó el modelo numérico para evaluar el potencial hidrogeológico del acuífero La Bomba, en la parte baja de la cuenca del río Banano, en la provincia de Limón, Costa Rica; el autor concluye que sólo se utilizaba un 15% de la capacidad del acuífero y que hay capacidad de extracción de hasta 1200 l/s. La mejor zona para nuevas captaciones es al Este del campo de pozos estudiado según la simulación de nuevos escenarios valorados en el modelo numérico, realizado con más de 200 corridas. El error del modelo es de 0,19 m para la condición estática y 0,27 m para el acuífero en bombeo. Los niveles estáticos y dinámicos obtenidos luego de la calibración corresponden a niveles promedio anuales.

Zúñiga (2006) efectuó la caracterización hidrogeológica del acuífero Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica, el cual abarca un área aproximada de 56 km^2 y un espesor que no supera los 30 m. El modelo numérico planteado se calificó como aceptable, ya que tan solo

los niveles estáticos de cuatro pozos (los cuales se ubican lejos de las áreas en las que se concentra la información) se encuentran muy separados del margen de confiabilidad del 95%. De esta forma, fue posible modelar las condiciones actuales de bombeo, donde se concluye que el régimen de bombeo no afecta notoriamente en las curvas isofreáticas.

García (2013) realizó el modelo conceptual y numérico del acuífero en la cuenca del río Nimboyores, Santa Cruz de Guanacaste, Costa Rica para determinar el efecto hidrogeológico en tres escenarios: a. Régimen de explotación actual, b. Explotación de campo de pozos existentes y c. Propuesta de explotación; para lo generó una simulación y estableció zonas preferenciales de extracción por medio de pozos perforados.

Alpízar (2014) elaboró el modelo conceptual y aplicación un modelo del acuífero aluvial del río Tempisque en el sector de Trancas; Guanacaste. Los resultados de la modelación indican que en la parte central el río Tempisque es efluente, dando prioridad al flujo hacia el este; mientras que en las zonas central y sur el flujo es mayormente de noroeste hacia el sureste, a excepción de una pequeña área en el límite norte donde el flujo es hacia el sur en parte debido a la influencia de la recarga lateral de la parte alta de la cuenca.

Orozco (2014) construyó un modelo para distintos escenarios climáticos del acuífero Tempisque, divididos en seco, promedio y húmedos, asociados a probabilidades de excedencia de 90 %, 50 % y 10 % en las precipitaciones anuales en la zona de estudio y generó niveles de agua en el acuífero para los distintos escenarios. Se concluyó que durante los años húmedos y los años con precipitación promedio, los niveles no varían sustancialmente, pero para años secos, el nivel del acuífero decrece en promedio siete metros para las condiciones de extracción que existen actualmente en la zona.

García (2015) desarrolló un modelo numérico en el sistema acuífero Potrero-Caimital, en la península de Nicoya, en la provincia de Guanacaste, con el objetivo de determinar la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en el sistema y así definir la explotación sustentable del sistema acuífero; por medio de la modelación se pudo ubicar la

divisoria de aguas subterráneas del sistema acuífero la cual no había sido posible ubicar con tal precisión mediante la información disponible.

Chaves (2016) hizo una estimación de los efectos en el caudal y el nivel del agua subterránea por la excavación de los túneles de desvío proyecto hidroeléctrico Reventazón, Siquirres, Limón, Costa Rica.

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) durante el año 2016 desarrolló el modelo numérico de los acuíferos de la margen derecha del río Virilla en el Valle Central de Costa Rica; evaluando con base en el modelo hidrogeológico la recarga y extracción y se obtiene un modelo de optimización con base en escenarios futuros de extracción por medio de pozos perforados.

Murillo (2017) desarrolló un modelo hidrogeológico numérico de diferencias finitas en el acuífero costero Palmar-Cortés, cantón de Osa, Costa Rica. Calculó el comportamiento del acuífero aluvial, obteniendo un muy buen ajuste entre las cargas hidráulicas observadas y las calculadas y observó una conexión río-acuífero en algunos tramos donde el río se comporta como efluente, aunque en la mayoría de los tramos del río, la conexión no es tan evidente, y parece no existir, aunque esto no pudo ser comprobado. Modeló los escenarios de cambio climático presentados por el Instituto Meteorológico Nacional para los años 2080 y 2100.

Los modelos numéricos mencionados que se han desarrollado en Costa Rica en los antecedentes son una base que sirven de ejemplo para la aplicación acerca de la estructura para el desarrollo de la presente investigación, ya que muestran metodologías, formas de plantear y resolver los problemas. Así mismo los resultados del código a utilizar para el modelo numérico, principalmente en los trabajos finales de graduación; y el abordaje del programa cómputo se podrían consultar, analizar y comparar para la construcción de los modelos numéricos de la presente investigación en el sector de los acuíferos que se han conformado en los depósitos cuaternarios aluviales de las zonas costeras de Herradura y Jacó.

1.5 Justificación de la Investigación

En las últimas décadas, los ciclos naturales de oscilación en la temperatura y la precipitación se han visto caracterizados por fuertes variaciones que conducen a extremos climáticos y meteorológicos en diferentes partes del planeta. El efecto antropogénico, asociado a la contaminación con gases de efecto invernadero, es uno de los generadores de estas marcadas oscilaciones de la variabilidad climática. De hecho, algunos científicos coinciden en que los efectos de la variabilidad climática interanual se están mezclando y potenciando con los efectos del cambio climático (Zwiers et al 2003, Sinha Ray y De 2003, IPCC 2007).

El cambio climático posiblemente es la amenaza más relevante que afrontaremos como sociedad en la actualidad, este fenómeno nos coloca en un momento único en la historia de la civilización humana. El cambio climático es uno de los grandes retos del siglo XXI a nivel mundial. El aumento promedio de la temperatura de la atmósfera y de los océanos está incidiendo en la variación en los patrones de las precipitaciones, la mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos y el aumento del nivel del mar (IMN, 2018).

Un escenario de cambio climático se puede definir como una posible representación del clima futuro bajo una determinada concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera. El cambio climático pasó de convertirse en una simple hipótesis o conjetura que tuvieron los científicos a mediados de la década de los años 1970, para transformarse en una realidad inequívoca y en el mayor desafío y amenaza al desarrollo y bienestar que los seres humanos enfrentaremos en lo que resta del siglo XXI (IPCC, 2007 en Alvarado et al., 2012).

No existe duda de que los países en desarrollo y en especial aquellos más pobres, serán los más afectados por los impactos del cambio climático, al mismo tiempo que luchan por superar la pobreza y promover el desarrollo humano. De forma que el cambio climático

amenaza con limitar gravemente las perspectivas de desarrollo y el cumplimiento de las Metas de Desarrollo del Milenio (Alvarado et al., 2012).

El agua subterránea juega un rol vital en la sostenibilidad de los ecosistemas y asegurando una adaptación humana a los cambios ambientales extremos e inesperados, particularmente ya que los sistemas de agua superficial se convierten incrementalmente insostenibles de frente o como consecuencia al crecimiento de la población y el cambio climático, aunado a lo vulnerable del recurso por factores naturales o antrópicos por la contaminación (Amanambu, 2020).

En Costa Rica la preocupación de los diferentes sectores productivos por una reactivación económica agresiva está propiciando que el uso del recurso hídrico subterráneo sea cada vez más intenso en el país, especialmente en las zonas del Pacífico Central y el Pacífico Norte, en donde el crecimiento de las diferentes actividades económicas genera una presión muy alta por el uso de dicho recurso natural. Esta situación se agrava como consecuencia de la extracción intensiva de agua subterránea por medio de pozos perforados, que carecen de un control real y efectivo por parte del Estado costarricense sobre aspectos como la ubicación final del pozo, la profundidad alcanzada, el armado realizado y las tasas de extracción de agua subterránea; así como los tiempos e intervalos de bombeo.

En el objetivo seis de “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible” se establece en la meta 6.4 que al 2030 que se debe de aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren por la falta de agua; y como indicador define que para el nivel de estrés hídrico la extracción de agua dulce deberá estar en proporción a los recursos de agua dulce disponibles (ONU, 2018).

Para cumplir el objetivo seis de “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible” y lograr la meta de contar con un adecuado manejo de las tasas de recarga y extracción del agua subterránea, un instrumento en la investigación y gestión del agua subterránea son los modelos numéricos de los acuíferos. Con esta herramienta se pueden simular diferentes comportamientos del flujo del agua subterránea con base en los escenarios del cambio climático a futuro y así evaluar las condiciones de los pozos de extracción actuales con respecto a la variación de los niveles del agua subterránea en los escenarios propuestos.

Tal y como lo señala el SENARA en su plan estratégico para los años 2016 - 2021; la Unidad de Investigación Hidrogeológica del SENARA ha definido que para evolucionar, innovar y brindar un mejor servicio al país, ante las demandas de información a nivel local de los usuarios para la toma de decisiones en materia de gestión del recurso hídrico y ordenamiento territorial, uno de los mejores instrumentos es la modelación numérica de acuíferos; por lo que esta institución está muy interesada en desarrollar modelos numéricos de acuíferos como parte de un proceso integral de investigación, evaluación y gestión del recurso hídrico subterráneo, especialmente en los acuíferos costeros de Costa Rica.

Por estas razones, se propone realizar en esta investigación una evaluación hidrogeológica por medio de un modelo numérico en estado estacionario de los acuíferos aluviales en Herradura y Jacó; comparando los efectos sobre las cargas hidráulicas consecuencia de los escenarios a futuro sobre la potencial variación en la precipitación y evapotranspiración que puedan causar el cambio climático en el Pacífico Central de Costa Rica; y los efectos que podrían tener sobre la recarga y los niveles del agua subterránea en el acuífero debido a la extracción de pozos perforados.

El alcance del presente estudio de investigación es desarrollar dos modelos numéricos en los acuíferos costeros de las zonas de Herradura y Jacó; los cuales serán de gran utilidad para el manejo sostenible del recurso hídrico subterráneo; ya que un modelo numérico sirve como una herramienta e insumos para dictar políticas y ayudar en la

planificación del ordenamiento territorial, especialmente por parte del gobierno local del cantón de Garabito en la provincia de Puntarenas.

1.6 Objetivo general

Evaluar por medio de un modelo numérico la respuesta del acuífero aluvial Herradura-Jacó por la extracción de agua y ante distintos escenarios de cambio climático.

1.7 Objetivos específicos

Construir el modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos Herradura y Jacó como insumo principal para desarrollar un modelo numérico.

Calcular por medio de un balance hídrico de suelos, la recarga potencial de los acuíferos para estimar su variación ante diferentes escenarios climáticos.

Evaluar por medio de un modelo numérico la respuesta del acuífero afectando la recarga del acuífero aluvial Herradura-Jacó por la extracción de agua y ante distintos escenarios de cambio climático.

1.8 Problema

En las zonas de Herradura y Jacó las actividades económicas ejercen una gran presión sobre la extracción del recurso hídrico subterráneo. En un futuro donde exista una mayor demanda, la posible solución será la perforación de más pozos en los acuíferos aluviales.

Actualmente no se cuenta con una herramienta cuantitativa, que ayude a los entes operadores y usuarios particulares de agua a optimizar la extracción de las reservas de agua subterránea, así como para plantear escenarios y gestionar un rendimiento seguro para la extracción de agua de los acuíferos.

1.9 Hipótesis

Los escenarios propuestos sobre el cambio climático en la zona del Pacífico Central de Costa Rica provocarán un descenso de los niveles de la carga hidráulica del agua subterránea en los acuíferos costeros de Herradura y Jacó; ya que se presume que la tasa de extracción de agua subterránea para los usos diversos no estará en equilibrio con la recarga anual de agua hacia los acuíferos costeros en Herradura y Jacó.

De esta manera se puede plantear la pregunta para la presente investigación:

¿Cuáles serán los niveles del agua subterránea en los acuíferos aluviales de las zonas de Herradura y Jacó ante los cambios en la recarga que provocarán los escenarios de cambio climático?

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Enfoque del estudio

La investigación hidrogeológica de los acuíferos Jacó y Herradura tiene un enfoque cuantitativo y el tipo de investigación en su mayor parte es exploratoria ya que en estas unidades hidrogeológicas nunca se han analizado por medio de un modelo numérico, solo se han realizado investigaciones y caracterizaciones a nivel conceptual de los acuíferos.

Esta investigación tiene un alto grado de correlación principalmente con información geológica, climática e hidrogeológica cuyas variables serán definidas, procesadas, correlacionadas e interpretadas para utilizarlas como insumos en el modelo numérico de los acuíferos, de esta manera se evaluaron las potenciales variaciones en las cargas hidráulicas en los escenarios propuestos de recarga potencial como consecuencia del cambio climático para escenarios futuros en los años 2080 y 2099.

2.2 Unidades de análisis

Se definieron las siguientes unidades de análisis:

- Las formaciones geológicas.
- Las unidades hidrogeomorfológicas.
- La recarga potencial hacia los acuíferos.
- La permeabilidad, transmisividad y porosidad de las unidades hidrogeológicas.
- El espesor y la distribución espacial de los acuíferos.
- La dirección y pendiente del flujo del agua en los acuíferos.

2.3 Técnicas e instrumentos

Las técnicas de investigación y los instrumentos que se utilizaron son los siguientes:

- Análisis documental de la información existente sobre geología e hidrogeología como lo son estudios, informes, publicaciones, mapas geológicos y geomorfológicos, fotointerpretación, archivos e informes de pozos perforados, concesiones.
- Observación y trabajo de campo con la descripción de afloramientos de roca y suelo en donde la cobertura del uso del seuelo lo permita, utilizando mapas impresos y digitales, registros fotográficos, anotaciones de campo para realizar un mapeo geológico a escala más detallada a escala 1:25000.
- Recolección de información de los niveles de agua subterránea en los pozos.
- Procesamiento de la información para la definición y construcción de las unidades geomorfológicas para definir las unidades de balance hídrico subterráneo.
- Uso de los sistemas de información geográfica para la elaboración de los mapas geológicos e hidrogeológicos, perfiles y columnas estratigráficas para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual.
- A pesar de que se planeó hacer sondeos eléctricos verticales o tomografías en los sectores que existe poca información de pozos perforados, esta técnica de investigación no se pudo realizar ya que no fue posible el uso del equipo de geofísica de la UCR por las complicaciones en la logística provocadas por la pandemia del COVID19.
- Se utilizó el programada de cómputo que utiliza el código MODFLOW por medio de la interfaz gráfica ModelMuse para la construcción y desarrollo de los modelos numéricos de los acuíferos, la técnica es la modelación numérica con la metodología de diferencias finitas.

2.4 Análisis de los datos

La información previa que ya se ha generado se analizó por medio de resúmenes y extracción de los contenidos más relevantes de estudios geológicos y publicaciones científicas, así como también con la digitalización de los mapas paras ser utilizados en los sistemas de información geográfica y que sirvan como insumos para la presente investigación.

Los pozos perforados de las bases de datos institucionales del SENARA, la Dirección de Agua del MINAE, el Departamento de Pozos del AyA y la ASADA de Herradura se procesaron en una base de datos en hojas electrónicas, en donde se filtraron, se extrajo, se analizó y se tabularon los datos para realizar análisis de los promedios de profundidades y niveles de agua. También se generaron las capas vectoriales e imágenes (*ráster*) en los sistemas de información geográfica para realizar los análisis espaciales y generación de mapas.

Se usaron los sistemas de información geográfica libre y de código abierto como el QGIS para la elaboración de los mapas geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos; así como perfiles geológicos e hidrogeológicos. Se procesó la información de niveles de agua, pendientes, isovalores de características hidráulicas de suelos manejando técnicas de interpolación como el Kriging, IDW, spline. Se hizo también una digitalización de los mapas que están en formato físico, para generar las figuras que se insertarán en el documento final.

Se utilizó el programa de cómputo que opera el código MODFLOW para construir los modelos numéricos de los acuíferos Herradura y Jacó; con el objetivo de evaluar cual serían las potenciales cargas hidráulicas tomando en cuenta las variaciones de la precipitación y la evapotranspiración como consecuencia del cambio y variabilidad climática para los escenarios de los años 2080 y 2100.

2.5 Fases de la investigación

La descripción de las fases de investigación se presenta a continuación:

2.5.1 Recopilación y procesamiento de estudios, mapas geológicos e hidrogeológicos

Esta fase comprendió la recolección, análisis y procesamiento de los estudios y mapas geológicos realizados en la zona de estudio, ya sea de la información oficial, en diferentes instituciones o de la información generada por los entes operadores de los acueductos en la zona.

2.5.2 Definición de la geología, la geomorfología local y las estructuras geológicas

Se hizo un trabajo de campo para levantar afloramientos de roca en las zonas en donde sea posible observar la geología superficial y se logró correlacionar las unidades de roca con los mapas existentes en la zona de estudio, también se definieron las unidades geomorfológicas locales a escala 1:25.000.

2.5.3 Análisis de las bases datos de pozos y concesiones

Se analizaron los informes finales de perforación se hizo un filtrado y una selección de la información de los pozos como la litología, niveles del agua y armado de la tubería ciega y la rejilla de las bases de datos del Senara, del AyA y de la Dirección de Agua del MINAE.

2.5.4 Recopilación y análisis de la información hidrológica

Se revisó y recopiló del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), SENARA, AyA, el MINAE y las ASADAS la información hidro-meteorológica disponible para la zona, como es la precipitación, temperatura, aforos en ríos y quebradas; así como estudios hidrogeológicos que hayan generado a nivel local de forma privada.

2.5.5 Extensión de la red de monitoreo de pozos

Desde el año 2014 el SENARA tiene una red de monitoreo de 8 pozos perforados, con el apoyo de la ASADA de Herradura y el AyA esta red se amplió con más pozos perforados y excavados y se pudo obtener más información, con una mejor cobertura en los acuíferos para realizar la calibración del modelo numérico.

Una vez que se definió la red de monitoreo a partir del mes de enero del año 2020 se realizaron mediciones mensuales del nivel del agua subterránea, así como de la conductividad eléctrica en la columna de agua de los pozos.

2.5.6 Uso de suelo

Utilizando imágenes de satélite y con la comprobación de campo se construyó el mapa de uso de y cobertura en la zona de estudio suelo a escala 1:25000; el cual es un insumo fundamental para el balance hídrico subterráneo.

2.5.7 Definición de las unidades para el balance hídrico subterráneo

Con base en los mapas geológico y geomorfológico se definieron las unidades para calcular el balance hídrico y la recarga potencial hacia los acuíferos utilizando la metodología de Schosinsky (2006), con base en la información de los análisis de la precipitación, temperatura, los suelos, la geología y la geomorfología local. También se utilizó el método de variación en la fluctuación de niveles y variación de la tabla de agua en el acuífero para el cálculo de la recarga neta en el acuífero Herradura.

2.5.8 Construcción del modelo numérico de los acuíferos y evaluación de diferentes escenarios climáticos

Se utilizó un modelo numérico con la técnica de diferencias finitas, se empleó el programa de cómputo ModelMuse que utiliza el código del MODFLOW ambos son de fuente o licencia abierta. Una vez construido el modelo se calibró con los datos de niveles de la red de monitoreo de pozos y también se desarrollarán los análisis de los escenarios con los valores de recarga potencial calculados para los escenarios de la precipitación y evapotranspiración para los años 2080 y 2099.

2.5.9 Elaboración del informe final y defensa del trabajo final de graduación

Se realizó el análisis de los resultados obtenidos y conclusiones sobre el procesamiento e interpretación de toda la información geológica e hidrogeológica. Se procede con los trámites de revisión del trabajo por parte del Comité Asesor y la defensa pública de la investigación conforme al procedimiento del Sistema de Estudios de Posgrado (SEP) de la UCR.

2.6 Materiales y equipos utilizados

Para el trabajo de campo se utilizó el equipo básico de geología como lo son los mapas topográficos a escala 1:50.0000, mapas geológicos regionales, piqueta, brújula, GPS, cámara fotográfica, ácido clorhídrico (10 %), libreta de apuntes de campo para los levantamientos afloramientos geológicos y la definición de las unidades geomorfológicas.

Para las mediciones de los niveles estáticos y dinámicos del agua subterránea en los pozos se utilizó las sondas con sensores para obtener información de las cargas hidráulicas de los pozos de la red de monitoreo en ambos acuíferos, por un período aproximado de un año.

Para la medición de caudal (aforos) de los ríos y quebradas en sitios específicos se utilizó el instrumento denominado molinete o correntómetro y el registro de la información se utilizará libreta de campo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Modelos hidrogeológicos conceptuales

El manejo de un sistema de aguas subterráneas, el cual puede ser un acuífero o un sistema de varios acuíferos, ya sea por separado o conjuntamente con las fuentes de agua superficial, involucra un reto muy importante para direccionar ciertos objetivos de investigación a través de una toma de decisiones concernientes al desarrollo y/u operación del sistema acuífero (Bear y Cheng, 2010). La correcta utilización y aprovechamiento de las aguas subterráneas requiere de un adecuado conocimiento del flujo y niveles del agua subterránea ante diversas acciones exteriores, entre las que cabe destacar la recarga natural, las extracciones por bombeo de pozos, el drenaje natural, el efecto de ciertas obras, etc. (Custodio y Llamas, 1983).

De manera general un modelo puede ser definido como *una versión simplificada de un sistema o un fenómeno real que toma lugar un momento o lugar determinado, el cual aproximadamente simula la respuesta a una excitación del sistema que tiene un interés de investigar* (Bear y Cheng, 2010). Un modelo hidrogeológico conceptual define detalles básicos del acuífero, como su geometría, profundidad, espesor, el rango de las conductividades hidráulicas, cargas hidráulicas observadas y aspectos del sistema que tiene influencia sobre el comportamiento hidráulico como los cuerpos de agua (interacción agua superficial-agua subterránea) y la extracción de agua subterránea por medio de pozos perforados. Por ejemplo, un sistema de agua subterránea puede ser estresado por el bombeo, por la introducción de un contaminante, por recarga artificial o por un cambio en las condiciones de frontera. Su "*respuesta*" toma la forma de los cambios espaciales y temporales en los niveles de agua subterránea y en la concentración de los contaminantes (Bear y Cheng, 2010).

Los modelos son utilizados por dos razones básicas: a) para extender la observación de los datos y b) para producir datos. Un modelo es un método de una representación de algo que va más allá de lo observado en el campo y por lo tanto se debe o tiene que describir de una manera simplificada (traducido de Vallero, 2018).

Un modelo hidrogeológico conceptual se define como una descripción pictórica y cualitativa de un sistema de agua subterránea en términos de sus unidades hidrogeológicas, que describe las fronteras del sistema (incluyendo las variaciones en el tiempo de las entradas y salidas del sistema) y las propiedades hidráulicas, así como también las propiedades de transporte (incluyendo su variabilidad espacial). El modelo conceptual es algunas veces visto como una hipótesis o combinación de hipótesis de los aspectos del sistema del agua subterránea que son relevantes para el objetivo de la modelación (Anderson y Woessner (1992); y Meyer y Gee (1999) en Enemark et al., 2019).

El desarrollo de modelo conceptual está basado en la información geológica e hidrogeológica disponible, la cual puede ser datos observados como niveles de agua, información de perforaciones y concentraciones de trazadores, pero a veces incluye un componente de conocimiento "*suave*", como los entendimientos y conocimientos geológicos o la interpretación de experto (traducido de Enemark et al., 2019). Un modelo es tanto más representativo del sistema real, cuando es capaz de reproducir más fielmente su comportamiento, o lo que es lo mismo, reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que los relacionan (Custodio y Llamas, 1983).

Los modelos hidrogeológicos son una potente herramienta de trabajo que permite manejar eficazmente situaciones complejas y tratar al sistema acuífero como un todo, no sin introducir simplificaciones; de esta manera se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento, ya sea analítico, matemático o analógico, que nos permite realizar la simulación de su comportamiento (Custodio y Llamas, 1983).

3.2 Modelos matemáticos de acuíferos

Un acuífero es un elemento de un sistema de recursos hidráulicos más complejo, que tiene sus leyes particulares de funcionamiento. Un sistema comprende un conjunto de componentes físicos y geométricos, unas acciones exteriores sobre el sistema y unas leyes de funcionamiento. Matemáticamente, se puede en cada momento definir el sistema por una serie de parámetros y de variables (Custodio y Llamas, 1983).

Los parámetros pueden describir los componentes geométricos, como forma, límites, etc., o sus componentes físicos, como transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc. Las variables, que se suelen llamar variables de estado, describen la situación del sistema en cada momento y pueden ser las alturas piezométricas, los componentes del vector de velocidad, la concentración química, etcétera (Custodio y Llamas, 1983).

Cuando se ha dividido el sistema para su análisis en elementos discretos, los parámetros y variables se pueden expresar en forma de vectores de *n* dimensiones. Las acciones exteriores al sistema son las que actúan sobre él y lo modifican. Pueden clasificarse como entradas o salidas; por lo que se sugiere que para poder definir el movimiento del agua en un acuífero se necesita (Custodio y Llamas, 1983):

- La descripción de su geometría.
- La descripción de unas propiedades físicas del medio en cada punto del dominio. Permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.
- Las leyes que rigen el movimiento del agua, Ley de Darcy, teorema de la continuidad.
- Las condiciones en los límites del sistema.
- Las condiciones del sistema en un tiempo t = 0.
- La descripción de las acciones exteriores al sistema.

Los modelos y procesos basados en el flujo de agua subterránea se derivan de dos principios básicos: conservación de la masa, que establece que el agua no se crea ni se destruye; y la ley de Darcy, que establece que el agua subterránea fluye de energía de alto potencial a unos más bajo Un modelo numérico es la solución aproximada de una ecuación diferencial en un dominio representado por elementos o celdas discretas, cuyas condiciones de borde e iniciales son conocidas. Se obtiene la solución en los puntos (nodos) del dominio que son representativos de las celdas o elementos definidos. (Andensor et al., 2015).

Un modelo matemático del flujo de agua subterránea consiste en una ecuación gobernante (derivada de la conservación de masa y la ley de Darcy) que representa procesos dentro del dominio del problema: Perímetro condiciones que representan procesos a lo largo de los límites; y para los problemas dependientes del tiempo (*transitorios*) las condiciones iniciales que especifican valores de la variable dependiente (por ejemplo la carga hidráulica) al inicio de la simulación (Andensor et. al., 2015).

De esta manera el movimiento en tres dimensiones del agua subterránea con una densidad constante a través del medio poroso en el subsuelo puede ser descrito por la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+Q'_s=S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

- K = conductividad hidráulica del acuífero (L/T).
- h= Carda hidráulica medida desde la base del acuífero (L).
- Q´s= es un flujo volumétrico por unidad de volumen que representa fuentes y sumideros de agua, siendo Q´s negativo para el flujo que sale del sistema de agua subterránea, y Q´s positivos para el flujo que entra al sistema hacia el sistema (T^{-1}).

- S_S= es el almacenamiento específico del material poroso (L^{-1}); y
- t= es el tiempo (T).

Para el flujo horizontal 2D y en el caso del estado estacionario no hay cambio en la carga con el tiempo; en ese caso el tiempo no es una variable independiente y el flujo estacionario se describe con una ecuación parcial tridimensional conocida como la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

En la Figura 3 se pauta el esquema con todos sus pasos para desarrollar un modelo numérico de un acuífero, debido al alcance de la presenta investigación se llegará la etapa de calibración, con base en los niveles de agua de la red de monitoreo de pozos.

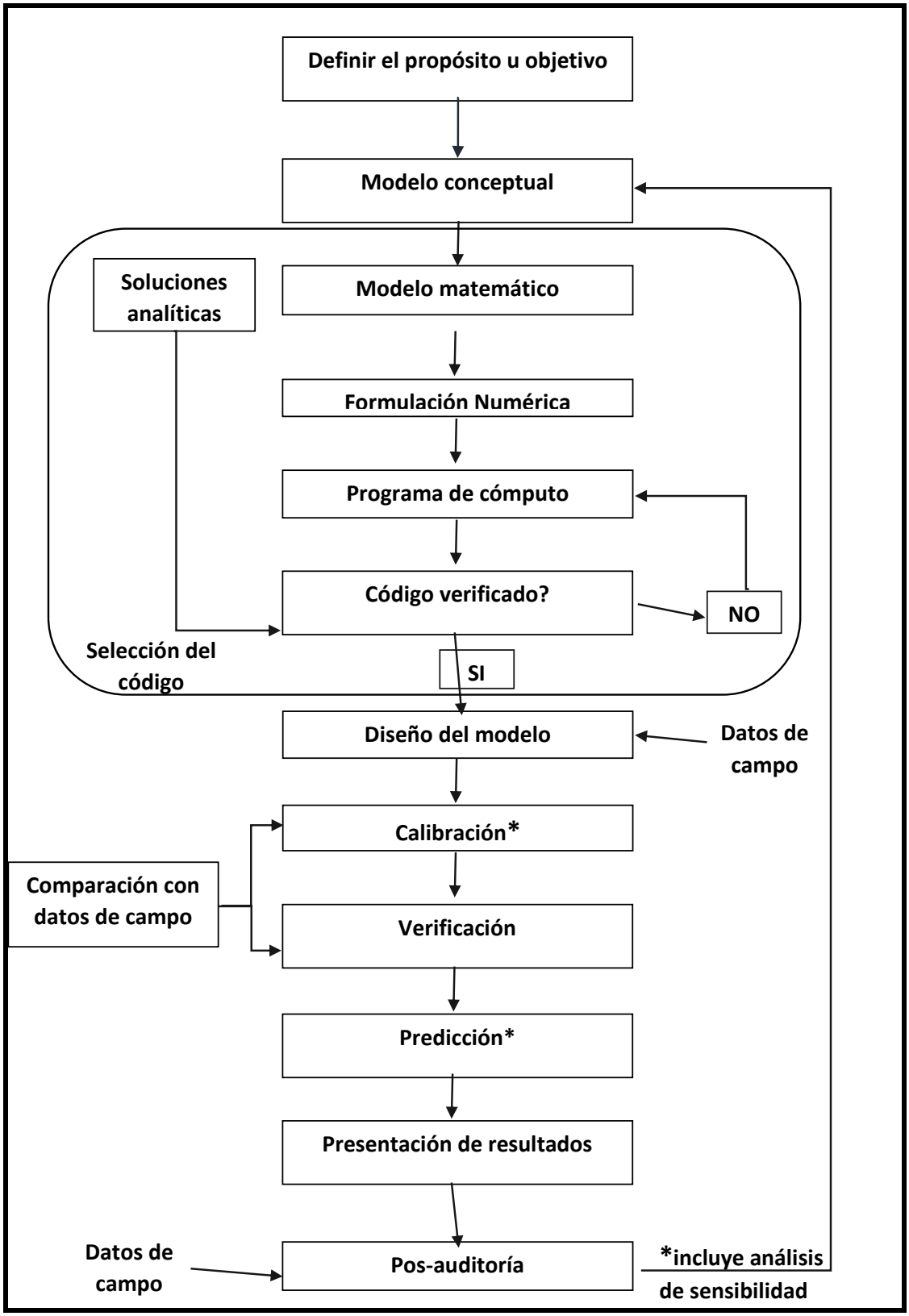


Figura 3 Pasos a seguir en un protocolo para la aplicación del modelo numérico (modificada de Andensor et al., 2015)

3.3 Balance hídrico y recarga potencial de agua a los acuíferos

El concepto universal de la conservación de la masa de agua implica que las metodologías del balance o un presupuesto hídrico son aplicables sobre cualquier escala de espacio y tiempo (traducido de Healy et al., 2007, en Healy, 2010). Bajo este enfoque de la conservación de la masa Schosinsky (2006) puntualiza que el agua que entra en el suelo es igual al agua que se almacena en el suelo más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos como flujo base o al mar.

Para los balances hídricos subterráneos se utiliza la ecuación básica:

$$P = ET + \Delta S + R_{off} + D$$

Donde tenemos que:

- P= precipitación.
- ET= evapotranspiración.
- ΔS= cambio en el almacenamiento del acuífero.
- R_{off} = escorrentía superficial.
- *D* = drenaje o infiltración.

En relación al drenaje o infiltración (***D)*** en la ecuación del balance hídrico cuando llueve, parte de la lluvia del comienzo es retenida en la cobertura vegetal como intercepción y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial. Conforme continúa la lluvia, el suelo se cubre de una delgada capa de agua conocida como detención superficial y el flujo comienza pendiente abajo hacia los cursos, lo que constituye la escorrentía superficial (Chereque, s.f).

Inmediatamente debajo de la superficie tiene lugar la escorrentía subsuperficial y las dos escorrentías, la superficial y la subsuperficjal, constituyen la escorrentía directa. La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra; la percolación es el movimiento del agua dentro del suelo y ambos fenómenos, la infiltración y la percolación, están íntimamente ligados puesto que la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda (Chereque, s.f). El agua que se infiltra en exceso de la escorrentía subsuperficial puede llegar a formar parte del agua subterránea como recarga, la que eventualmente puede llegar a los cursos de agua por medio del flujo base de los ríos y las quebradas principalmente (Chereque, s.f).

Por lo tanto se entiende por infiltración el volumen de agua que procedente de las precipitaciones (a veces también de los ríos o de la recarga artificial), en un determinado tiempo, atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo o de las formaciones geológicas subyacentes. No toda la infiltración alcanza la zona saturada (agua subterránea), pues en mayor o menor proporción, una parte queda en la zona superior (agua edáfica) y vuelve a la atmósfera por los fenómenos de evapotranspiración. El volumen de agua que alcanza la zona saturada, a veces se denomina *lluvia eficaz, infiltración eficaz, recarga natural o recarga profunda* o simplemente *recarga* (Custodio y Llamas, 1983).

De esta manera y en términos generales se denomina *recarga* al proceso por el que se incorpora o transfiere a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero o acuitardo, si los mismos son externos al acuífero o al sistema acuífero en cuestión o estudio (Custodio, 1998). La alimentación o recarga natural del agua del subsuelo es proceso un irregular e intermitente, en que intervienen la geología y el perfil del terreno (Chereque, s.f).

El entendimiento de la cantidad y el mecanismo de recarga de agua hacia los acuíferos es esencial para un manejo exitoso de los recursos hídricos, la modelación de los fluidos y el transporte de los contaminantes dentro del subsuelo (Healy, 2010).

La necesidad de conocer el potencial de aguas subterráneas para ser explotadas mediante pozos, conlleva a estimar la recarga de los acuíferos en proyectos de evaluación de las aguas subterráneas, lo que ha hecho que en Costa Rica se realicen estudios tendientes a establecer dicha recarga con base en la distribución de precipitación y coeficientes de infiltración en los suelos del país (Schosinsky, 2006).

Una clasificación de los tipos de recarga es la siguiente:

1. **Recarga Natural**: sigue el proceso normal del ciclo hidrológico, la recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua; es equivalente a la infiltración eficaz, natural o profunda (Custodio y Llamas, 1983). Algunos autores la recarga natural la separa con un criterio de distribución espacial en recarga difusa y recarga localizada.

A.1 La recarga difusa es la que está distribuida sobre grandes extensiones de área como respuesta a la precipitación infiltrando en la superficie del suelo y que percola a través de la zona no saturada hacia la tabla de agua; la recarga difusa algunas veces se refiere como a la recarga local (Allison, 1987 en Healy, 2010) o recarga directa principalmente en acuíferos porosos y algunos acuíferos fracturados someros (Simmers, 1997, en Healy, 2010).

A.2 La recarga localizada es el movimiento de agua de cuerpos superficiales de agua como ríos, quebradas, canales o lagos hacia un acuífero subyacente. La recarga localizada generalmente tiene una mayor variación o distribución espacial que la recarga difusa. Una distinción de los diferentes tipos de recarga localizada ha sido propuesta por Lerner et al. (1990; en Healy, 2010), con recarga localizada definida como recarga

concentrada de pequeñas depresiones, juntas o grietas del terreno y recarga indirecta localizada definida como recarga que puede ser mapeable de elementos superficiales como ríos, canales y lagos.

2. **Recarga no intencional**: este tipo de recarga esta es originada principalmente por actividades antrópicas como el riego en la actividad agrícola en zonas rurales principalmente, las fugas de los tanques de almacenamiento y las tuberías de los sistemas de abastecimiento de agua potable, aguas pluviales y aguas residuales principalmente en las áreas urbanas, drenajes de tanques sépticos en zonas urbanas y zonas rurales.

3. **Recarga intencional**: principalmente por medio del Manejo de Recarga de Acuíferos (*M.A.R* por sus siglas en inglés), principalmente desde la zona no saturada o en la zona saturada por medio de pozos de inyección, sin embargo existe una gran cantidad de técnicas que combinan la relación de las aguas superficiales/aguas subterráneas y viceversa.

4. GEOLOGÍA

4.1 Geología Regional

La zona de Herradura y Jacó se localiza en la zona Ante-arco de Costa Rica, en el límite de las unidades morfo-tectónica Basamento del Ante arco Herradura con las rocas del Complejo de Nicoya y la cuenca Nicoya con las rocas de la formación Punta Carballo y en la que dichas formaciones geológicas sedimentarias y volcánicas comprenden desde el Cretácico para las rocas más antiguas del Complejo de Nicoya; hasta el Holoceno con la acumulación de los Depósitos Cuaternarios Aluviales y la formación de los Manglares y Esteros con toda su dinámica marina – fluvial reciente (Figura 4).

Las formaciones geológicas regionales se basaron en el análisis y recopilación de la información del Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:400.000; (Denyer y Alvarado, 2007); el Mapa Geológico de Costa Rica a escala 1:500.000, (Tournon y Alvarado, 1997) y el Mapa Geológico de Costa Rica elaborado por el Ministerio de Ambiente y Energía, la Dirección de Geología y Minas y RECOPE; también en el año 1997; y para el caso específico de la formación Punta Carballo se ha utilizado la información y el mapa geológico generada por Denyer et al. (2003) para la hoja Barranca; la posición estratigráfica de las formaciones geológicas se ilustran en la Figura 4. De esta manera se describen a continuación las formaciones geológicas a nivel regional que cubre la presente investigación (Figura 5 Mapa geológico regional).

4.1.1 Complejo de Nicoya

A lo largo de toda la costa Pacífica de Costa Rica, en las Penínsulas de Nicoya, Santa Elena, Osa, Burica y en los promontorios de Herradura y Quepos, aflora una serie de basaltos, brechas y diques con intrusiones de peridotitas, gabros y plagio granitos que fueron incluidos en el Complejo de Nicoya; (Alvarado y Denyer, 1998; en Kussmaul, 2000).

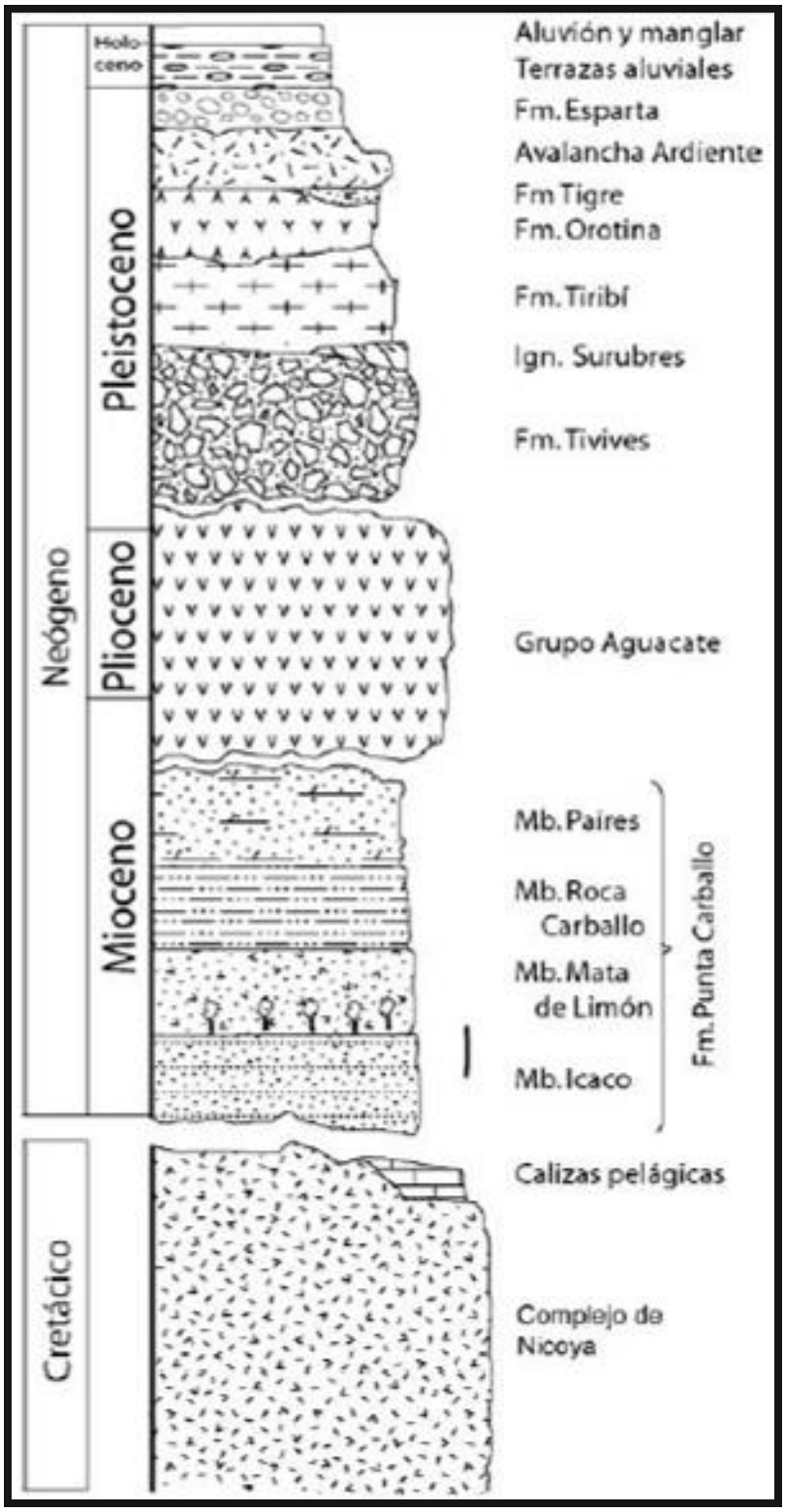


Figura 4 Columna estratigráfica regional del sector Pacífico Central, Costa Rica (Recuperado de: Denyer et al., 2003)

Costa Rica Central: Herradura, Turrubares y Candelaria

Para el sector del Pacífico Central de Costa Rica, coladas masivas, en almohadillas y brechas afloran desde el nivel del mar (Herradura) hasta alturas de unos 1500 metros (Cerro Turrubares). El espesor de este conjunto basáltico es entonces considerable pero no se conoce con precisión por falta de datos estructurales. La importancia de este volcanismo submarino es presentada por varíos autores (Dóndoli et al., 1998; en Tournon y Alvarado, 1997), pero los datos geoquímicos conciernen solamente a algunos afloramientos costeros en la zona de Herradura. Los basaltos tienen textura micro-ofítica o microlítica con olivino siempre seudomorfizado, clinopiroxeno, plagioclasa y titanomagnetita. Se destacan basaltos picríticos y basaltos hialoporfíricos con fenocristales de plagioclasas y olivino, y escasos microgabros hasta gabros intruyendo lavas almohadilladas, (Tournon y Alvarado, 1997).

Las alternancias de coladas masivas y en almohadillas tienen generalmente buzamientos débiles, pero se han notado buzamientos subverticales. Las formaciones piroclásticas comprenden hialoclastitas. Delgadas intercalaciones sedimentarias entre las coladas y sedimentos inter-almohadillas son bastante frecuentes. Se trata de radiolaritas y más a menudo calizas pelágicas, (Tournon y Alvarado, 1997). En la zona de Herradura, Jacó y hasta unos 5 km al noreste de Parrita; Arias, (2003); propone que el Complejo de Nicoya sea divido en dos unidades: los basaltos POC y la formación Tulín, la cual está constituida por brechas hialoclásticas, sedimentos epiclásticos, basaltos, piroclastos, gabros y cumulitas de olivino.

4.1.2 Formación Punta Carballo

Esta formación geológica está compuesta principalmente por rocas siliciclásticas (areniscas finas, medias y gruesas, lutitas, conglomerados y brechas). Madrigal (1970), Kuijpers (1979) y Denyer et al. (2003); coinciden al definir la posición estratigráfica de los miembros de la Formación Punta Carballo y definen los siguientes miembros para la formación Punta Carballo:

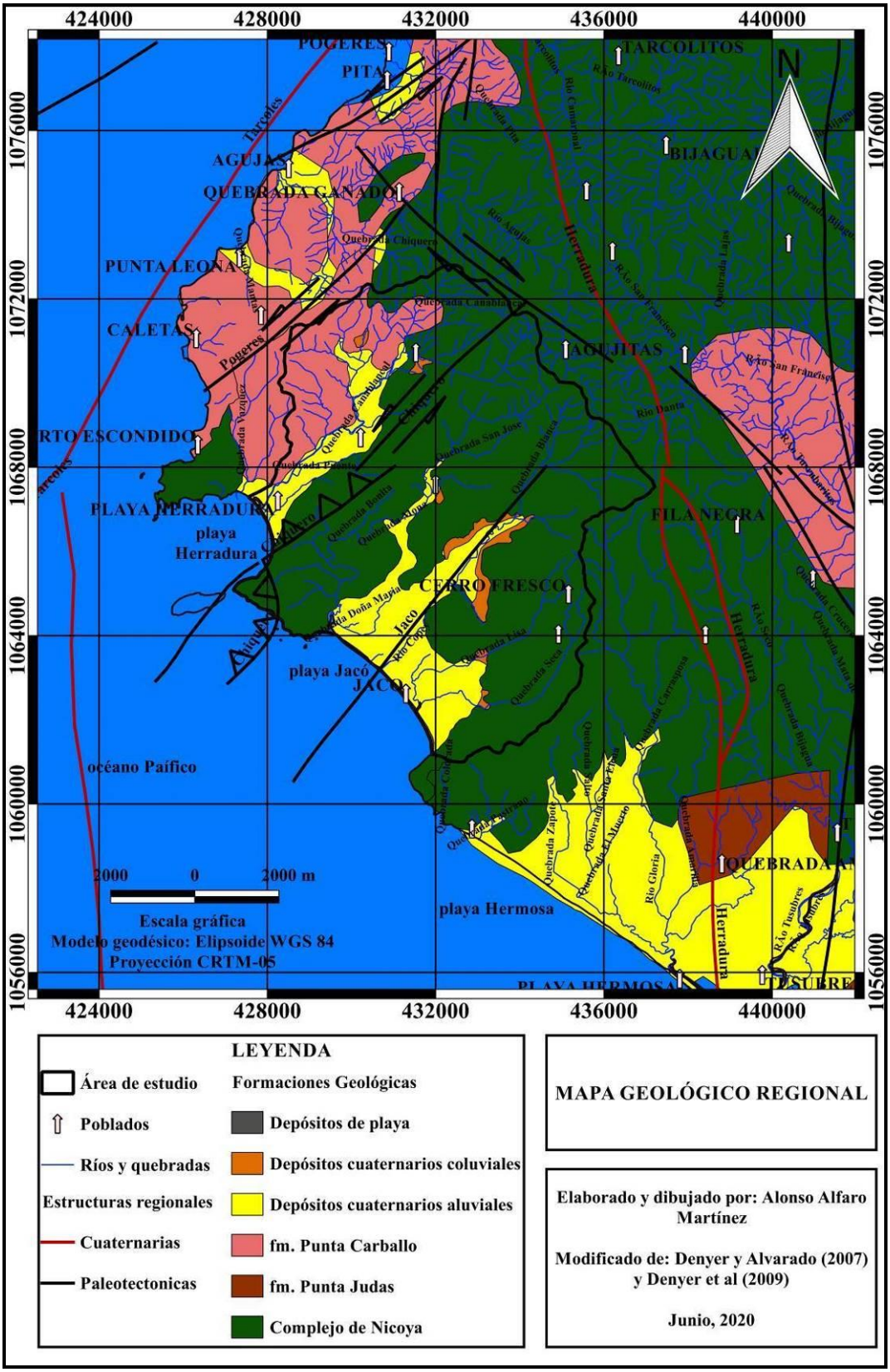


Figura 5 Mapa geológico regional

Miembro Icaco

Según Denyer et al. (2003) se trata de Intercalaciones de estratos de areniscas con muchos foraminíferos planctónicos y lutitas, de color gris. Arenisca gruesa gris verdosa con abundantes Thalassinoides ramificados y Ophiomorpha nodosa. Algunos lentes de conglomerados con clastos milimétricos de composición variable y niveles de arenisca brechosa. La edad geológica es Mioceno Inferior, con base en relaciones estratigráficas (Denyer et al., 2003) con un ambiente de depositación de alta energía, posiblemente litoral somero.

Miembro Mata de Limón

Madrigal (1970) lo describe como una secuencia de sedimentos volcánicos estratificados, dentro de los que hay una dominancia de limolitas y areniscas tobáceas que se estratifican con brechas y conglomerados de la misma naturaleza. Kuijpers (1979 en Denyer et al., 2003) lo caracteriza como una sedimentación cíclica caracterizada por alternancias de conglomerados verdes y series de arcillita roja.

Para Denyer et al. (2003) corresponde con rocas volcaniclásticas: brechas conglomerádicas (debris flows y pumice flows), areniscas y limolitas con un típico color rojo y/o morado, a veces verdoso cuando está enriquecido en vidrío volcánico pumíceo con intercalaciones de tobitas blancuzcas y algunos conglomerados verdosos. Afloramientos aislados de ignimbritas y tobas con lapilli acrecional también están presentes, así como xilópalos.

Con base en dataciones radiométricas no publicadas su edad geológica es asignada a Miocena Inferior, su contacto inferior con el Miembro Icaco es neto y el contacto superior es transicional con el Miembro Roca Carballo (Denyer et al., 2003). Su ambiente de depositación es aluvial, con ríos entrelazados (Kuijpers, 1979 en Denyer et.al., 2003) con gran influencia volcánica (ignimbritas, tobas, lahares). Laurito (1988 en Denyer et.al.,

2003) lo describe como de abanico deltaico mareal. Además, la ocurrencia de tobas y un bosque en posición vital evidencia un ambiente continental.

Miembro Roca Carballo

Kuijpers (1979) denomina formalmente esta unidad para referirse a las mismas litologías a las que Madrigal (1970) se había referido como Miembro Punta Carballo. Corresponde con una secuencia de lutitas gris verdosas, silíceas con laminación paralela, areniscas gris azuladas con estratificación centimétrica, conglomerados verdosos con estratificación decimétrica a métrica constituidas por fragmentos de lava centimétrica, brechas y tobas (Campo II, 1997 en Denyer et.al., 2003). Kuijpers (1979 en Denyer et.al., 2003) describe un nivel de tobita vítrea de 50 cm de espesor y dos horizontes centimétricos con gran concentración de fósiles. Dentro de los constituyentes destacan fragmentos de andesitas, plagioclasas, conchas y troncos.

Dentro de las estructuras sedimentarias se observan laminación paralela, estratificación cruzada y ondulada, así como bioturbación Ophiomorpha y Thalassinoides (Kuijpers, 1979). Su contacto inferior es transicional con el Miembro Mata de Limón y su contacto superior con el Miembro Paires no se observa en sección continua pero, por la poca distancia entre los afloramientos, se considera que debe ser bastante abrupto en el río Paires (Denyer et al., 2003).

Con respecto a su edad geológica para Hass (1942 en Denyer et.al., 2003) le asigna Mioceno Medio, Fisher & Aguilar (1995 en Denyer et.al., 2003) infieren que la edad debe extenderse hasta Mioceno Superíor, al igual que Fisher (1981 Denyer et.al., (2003) y Amann (1993 en Denyer et.al., 2003) y para Denyer et al. (2003) tiene una edad que varía entre el Mioceno Inferior hasta Mioceno Medio. Para Kuijpers (1979 en Denyer et.al., 2003) y Laurito (1988 Denyer et.al., 2003) el ambiente de depositación se refiere a llanura de marea en una bahía interna, hasta estuario submareal (Fisher & Aguilar, 1995 en Denyer et.al., 2003).

Miembro Paires

Denyer et al. (2003) define formalmente el Miembro Paires como parte de la Formación Punta Carballo y lo describe como intercalaciones de areniscas algo calcáreas, tobitas violáceas, brechas finas con matriz tobácea de color morado, brechas verdosas con fragmentos volcánicos y niveles con lapilli acrecional, tanto en las brechas como en las tobas. Las areniscas tienen estratificación decimétrica, presentan laminaciones cruzadas y paralelas, icnofósiles: Thalassinoides son muy comunes. Pasa a una brecha conglomerádica con clastos centimétricos verde y violáceos de andesitas, areniscas y tobas (Denyer et al., 2003).

Este Miembro sobreyace al Miembro Roca Carballo, en un contacto inferido y es sobreyacida en forma discordante por las vulcanitas del Grupo Aguacate (Denyer et al., 2003). Basado en relaciones estratigráficas, Denyer et al. (2003) le asigna edad de Mioceno Superior y su ambiente de depositación se interpreta como la unidad que representa colmatación de la cuenca, por lo que predominan los sedimentos aluviales de inundación con mucha influencia volcánica y con ocasionales transgresiones.

4.1.3 Depósitos Cuaternarios Aluviales

Son depósitos de origen fluvial de bloques, gravas, arenas y con cobertura y/o intercalaciones de granulometrías finas como limos y arcillas, inclusive algunas mezcladas con bloques, que se han depositado en las partes bajas de las micro-cuencas de la zona de estudio en la costa pacífica del cantón de Garabito; en donde destacan por su mayor extensión las planicies aluviales de Jacó y Herradura (Denyer y Alvarado, 2007).

4.2 Geología estructural regional

Las principales estructuras regionales de la zona de estudio son las siguientes:

4.2.1 Falla Herradura

Es una estructura cuaternaria que se encuentra ubicada al sur de Orotina y a unos 5 km al este de la zona de estudio, específicamente en el promontorio de Herradura, entre las fallas Camaronal (al suroeste) y Delicias (al noreste). En conjunto con estas últimas fallas, conforma el sistema de falla Bijagual (modificado de https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/99-actividad-sismica/fallas-activas-ii/3739-falla-herradura?Itemid=225.).

Montero (1999) y Denyer et al. (2003) le asignan una longitud cercana a los 35 km, extendiéndose desde su intersección con la falla Tárcoles, al norte, hasta alcanzar Punta Judas en su extremo sur. Según Montero (1999) y Montero (2001) corresponde con una falla orientada nor-noreste, de movimiento sinestral con una componente normal. En su extremo sur, Denyer et al. (2003) infieren que el bloque oeste se encuentra levantado con respecto al bloque este (Figura 5).

Lo más destacable que evidencia esta falla es una serie de escarpes que miran hacia el este, ubicados en la zona oeste de la localidad de Bijagual. Hacia el sector sur de Bijagual se observa como la falla atraviesa y desvía sinestralmente un prominente lineamiento orientado oeste-noroeste. Más hacia el sur, la falla pierde expresión hasta alcanzar el sector de Punta Judas, donde culmina su traza continental (recuperado de https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/99-actividad-sismica/fallas-activas-ii/3739-falla-herradura?Itemid=225).

4.2.2 Falla Tárcoles

Esta estructura neotectónica inicia en el sector este del Golfo de Nicoya y se extiende por la zona de Tárcoles y Orotina hasta Los Montes del Aguacate. Se le denomina así debido a que su traza corre paralela al río Tárcoles y pasa por el poblado que lleva el mismo nombre y tiene una longitud de 60 km. (modificado de: https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/3317-falla-tarcoles?Itemid=225). Se considera como una falla de desplazamiento de rumbo donde su dirección varía de noreste a este-noreste (Figura 5). Tiene un movimiento sinestral (Denyer el al, 2003). Las evidencias morfológicas como desplazamientos de aluvión recientes, desvío de drenajes, escarpes y contraescarpes facetados, disectados, cambios de tonalidad en la vegetación, desvío de divisorias, sillas de falla y cambios de pendiente indican que es una falla reciente y, por lo tanto, activa (Montero, 1999). En la desembocadura del río Grande de Tárcoles se encuentran plataformas de bioerosión hundidas y se puede comprobar una subsidencia de un metro debajo del nivel original. Además, se observan depósitos de terrazas fluviales recientes fallados a lo largo de la traza central (Montero, 1999). Asimismo, al sur-suroeste del poblado de Orotina se encontraron depósitos aluviales recientes cortados por pequeñas fallas. (recuperado de https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/3317-falla-tarcoles?Itemid=225).

4.2.3 Falla Pógeres

Denyer et al. (2003) definen que esta estructura paleotectónica se ubica en la fila que limita el sector NW de la zona de estudio, es una falla de movimiento sinestral con rumbo NE, con una longitud de 2,7 km y tiene un componente de movimiento vertical ascendente del bloque NW (Figura 5).

4.2.4 Falla Chiquero

Denyer et al. (2003) ubican esta falla paleotectónica en el sector central de la zona de estudio, en el lomerío sobre las rocas del Complejo de Nicoya que divide la cuenca de la quebrada Cañablancal y la quebrada Bonita; y que específicamente divide los sectores de Herradura y Jacó (Figura 5) con un aspecto gemorfológico muy particular. Tiene una longitud de 4,7 km y es una falla inversa cercana a la costa y a unos 3 km en dirección hacia el NE cambia a una estructura de desplazamiento de rumbo, hasta limitar con la falla Herradura.

4.2.5 Falla Jacó

Se ha denominado como falla Jacó a la estructura paleotectónica que se ubica en el sector central de playa Jacó definida por Denyer et al. (2003); estos autores la definen como una falla inferida con rumbo NE-SW, sin embargo no tiene nombre por lo que para este trabajo se designa como la falla Jacó, tiene una longitud de unos 6 km entre la playa Jacó y la quebrada Blanca en la fila Piedra Bruja al este de playa Jacó como se muestra en la Figura 5.

4.3 Geomorfología regional

De acuerdo a Salazar (2000) regionalmente el área de estudio se ubica en la unidad denudacional de Serranías y Valles en rocas cretácicas del Complejo de Nicoya y las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo, en donde las diferencias de relieve son apreciables. Salazar (2000) describe que en esta unidad denudacional regional se presentan laderas muy fuertes, con divisorias muy angostas, en muchos casos verdaderos espinazos; los fondos de los valles son generalmente angostos (Salazar 2000). Algunos de los valles de fondo ancho presentan relleno de poco espesor. Su forma actual está ligada a la erosión fluvial, que ha dejado a estas serranías en un estado de denudación extrema Salazar (2000).

4.4 Geomorfología local

Con base en las pendientes del terreno y las observaciones de las formas que se han originado en las rocas del área de estudio en el trabajo de campo a nivel local, se definieron cuatro unidades o geoformas: tres de origen denudacional en las rocas volcánicas y sedimentarias; y dos de origen de sedimentación fluvial en las planicies de Herradura y Jacó, esto según la clasificación sugerida por Gutiérrez y Gutiérrez (2016). La descripción del modelo digital de elevación del terreno, el mapa de pendientes y la designación de las unidades geomorfológicas definidas a nivel local es la siguiente:

4.4.1 Modelo de Elevación Digital del Terreno

El modelo de elevación digital para la zona de estudio se construyó de manera digital utilizando el sistema de información geográfica QGis, con los insumos de las curvas de nivel en formato digital a escala 1:25.000, también se utilizaron los puntos de control de elevación disponibles en el sitio del SNIT, el mismo se construyó por medio de una interpolación con la metodología *TIN* (Red Irregular Triangulada por sus siglas en inglés) y de ese archivo se genera el mapa en formato de ráster con los rangos de elevación del terreno en celdas con dimensiones de 10 x 10 metros agrupados en cinco clases, la Figura 6 es el mapa del modelo digital de elevación del terreno para la zona de interés en Herradura y Jacó.

4.4.2 Mapa de Pendientes

Utilizando el modelo de elevación digital y por medio de la herramienta Slope en el programa de cómputo QGis se obtiene el mapa de pendientes del terreno en grados, el cual es un insumo fundamental para definir las unidades geomorfológicas locales, el mapa de la distribución de las pendientes en grados en el área de estudio en Herradura y Jacó se ilustra en la Figura 7.

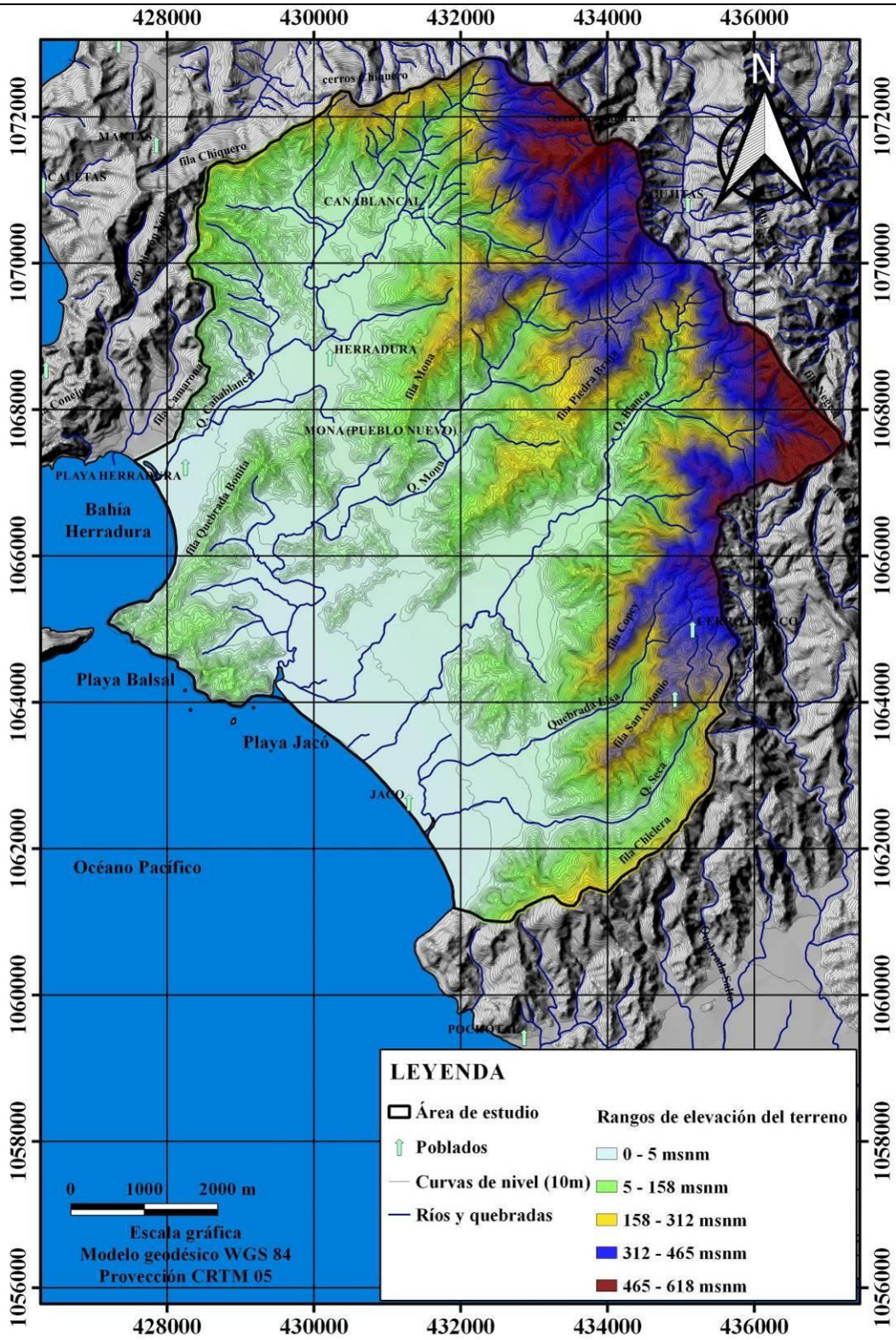


Figura 6 Mapa del modelo digital de elevación del terreno
Fuente: SNIT (2020) - Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

4.4.3 Unidad Denudacional de Pendiente Fuerte a Muy Fuerte

Se conforma tanto en las rocas sedimentarias de areniscas de la formación Punta Carballo como en las rocas volcánicas de los basaltos de la formación Complejo de Nicoya, se distribuye principalmente en las partes altas de las filas de los cerros Chiquero, Cerro Herradura en la zona norte del área de estudio y en las filas San Antonio y Chiclera al sur-sureste de la zona de Jacó, (véase las figuras 8, 9 y 12).

Las pendientes oscilan entre los 30 y 65° en donde las laderas de los cerros son muy escarpadas y las divisorias en las crestas de las microcuencas son muy angostas, los drenajes superficiales son muy cortos y de alta pendiente, esto como producto de las estructuras paleotectónicas de las fallas Pógeres y Chiquero (Figura 5). Los cauces de los ríos y las quebradas forman valles en forma de V y las laderas tienen pendientes muy fuertes hacia los cauces de agua, esta unidad tiene una alta densidad de drenaje con un patrón dendrítico (Figura 12).

4.4.4 Unidad Denudacional de Pendiente Moderada a Fuerte

Al igual que la unidad anterior y como resultado de las estructuras de las fallas Pógeres y Chiquero a nivel local, esta geoforma se ha producido tanto en las rocas sedimentarias de areniscas de la formación Punta Carballo como en los basaltos de la formación Complejo de Nicoya, es la que tiene mayor predominancia en las partes medias de las filas de los cerros Chiquero, Cerro Herradura en la zona norte del área de estudio y en las filas San Antonio y Chiclera al sur-sureste de la zona de Jacó, esto se ilustra en las figuras 8 y 9. Las pendientes en las laderas erosionales oscilan entre los 14 y 30° en donde las laderas de los cerros son medianamente escarpadas, los drenajes son muy cortos y valles en forma de **V** sin embargo son un poco más anchos ya que están cerca de la transición hacia los pie de monte y las planicies de sedimentación fluvial, esta geoforma tiene una alta densidad de drenaje con un patrón dendrítico (Figura 12).

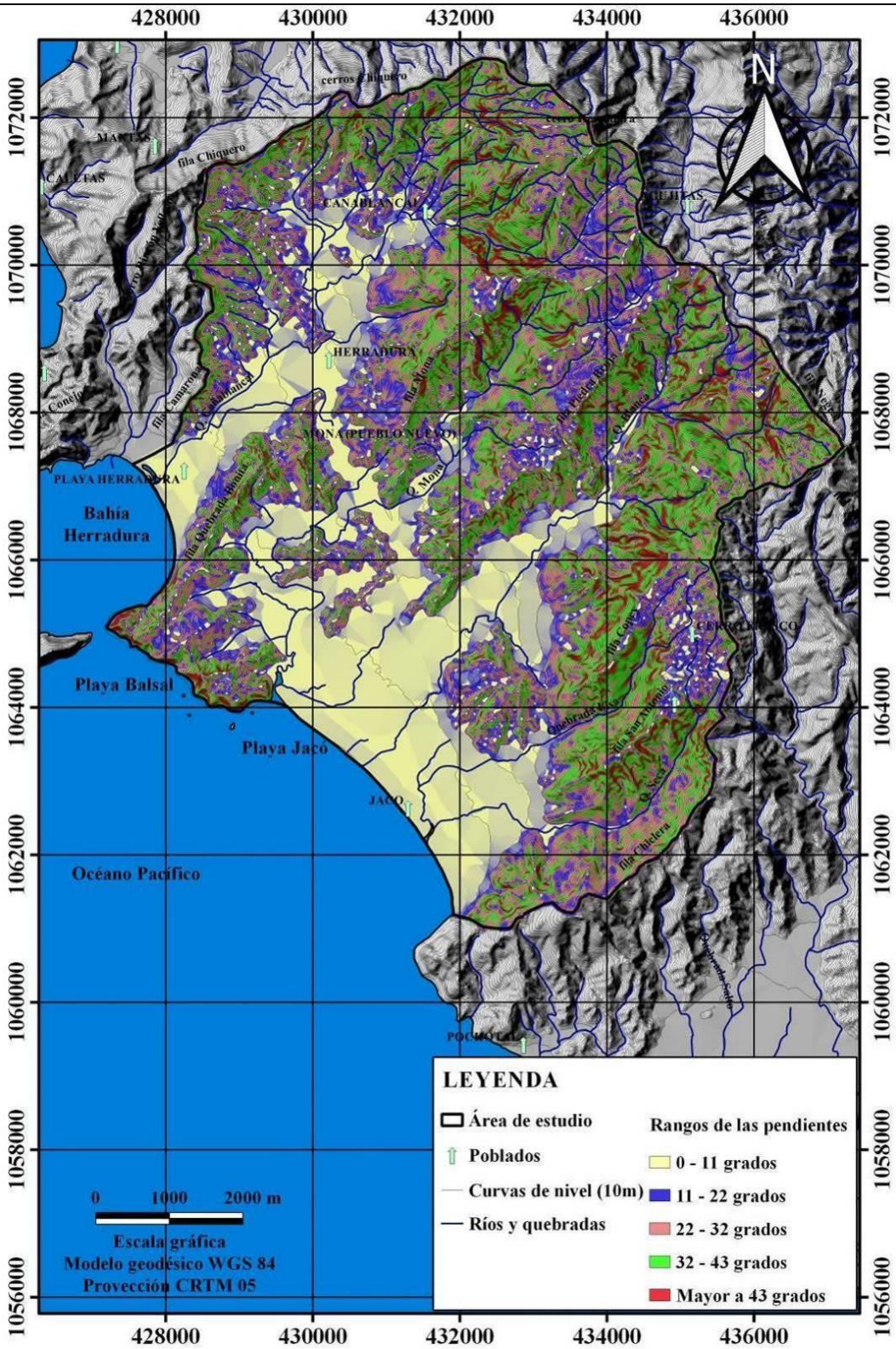


Figura 7 Mapa de pendientes en grados
Fuente: SNIT (2020) - Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

Figura 8 Unidad denudacional de pendiente fuerte a muy fuerte en la zona de cerro Fresco y fila Copey, sector Este de Jacó

Figura 9 Unidad denudacional de pendiente fuerte a muy fuerte en la zona de los cerros Herradura

4.4.5 Unidad Denudacional de Pendiente Baja a Moderada

Se ha originado en las areniscas de la formación Punta Carballo y también en los basaltos de la formación Complejo de Nicoya; especialmente en la transición entre las formas de origen denudacional y las planicies de sedimentación fluvial (Aluviones), las pendientes oscilan entre los 0 y los 14 grados en donde en algunos caso es difícil distinguir entre ambas unidades, caso especial es el sector de la parte baja de la microcuenca de la quebraba Bonita, en donde unos lineamientos inferidos pudieron ser fallas antiguas que originaron las partes planas en las rocas del Complejo de Nicoya, también tanto en los basaltos como en las areniscas se presentan mesetas por erosión de las rocas meteorizadas en las partes altas de los cerros (Figura 7).

4.4.6 Unidad de Sedimentación Fluvial de Pendiente Muy Baja a Moderada

Se han formado producto de la erosión y depositación fluvial de las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo y los basaltos del Complejo de Nicoya de los cerros que rodean la zona de estudio en donde los procesos de sedimentación han depositado los materiales en las planicies aluviales costeras de Herradura y Jacó; esto por la acción del agua en los principales drenajes superficiales como la quebrada Cañablancal, quebrada Doña María y el río Copey principalmente. Tienen pendientes de muy baja a leve (0-14°) con una dirección de inclinación hacia el W y el SW (Figura 10 y Figura 11).

En la microcuenca de la quebrada Cañablancal en el sector de Herradura, el origen fue por la despositación de materiales en los terrazas y el cauce principal, condicionado por la depresión de la falla regional inversa y de desplazamiento de rumbo sinestral en la cual se fue conformando el relleno en la discontinuidad topográfica creada por dicha falla, esta zona se hace un poco más angosta hacia la zona de la Playa Herradura y la desembocadura al océano (Figura 12).

Esta estructura regional se define con base en las estructuras que reportan Denyer et.al. (2003) y Denyer y Alvarado (2007), misma que fue corroborada en el trabajo de campo en la zona entre la Playa Herradura, el poblado de Herradura y la zona de Cañablancal (Figura 5). En esta geoforma la densidad de drenaje es baja y el patrón de drenaje se clasifica como paralelo y es dominado por cauce principal de la quebrada Cañablancal, que tiene muy pocos afluentes de carácter intermitente.

Para el sector de las microcuencas de la quebrada Doña María y el río Naranjal en la zona plana de Jacó y alrededores, el origen de esta geoforma fue por la despositación de materiales en las llanuras de inundación y que fue conformando el relleno una discontinuidad topográfica creada por una falla antigua, la cual puede ser el alineamiento que reporta Denyer et.al. (2003) y Denyer y Alvarado (2007) que se ha definido como la falla paleotectónica Jacó, misma que fue corroborado en el trabajo de campo con el rasgo geomorfológico en la llanura en el sector NE de Jacó (Figura 5 y Figura 12).

En esta geoforma la densidad de drenaje es muy baja y el patrón de drenaje paralelo es dominado por cauce principal del río Copey y el río Naranjal, ambos desembocando en la playa de Jacó (Figura 12).

Figura 10 Unidad de sedimentación fluvial, parte baja de la quebrada Cañablancal en la zona de Herradura

Figura 11 Unidad de sedimentación fluvial en el sector plano del aluvión del río Copey, sector de Jacó

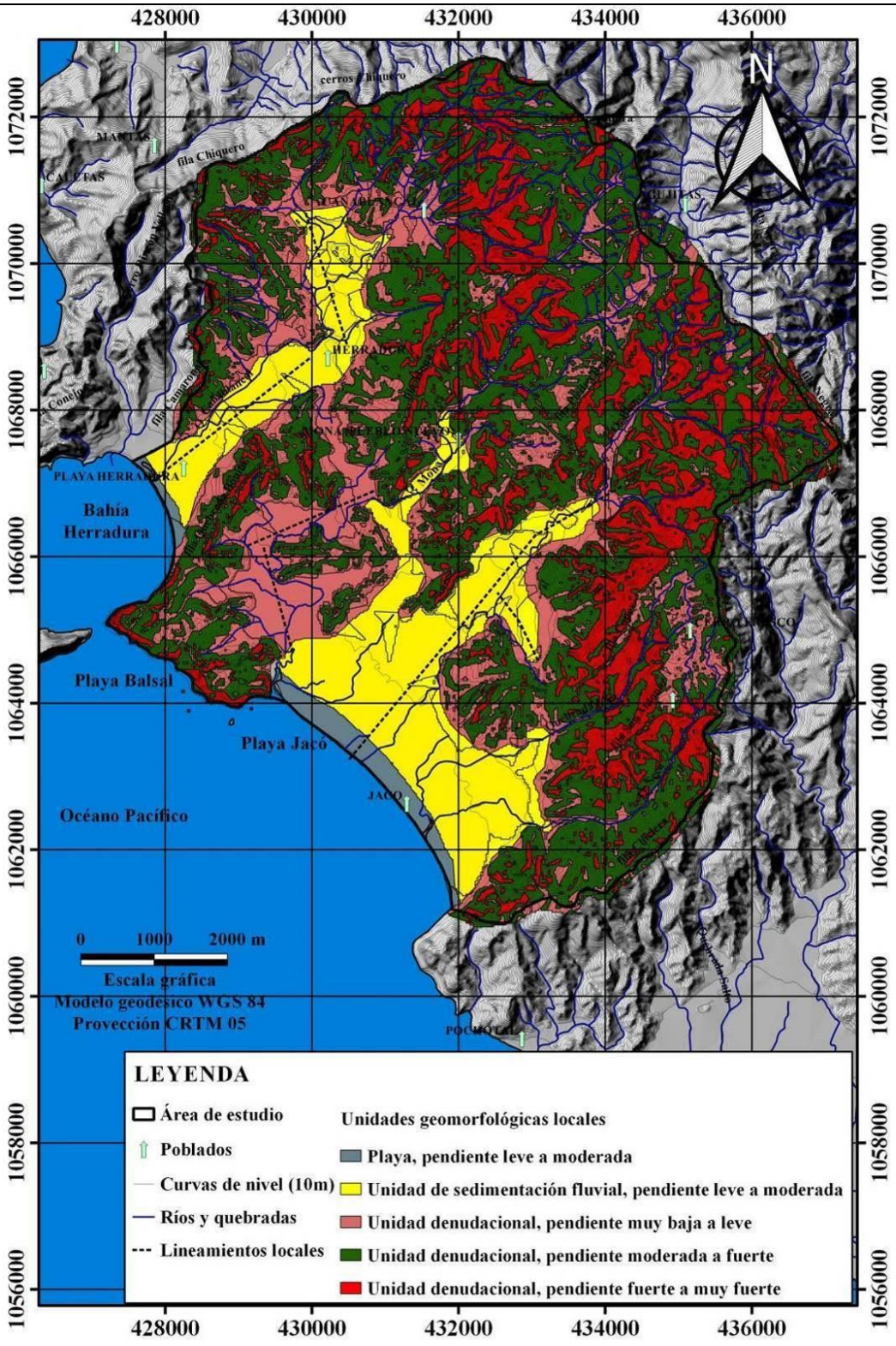


Figura 12 Mapa geomorfológico local
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

4.5 Geología Local

Las siguientes unidades de roca locales fueron definidas con base en el reconocimiento de campo por medio del mapeo de 101 afloramientos de roca y sedimentos en los ríos, quebradas, cortes de camino, así como con los aspectos geomorfológicos locales, modelos de elevación digital e imágenes de satélite. La información de los afloramientos levantados, su distribución y ubicación espacial están en la tabla y el mapa del Anexo 1.

El Mapa Geológico Local para el sector de Herradura y Jacó se muestra en la Figura 13 y se describen a continuación las unidades de roca de la más antigua a la más reciente:

4.5.1 Unidad de basaltos negros

A nivel local tiene una extensión de unos 51 km^2 lo que representa un 71 % de cobertura en los cerros que bordean los sectores de Herradura y Jacó (Figura 13), la distribución de esta unidad en la zona de estudio es en el sector norte y sureste. Se compone de rocas volcánicas de composición basáltica, con un color negro a un azul muy oscuro, son rocas muy duras con una alta densidad, de textura afanítica porfirítica y a nivel macroscópico se observan minerales milimétricos de plagioclasas, piroxenos y anfíboles.

En general la gran mayoría de los afloramientos observados están altamente fracturados, las fisuras son de dimensiones milimétricas y están rellenas de cuarzo y calcita, las fracturas que están abiertas sin relleno de minerales tienen en sus planos un alto contenido de pátinas de óxido de hierro y manganeso (Figura 14); esta unidad está sobreyacida por los depósitos cuaternarios aluviales.

La roca meteorizada tiene un color rojizo y café muy claro, es una roca muy suave y se disgrega fácilmente con la mano, las rocas basálticas cuando está con alto grado de alteración conforma bloques pequeños de tamaños milimétricos y centimétricos y los minerales de relleno en las fracturas se alteran a arcillas de color blanco, el espesor de suelo

observado es entre 0,70 y 1 metro y se descompone a una arena limosa de color rojo oscuro (Figura 15).

A nivel regional la unidad de basaltos negros se correlaciona con las rocas de la formación geológica Complejo de Nicoya, como parte del Plateau Oceánico Caribe (*POC*) y con una edad del Cretácico Superior Campaniano con una edad de unos 87 millones de años (Sinton et al., 1997 y Hauff, 1998 en Arias, 2003).

4.5.2 Unidad de areniscas grises

Esta unidad se localiza en el sector NW de la zona de estudio, tiene un área de 7,20 km^2 para un 10% de cobertura. Está conformada por areniscas de color gris oscuro, las rocas tienen un alto grado de fracturamiento, con estratos decimétricos de arenas de grano medio a grueso con laminación paralela, la roca sana es dura pero está muy fracturada (Figura 19), de forma general y con base en los afloramientos observados en la zona de estudio y alrededores las fracturas son cerradas y no tienen minerales de relleno.

A nivel macroscópico se observan componentes terrígenos de tamaños milimétricos angulares, minerales de cuarzo, feldespatos, piroxenos y anfíboles debido a la erosión de las rocas del Complejo de Nicoya la cual es la formación geológica que la subyace y está en contacto lateral por falla como se observa en los perfiles geológicos en la Figura 16 y la Figura 17, también se observan fragmentos de fósiles de ambiente marino somero como bivalvos, la roca tiene laminaciones paralelas con dimensiones centimétricas a milimétricas con una gran acumulación de clastos y minerales.

La roca meteorizada tiene un color amarillo claro a crema, tiene un alto de fracturamiento, es muy suave y deleznable ya que se disgrega fácilmente con la mano; tiene el efecto de la meteorización esferoidal en capas de cebolla y un gran contenido de pátinas de óxido de hierro y manganeso en las fracturas como producto de la alteración de los componentes terrígenos volcánicos, sin embargo no presenta ningún material de minerales secundarios de relleno como se puede observar en la fotografía en la Figura 20.

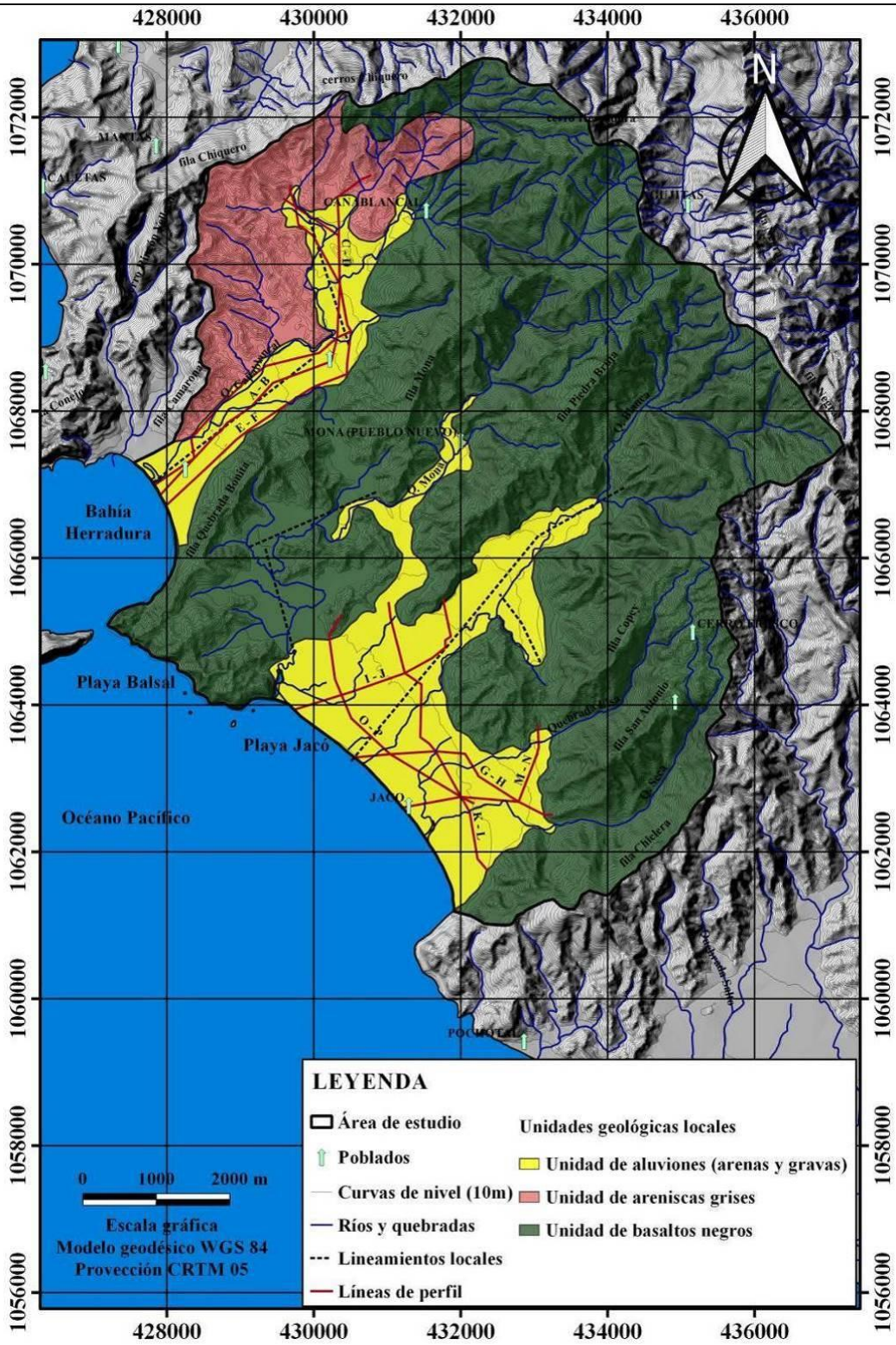


Figura 13 Mapa geológico local
Modificado de: Denyer y Alvarado (2007)
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

Figura 14 Afloramiento de la Unidad de Basaltos negros muy fracturados (coordenadas 428539/1071252)

Figura 15 Afloramiento de las rocas del Complejo de Nicoya (basaltos) en la zona de Jacó con alto grado de meteorización (431879/1063801)

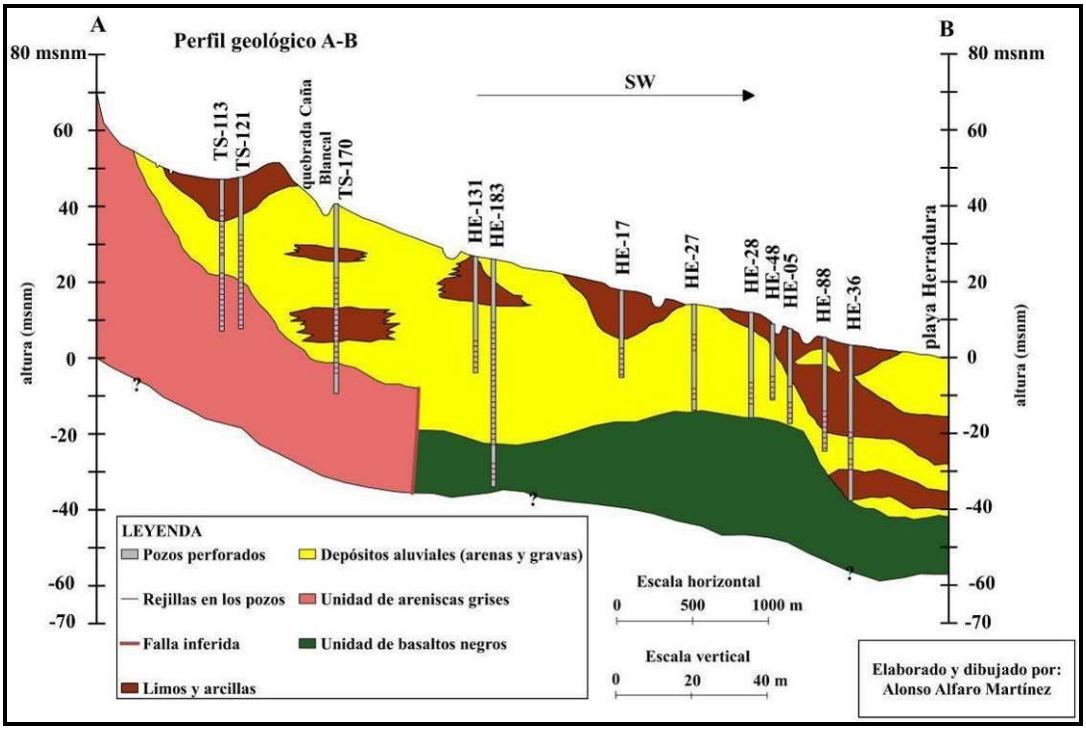


Figura 16 Perfil geológico A – B

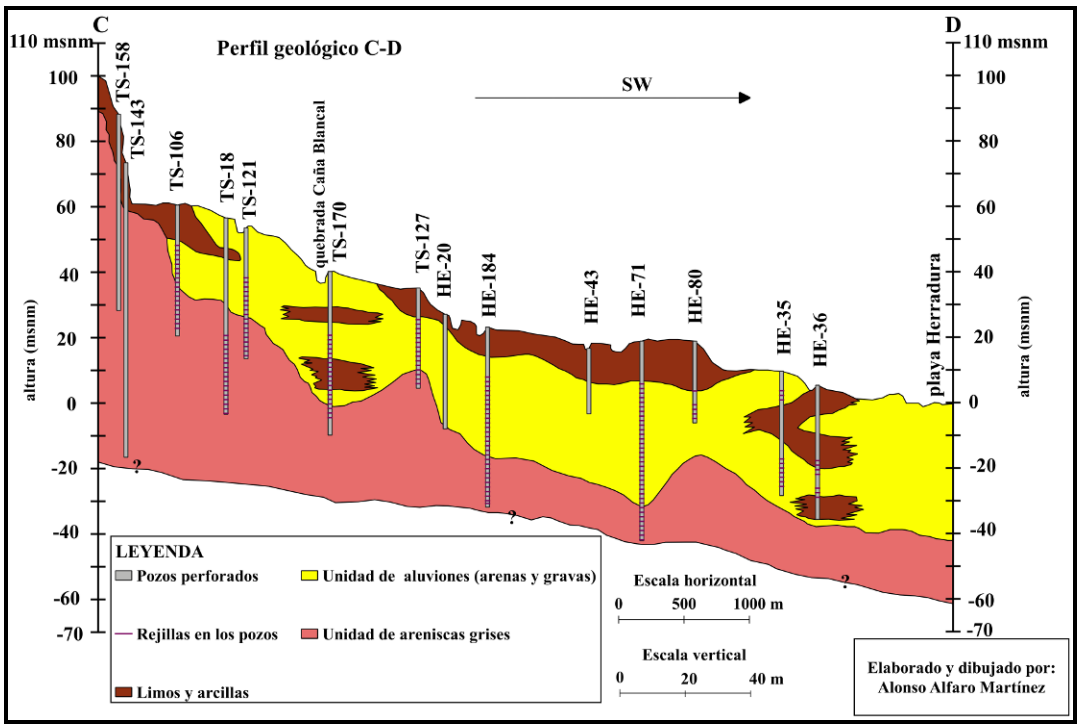


Figura 17 Perfil geológico C – D

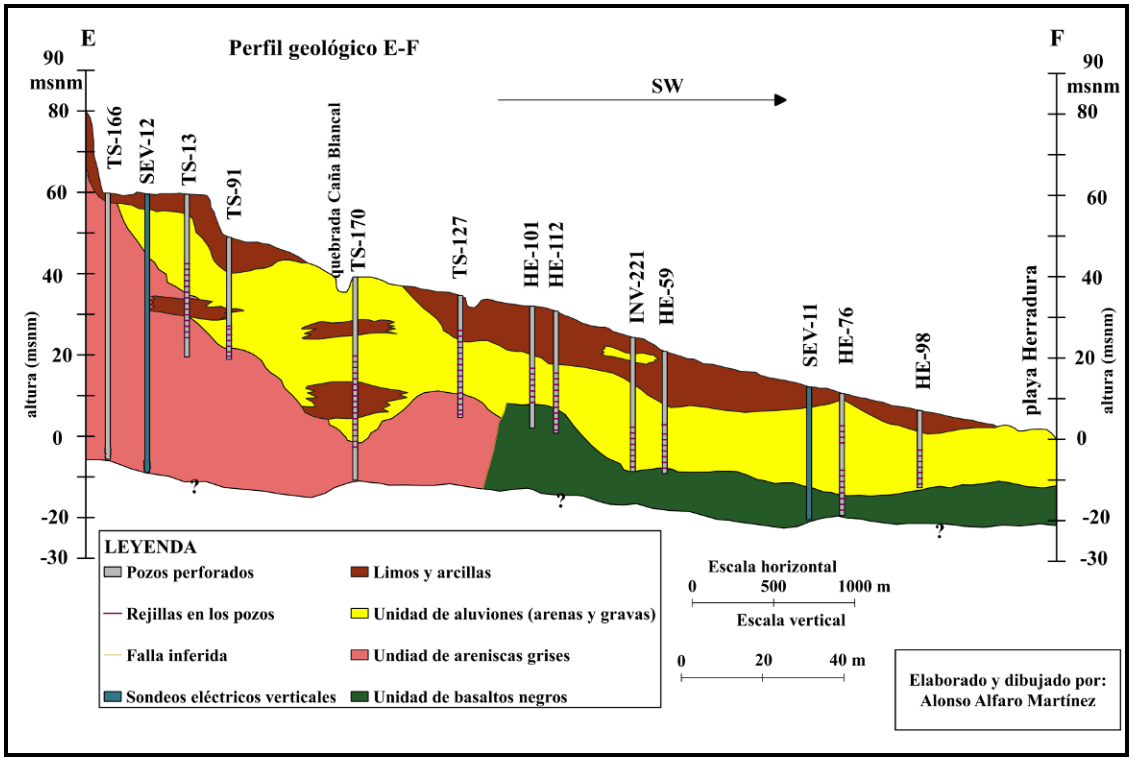


Figura 18 Perfil geológico E – F

Las Areniscas grises están sobreyacidas por depósitos cuaternarios aluviales y con base en la correlación de la geología local y los pozos perforados de la base de datos del SENARA se infiere una falla local en el sector de Herradura, lo que provoca un contacto lateral con la unidad de basaltos negros como se ilustra en los perfiles geológicos de la figura 16 a la figura 18.

Esta unidad de rocas que se ha descrito a nivel local se correlaciona regionalmente con el Miembro Roca Carballo de la formación Punta Carballo y según Denyer et al. (2003) las rocas sedimentarias tienen edades entre el Mioceno Inferior hasta Mioceno Medio Mioceno.

Figura 19 Afloramiento de la unidad de Areniscas grises sobre la carretera costanera, ruta nacional 34 (coordenadas 428539/1071252)

Figura 20 Afloramiento de la Unidad de Areniscas grises meteorizadas y fracturadas, sobre el camino en la cuesta Chiquero hacia Herradura (coordenadas 428539/1071252)

4.5.3 Unidad de aluviones (arenas y gravas)

Estos depósitos cuaternarios de origen fluvial se localizan en las partes planas de los sectores de Herradura y Jacó, están conformados por intercalaciones de capas finas de arcillas y limos; con arenas medias a gruesas y gravas que conforman aluviones inconsolidados, estos materiales son el producto de la erosión, transporte y depositación de las rocas sedimentarias y volcánicas que conforman los cerros y filas que circundan la zona de estudio, se describen a continuación los materiales que conforman cada zona en las partes bajas de las microcuencas.

Microcuenca de la quebrada Cañablancal – sector de Herradura

Estos materiales inconsolidados cubren un área de 4 km^2 para un 5 % de cobertura en la zona de estudio, en la parte superior de los Aluviones en Herradura se presenta de manera discontinua una capa de arcillas con un espesor que oscila 0,50 y los 9,67 metros, para un definir un promedio entre los 4,50 a 5 metros, eso se observa en los perfiles geológicos de la Figura 16, la Figura 17 y la Figura 18.

A nivel superficial en el cauce la quebrada Cañablancal al norte del poblado de Herradura se observó, a nivel superficial una secuencia de tres metros de espesor arenas y gravas con estratificación decimétrica de unos 25 a 30 cm de espesor (Figura 21), los clastos y bloques son principalmente de areniscas sanas y meteorizadas, son bloques de formas angulares y de baja esfericidad representando poco desgaste, con tamaños centimétricos a decimétricos.

Los depósitos aluviales no están consolidados y los clastos no están imbricados, estas gravas y arenas están mal seleccionados como consecuencia del bajo grado de transporte desde la fuente erosionada en los cerros cercanos como los cerros Chiquero y Herradura, (Figura 13).

El contacto de los clastos en los Aluviones es por una matriz, la cual tiene una textura arenosa de color café y de una granulometría media a gruesa que no está cementada debido al bajo contenido de finos.

Las capas de arena son de color rojizo de textura media a gruesa, tienen espesores entre 10 a 15 cm, no están cementadas al igual que las arenas de la matriz de las capas de grava. De acuerdo a la correlación de los pozos perforados y los sondeos de geofísica se identifican intercalaciones de lentes de arcillas y limos con espesores de entre 4 y 16 metros, como se observa en de la Figura 16, la Figura 17 y la Figura 18

Con base en el análisis y la correlación de los afloramientos cartografiados en el campo, los treinta y dos pozos perforados y dos sondeos eléctricos verticales se ha determinado un espesor para las capas de arenas y gravas de los depósitos aluviales en la microcuenca de la quebrada Cañablancal que oscila entre 8,56 a 53 metros para un promedio de 32,94 metros.

Microcuencas de las quebradas Mona y Bonita

Los depósitos cuaternarios acumulados en las microcuencas de la quebrada Mona, la quebrada Bonita y el río Naranjal cubren un área de 9,41 km^2 para un 13% del total del área de estudio. En el cauce superior de la quebrada la Mona se observó una secuencia de dos metros de espesor arenas y gravas con muy poca estratificación, más bien son depósitos aluviales caóticos y mal seleccionados como consecuencia del bajo grado de transporte desde la fuente erosionada en los cerros muy cercanos con rocas basálticas del Complejo de Nicoya.

Los clastos de las gravas están compuestos principalmente por fragmentos de basaltos sanos con vetillas de cuarzo color blanco, con tamaños centimétricos a decimétricos, las clastos tienen baja redondez y baja esfericidad; la matriz tiene una textura arenosa de color café y los depósitos no tienen ningún grado de cementación.

Microcuenca del río Naranjal – sector de Jacó

Para los Aluviones del sector de Jacó en la parte superior se tiene una capa de arcillas con un espesor que oscila 0,50 y los 10 metros, para un definir un promedio entre los 4,5 a 5 metros, eso se observa en los perfiles geológicos de la Figura 23 a la Figura 27.

En el sector de las planicies aluviales de los ríos Copey y Naranjal los estratos de las gravas y las arenas tienen espesores decimétricos entre 60 a 70 cm, las gravas están conformadas por clastos de basaltos, jaspes y calizas principalmente, hay bloques con tamaños centimétricos hasta de 10 a 15 cm, son muy angulares, de baja esfericidad y están englobados en una matriz arenosa que no está cementada.

Los fragmentos de roca de las gravas no están imbricados lo que evidencia una rápida depositación y un bajo transporte de los materiales del Complejo de Nicoya erosionados de los cerros de la fila Chiclera y la fila Negra principalmente (Figura 13).

De acuerdo a la correlación de los afloramientos, los sondeos eléctricos verticales y los pozos se construyeron los perfiles geológicos que están plasmados de la Figura 23 a la Figura 27, en donde el espesor definido para las gravas y arenas en este sector esté entre los 4 metros en los sectores cercanos al contacto con el Complejo de Nicoya (pie de monte) hasta los 56 metros en la parte central del sector de Jacó; por lo que tiene un promedio de 24 metros.

Esta unidad geológica está subyacida por medio de un contacto neto pero irregular por la Unidad de basaltos negros del Complejo de Nicoya, principalmente por la capa de roca meteorizada de los basaltos y arcillas de los aluviones.

Figura 21 Afloramiento de las arenas y gravas aluviales en la quebrada Cañablancal, sector de Herradura (coordenadas 430283/1070435)

Figura 22 Afloramiento de las arenas y gravas aluviales en el río Copey, sector NE de Jacó (coordenadas 432804/1062449)

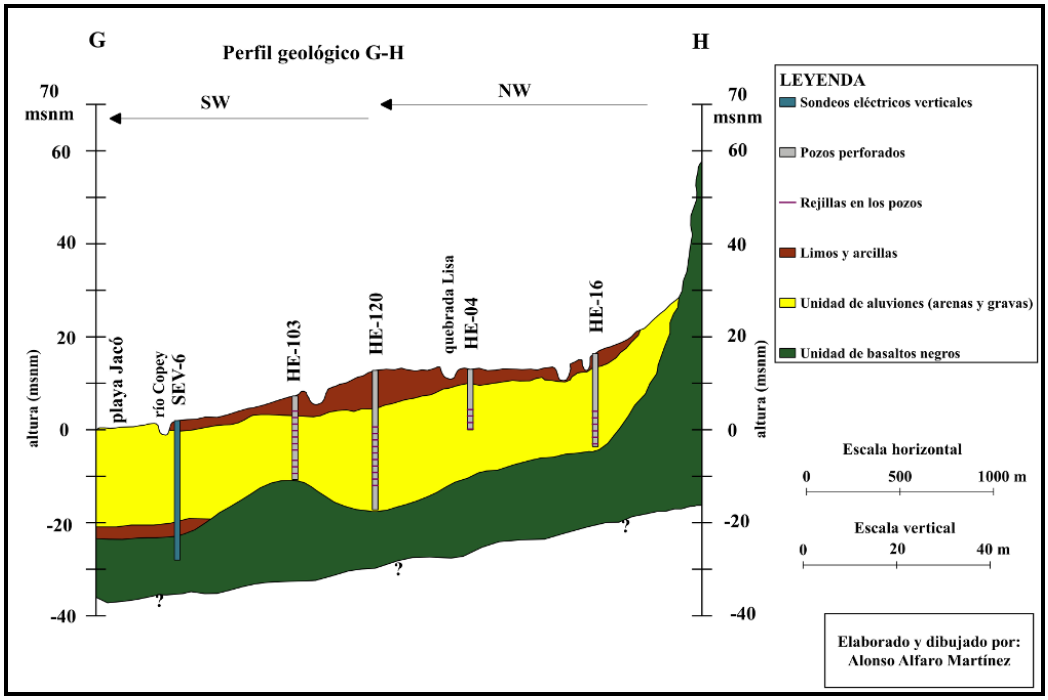


Figura 23 Perfil geológico G – H

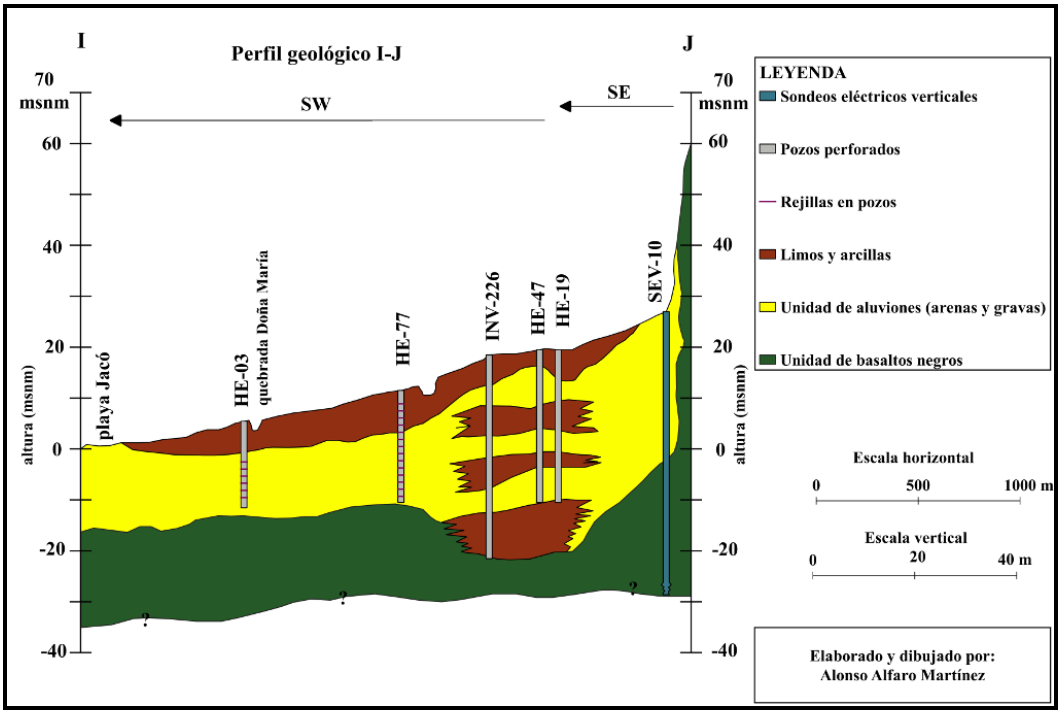


Figura 24 Perfil geológico I – J

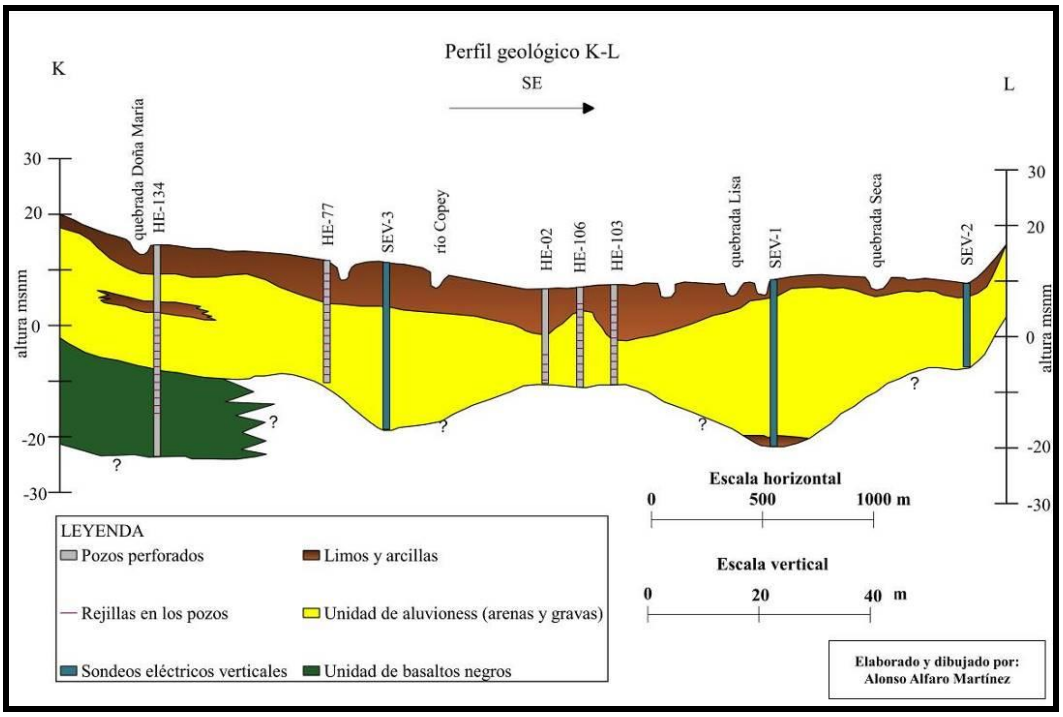


Figura 25 Perfil geológico K – L

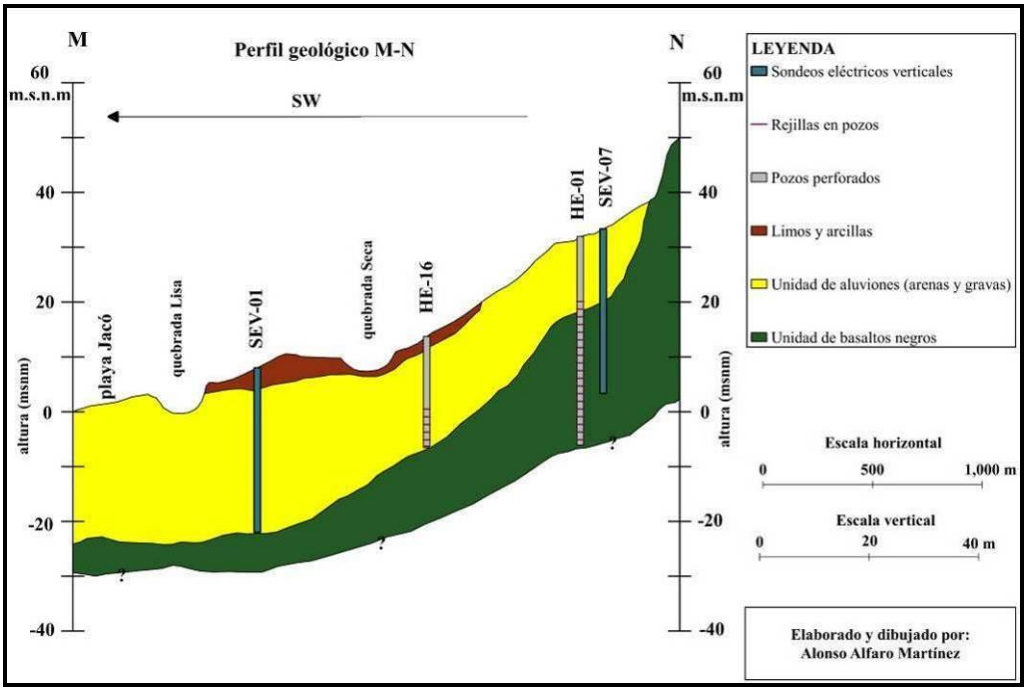


Figura 26 Perfil geológico M – N

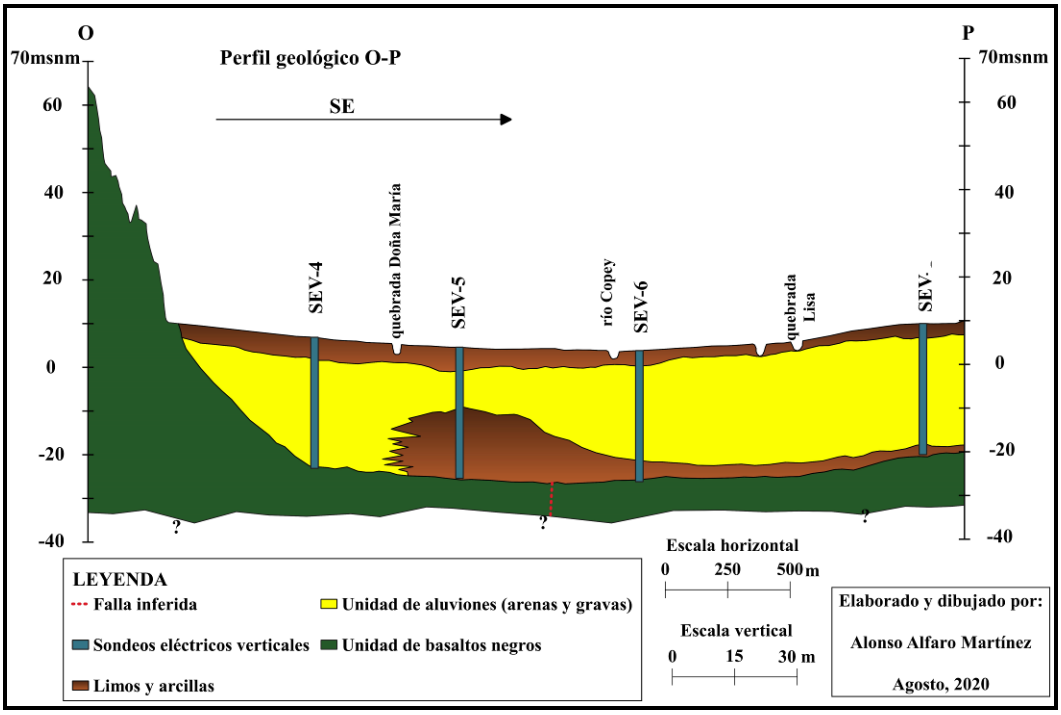


Figura 27 Perfil geológico O – P

5 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se describen a continuación aspectos para desarrollar la caracterización hidrológica y climática de la zona de estudio, con insumos que son fundamentales para el cálculo del balance hídrico y el cálculo dela recarga potencial de agua subterránea hacia los acuíferos subyacentes.

5.1 Subcuencas hidrográficas

La zona de estudio es drenada superficialmente por seis subcuencas o microcuencas costeras de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, en la siguiente tabla se muestra la información básica de cada microcuenca y en la Figura 28 se delimita la ubicación de cada una en el área de estudio.

Tabla 1 Subcuencas hidrográficas en la zona de estudio

VERTIENTE	GRAN CUENCA	SUB-CUENCA	ÁREA km^2
Pacífico	Costero Pacífico Central	Quebrada Cañablancal	22,08
Pacífico	Costero Pacífico Central	Quebrada Bonita	14,22
Pacífico	Costero Pacífico Central	Quebrada Doña María	3,19
Pacífico	Costero Pacífico Central	Río Naranjal	30,29
Pacífico	Costero Pacífico Central	Quebrada Playa Balsal	0,70
Pacífico	Costero Pacífico Central	Quebrada Playa Herradura Sur	0,39

Fuente: ITEC (2014)

5.2 Precipitación y temperatura

Para la zona de estudio y alrededores el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) cuenta con tres estaciones meteorológicas que son: Punta Leona (86007), Jacó (86009), Muelle Herradura (86013); por otra parte el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) tiene instalada la estación meteorológica y Piedra Bruja (250103).

Las estaciones Jacó y Punta Leona tienen solo información de la precipitación con 30 y 23 años de registro respectivamente, por otra parte las estaciones Piedra Bruja y Muelle tiene solo 5 años de registro de información de precipitación y el promedio de la temperatura media a nivel mensual, pero con tan solo un registro de información de 5 años, la información básica de cada estación se muestra en la Tabla 2 y su localización se muestra en la Figura 28.

Tabla 2 Información básica de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio

NÚMERO	ESTACIÓN	LONGITUD (X)	LATITUD (Y)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PERIODO	ELEMENTOS
86007	Punta Leona	427731	1072789	20	1990 - 2018	Lluvia promedio mensual (mm/mes)
86009	Jacó	431977	1061107	3	1997 - 2018	Lluvia promedio mensual (mm/mes)
250103	Piedra Bruja	434614	1068076	118	2015 - 2019	Lluvia promedio mensual (mm/mes), Temperatura media mensual
86013	Muelle Herradura	426745	1067384	6	2015 - 2020	Lluvia promedio (mm/mes), Temperatura media mensual

Fuente: IMN, 2020 y AyA (2020).

Los datos de las precipitaciones promedio para cada estación se encuentran en la siguiente tabla, así como el dato del promedio ponderado mensual con base en todas las estaciones, el cual será utilizado para calcular el la recarga potencial por medio del balance de humedad de suelos en las microcuencas de la zona de estudio; la distribución de la precipitación promedio mensual durante el año para cada estación se encuentra en el gráfico de la Figura 29; por otra parte los datos completos de cada estación se adjuntan en el Anexo 2.

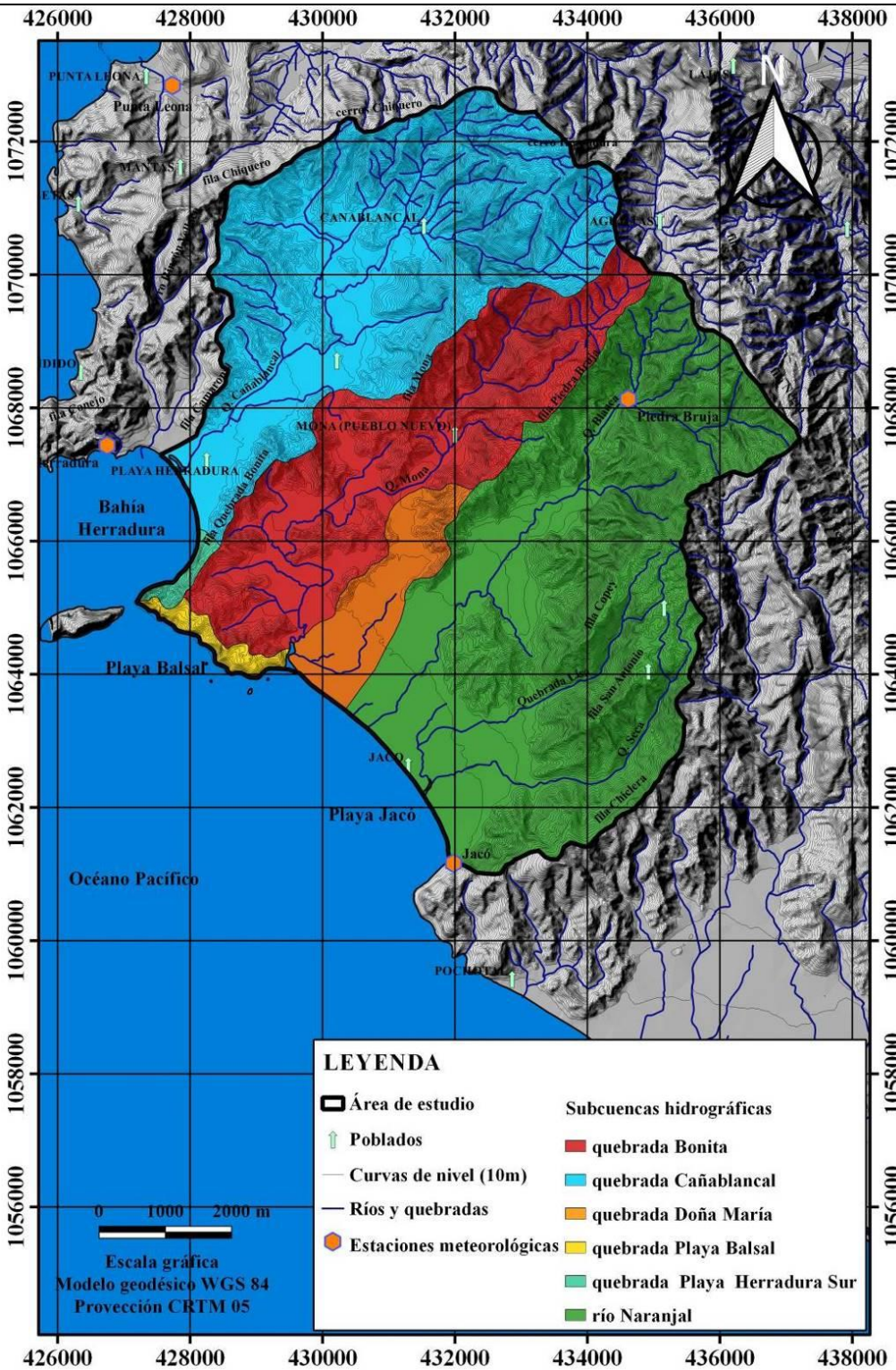


Figura 28 Mapa de subcuencas hidrográficas y estaciones meteorológicas
Fuente: IMN (2020) y AyA (2020)
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

Tabla 3 Datos de la precipitación promedio mensual en milímetros por mes de las estaciones meteorológicas Punta Leona, Jacó, Piedra Bruja y Muelle Herradura

ESTACIÓN/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Punta Leona	35,62	25,25	12,13	80,82	260,70	273,04	278,39	302,30	326,61	444,71	214,47	65,25
Jacó	28,16	28,05	28,22	86,09	350,42	370,42	341,87	373,30	456,90	609,36	246,86	88,72
Piedra Bruja	29,38	2,00	14,95	120,23	322,60	285,20	281,36	318,25	348,62	582,80	273,26	95,86
Muelle Herradura	40,40	0,05	5,35	70,85	232,45	248,20	301,28	400,50	441,05	630,85	224,00	72,08
Promedio ponderado	32,71	23,13	17,94	84,74	296,73	307,58	303,61	336,56	384,10	528,93	231,72	76,79

Fuente: IMN, (2020) y AyA (2020)

De la tabla anterior se tiene una precipitación promedio anual de 2624,54 mm para la zona de estudio en la zona de Herradura y Jacó, lo cual se puede visualizar en el gráfico de la Figura 29.

Por otra parte la estación meteorológica Damas (90009) se encuentra en la zona de Quepos a unos 45 km de distancia hacia el SE del área de estudio, sin embargo es la más cercana que cuenta con información de temperatura en el período que abarca los años del 1984 al 2017, la información del promedio mensual de la temperatura media es un insumo fundamental para el cálculo de la evapotranspiración potencial como se indica en la Tabla 4:

Tabla 4 Datos climáticos de la estación meteorológica Damas (90009)

ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
LLUVIA PROM. (mm/mes)	60,00	28,20	40,30	160,40	423,50	414,60	440,50	491,00	521,60	619,30	392,70	158,40
T.MAX. (°C)	31,30	32,00	32,50	32,30	31,30	30,90	30,70	30,60	30,40	30,10	29,90	30,60
T.MIN. (°C)	21,80	22,00	22,70	23,40	23,40	23,20	22,90	22,80	22,70	22,80	22,80	22,50
T.MED (°C)	26,55	27,00	27,60	27,85	27,35	27,05	26,80	26,70	26,55	26,45	26,35	26,55

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2020)

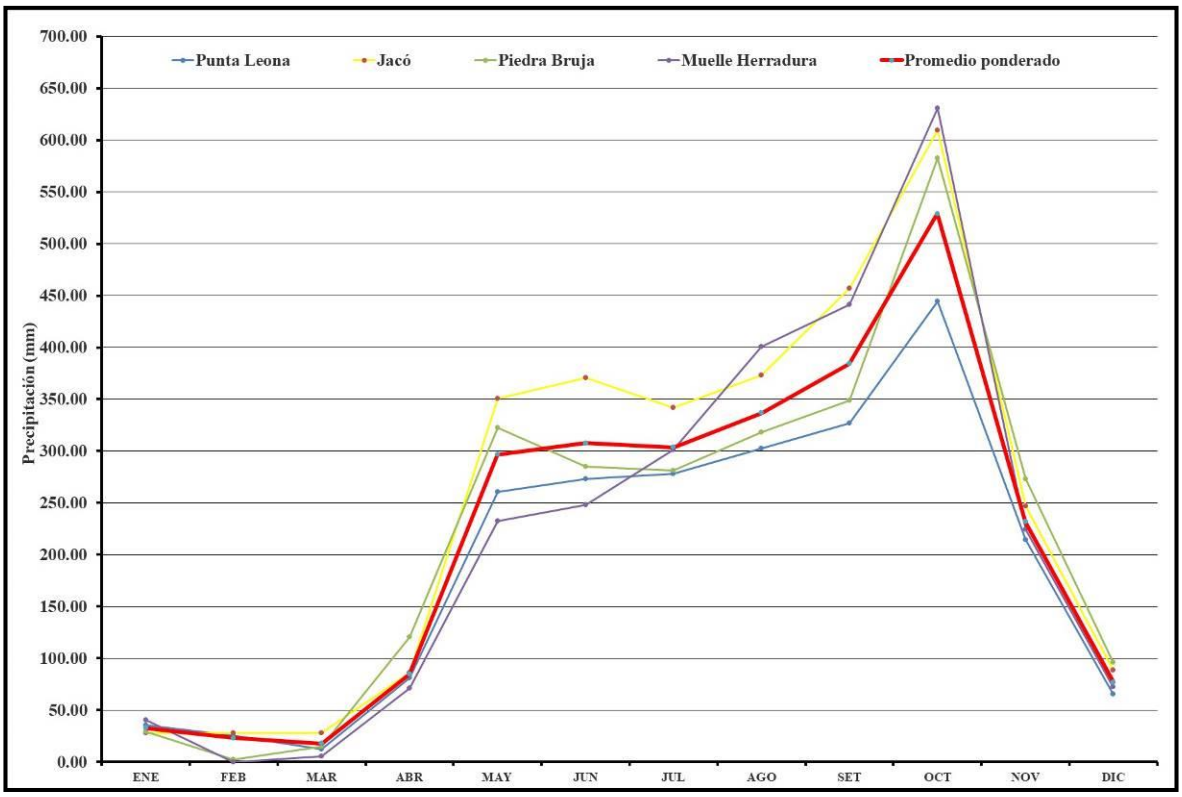


Figura 29 Gráfico de la distribución de la precipitación promedio mensual de las estaciones Punta Leona, Jacó, Piedra Bruja y Muelle Herradura

5.3 Evapotranspiración potencial

El agua líquida es evaporada hacia el aire siempre que exista un gradiente de presión de vapor entre la superficie del terreno y la atmósfera. La evaporación puede ocurrir sobre las superficies del terreno como el suelo, cuerpos de agua, quebradas, paquetes de nieve y vegetación.

Si la superficie activa de evaporación son las hojas (a través de las estomas o las cutículas) o los troncos (a través de las lenticelas) y en el tanto el agua es absorbida y conducida a través del sistema radicular, el proceso se llamada transpiración.

Debido a que la separación de evaporación y transpiración es compleja en una cuenca o un área con una cobertura vegetal significativa, la evapotranspiración es un término colectivo usado para describir la pérdida total de agua al aire en estado de vapor. Por lo tanto la evapotranspiración es una parte negativa en el balance hidrológico de una cuenca. Por 1 cm de agua que se pierde hacia el aire requiere de 600 cal/cm^2 de energía. Y por ello es representada como un sumidero de energía en el ambiente (traducido de: Chang, 2013).

La definición de *evapotranspiración potencial* fue introducida por Thornthwaite y se define como la pérdida total del agua, que ocurría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo, para el uso de la vegetación (Villón, 2002). Para el cálculo de la evapotranspiración potencial en el área de estudio se utilizará el método empírico de Thornthwaite, para esto el insumo será los datos de la temperatura media de la estación meteorológica Damas y las horas promedio mensuales de sol para la latitud en que se ubica la estación meteorológica Damas, la metodología a desarrollar es la siguiente:

Se debe calcular la evapotranspiración mensual e, en mm por mes de 30 días de 12 horas de duración con la siguiente ecuación:

$$e = 16(10\ t/I)^a$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual en mm por mes de 30 días y 12 horas de duración.

t= temperatura media mensual en °C.

$I = \Sigma\ i =$ índice térmico anual.

$i = (t/5)^{1,514}$ i= índice térmico mensual.

$a= 0,6751x10^{-6}\ I^3 - 0,771x10^{-4}\ I^2 + 0,01792\ I + 0,49239$; a= exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad.

Se debe de corregir el valor de e, de acuerdo con el mes considerando la latitud de la localidad que determinan las horas de sol, cuyos valores se obtienen de la Tabla 5 y por medio de la siguiente ecuación:

$$e_c = e \times f$$

Donde:

e_c = evapotranspiración mensual corregida, en mm.

e = evapotranspiración mensual sin corregir en mm.

f = factor de corrección.

En la siguiente tabla se tienen los valores de la evapotranspiración potencial utilizando la metodología de Thornthwaite para la estación Damas, la distribución anual de la evapotranspiración potencial y la distribución por cada mes de la temperatura media mensual se muestra en el gráfico la Figura 30.

Tabla 5 Evapotranspiración potencial mensual (ETP) y temperatura media mensual de la estación meteorológica Damas (90009)

ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
T.MAX. (°C)	31,30	32,00	32,50	32,30	31,30	30,90	30,70	30,60	30,40	30,10	29,90	30,60
T.MIN. (°C)	21,80	22,00	22,70	23,40	23,40	23,20	22,90	22,80	22,70	22,80	22,80	22,50
T.MED (°C)	26,55	27,00	27,60	27,85	27,35	27,05	26,80	26,70	26,55	26,45	26,35	26,55
ETP (mm)	**123,88**	**122,55**	**150,67**	**155,87**	**152,66**	**143,74**	**141,42**	**138,16**	**128,94**	**127,12**	**120,40**	**125,14**

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2020)

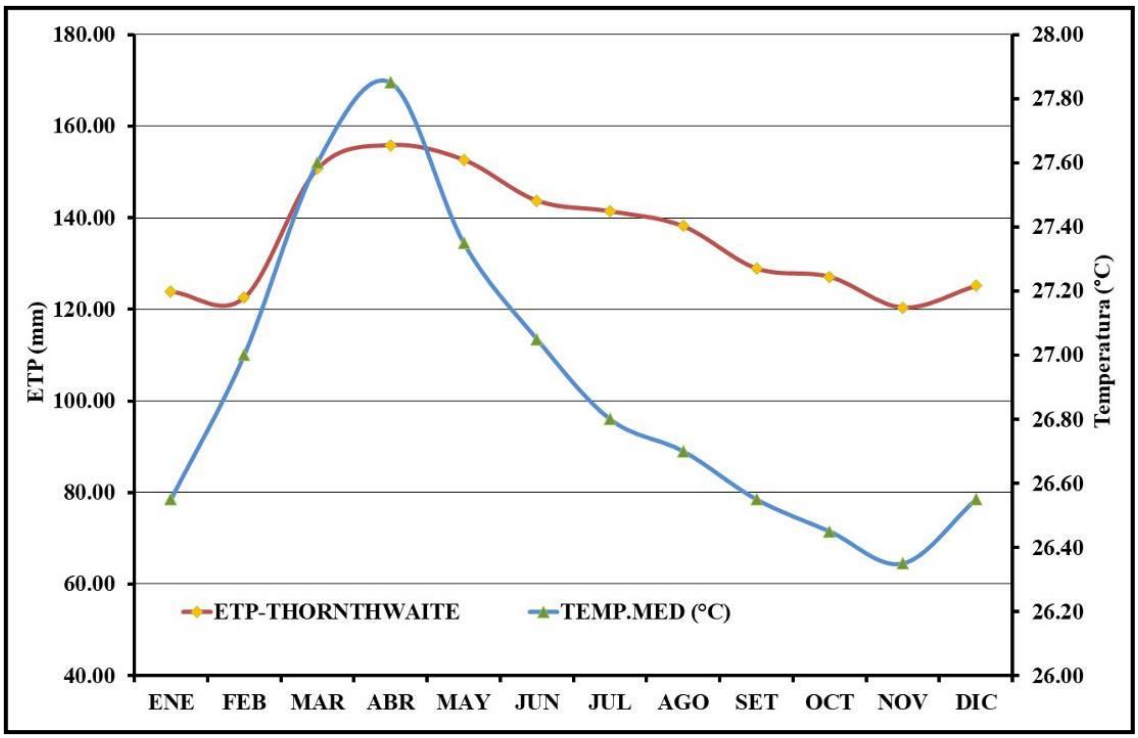


Figura 30 Gráfico de la evapotranspiración potencial y la temperatura media mensual para la estación Damas, Quepos

5.4 Uso del suelo

Utilizando las ortofotos del año 2017 del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) se definieron los usos de suelo y se digitalizaron en el sistema de información geográfico QGIS, luego se hizo una comprobación de campo para construir el mapa de uso de suelo (Figura 31) para la zona de estudio, las unidades definidas están en la siguiente tabla, así como su porcentaje de cobertura en la zona de estudio:

Tabla 6 Usos de suelo en la zona de estudio, sector Heradura y Jacó

USO DE SUELO	ÁREA (km^2)	PORCENTAJE
Bosque	49,16	69,43%
Cultivos	0,94	1,32%
Cobertura con zacate menos del 50%	4,50	6,36%
Playa	0,29	0,41%
Urbano	4,05	5,72%
Cobertura con zacate más del 50%	11,87	16,76%
TOTAL	**70,81**	**100,00%**

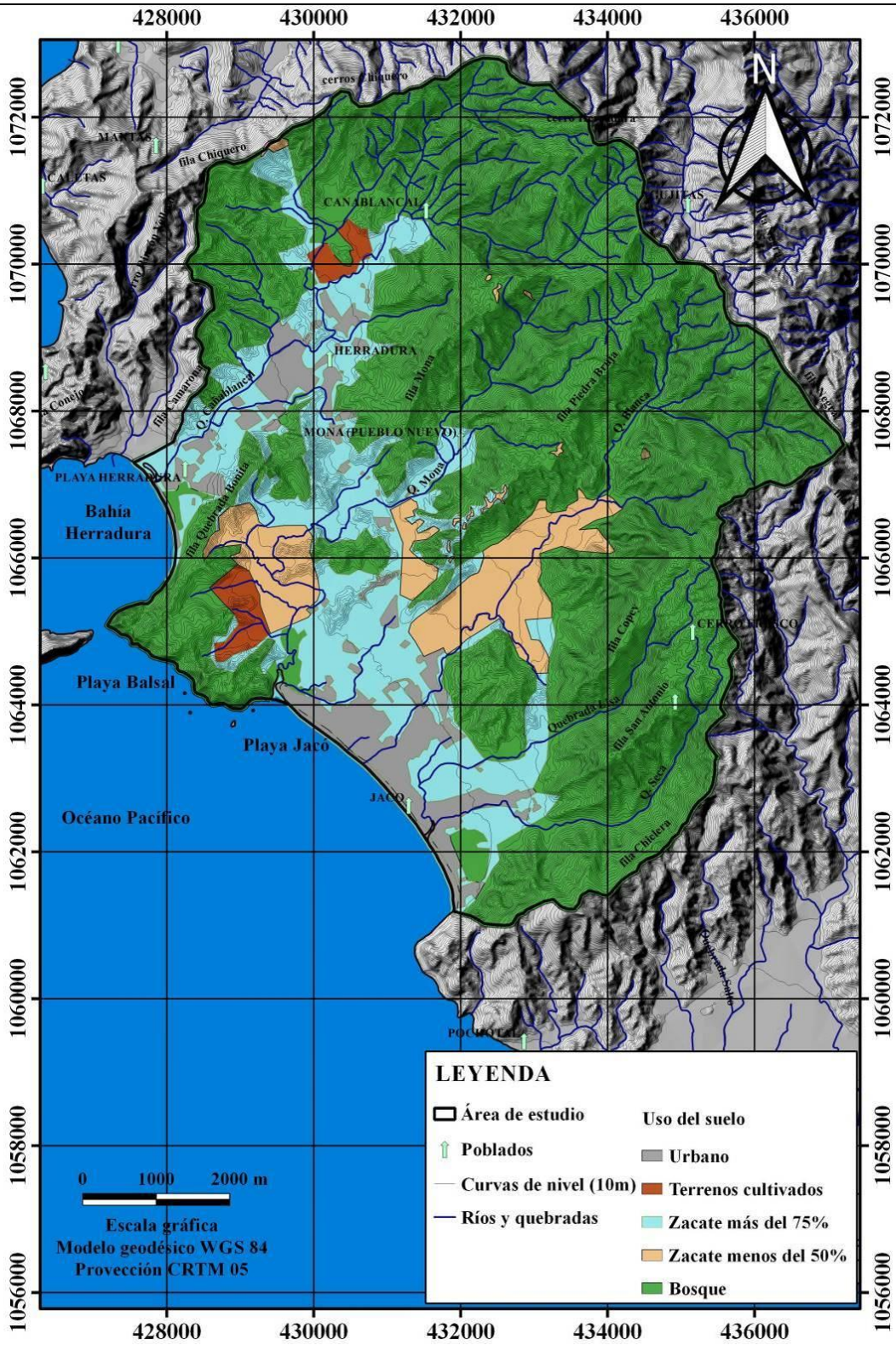


Figura 31 Mapa de uso del suelo
Fuente: SNIT (2020) y trabajo de campo (2020)
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

5.5 Aforos diferenciales en ríos y quebradas

Los aforos diferenciales se hicieron durante el mes de mayo del 2020; sobre los cauces de las principales quebradas y ríos utilizando el molinete marca GURLEY Modelos 622 y 625; se levantaron y midieron 25 puntos para poder determinar la relación de los cauces superficiales con respecto al comportamiento hidráulico con los acuíferos Herradura y Jacó.

Los datos de los puntos de aforo están siguiente tabla; por otra parte la ubicación de los puntos de aforo y el comportamiento de los ríos están en la Figura 32 y la Figura 33.

Tabla 7 Sitios de aforo en la zona de estudio

AFORO	FECHA	X	Y	Z	Q (l/s)	OBSERVACIONES
AF-01	05/05/2020	430322	1070442	50,00	0,00	Quebrada afluente a la Cañablancal seca
AF-02	05/05/2020	430654	1069933	50,00	18,17	Quebrada Cañablancal
AF-03	05/05/2020	431157	1070444	63,52	26,68	Quebrada Cañablancal
AF-04	05/05/2020	430973	1070388	60,00	13,27	Quebrada Cañablancal
AF-05	05/05/2020	430789	1070135	50,00	20,80	Quebrada Cañablancal
AF-06	05/05/2020	430212	1069757	40,00	1,39	Quebrada Cañablancal
AF-07	05/05/2020	430205	1069747	40,00	0,00	Se resume la quebrada Cañablancal
AF-08	05/05/2020	429844	1068922	26,37	0,00	Quebrada Cañablancal seca
AF-09	05/05/2020	429568	1068852	20,00	0,00	Quebrada Cañablancal seca
AF-10	05/05/2020	428740	1067766	10,00	0,00	Afluente seco de la quebrada Cañablancal
AF-11	05/05/2020	428134	1067438	5,00	ND	Puente en los Sueños, influencia de la marea
AF-12	05/05/2020	429115	1068425	19,36	0,00	Quebrada Cañablancal seca
AF-13	05/05/2020	428727	1068096	17,25	0,00	Inicia efluencia de la quebrada Cañablancal
AF-14	05/05/2020	428560	1067783	10,00	17,10	Quebrada Cañablancal
AF-15	05/05/2020	433880	1066749	60,00	77,97	Río Copey
AF-16	05/05/2020	433199	1066286	40,00	53,06	Río Copey
AF-17	05/05/2020	432933	1065923	35,83	3,40	Río Copey
AF-18	05/05/2020	432654	1065573	25,00	0,00	Se sumerge el río Copey
AF-19	06/05/2020	432012	1064822	20,00	0,00	Inicia efluencia del río Copey
AF-20	06/05/2020	431952	1064747	20,00	13,50	Río Copey

AF-21	06/05/2020	431691	1064185	10,00	218,90	Río Copey cerca del puente de la costanera
AF-22	19/03/2020	432533	1062618	12,57	0,00	Río Naranjal
AF-23	19/03/2020	432804	1062449	18,35	0,00	Quebrada Seca
AF-24	19/03/2020	432809	1062716	17,82	0,00	Río Naranjal
AF-25	30/4/2020	429958	1070387	50,00	0,00	Afluente seco de la quebrada Cañablancal

Fuente: Elaboración propia, con base en el trabajo de campo 2020.

En la quebrada Cañablancal se tiene un sector de influencia y efluencia en la parte media- alta de la cuenca, específicamente entre los 60 y 40 metros de elevación sobre el nivel del mar y por un tramo aproximado de 1,30 km; en el punto con las coordenadas 430205E/ 1069747N la quebrada pierde por completo el flujo superficial. Esta quebrada se mantiene sin agua hasta la coordenada 428727E/1068096N en donde inicia el flujo (efluencia) hasta la desembocadura en el sector de la playa Herradura (Figura 32).

En el río Copey se tiene un sector muy importante de influencia de aproximadamente 2 km sobre los depósitos aluviales en la zona NE de Jacó desde la coordenada 433880E/1066755N, hasta que en el sitio con la coordenada 432654E/1065573N el río pierde por completo su caudal como se observa en la Figura 33. En la coordenada 432012E/1064822N el río Copey inicia la efluencia hasta la desembocadura en playa Jacó; así mismo también se tiene que a partir de este sector empieza la zona urbana de Jacó y se depositan aguas residuales, principalmente servidas en el cauce.

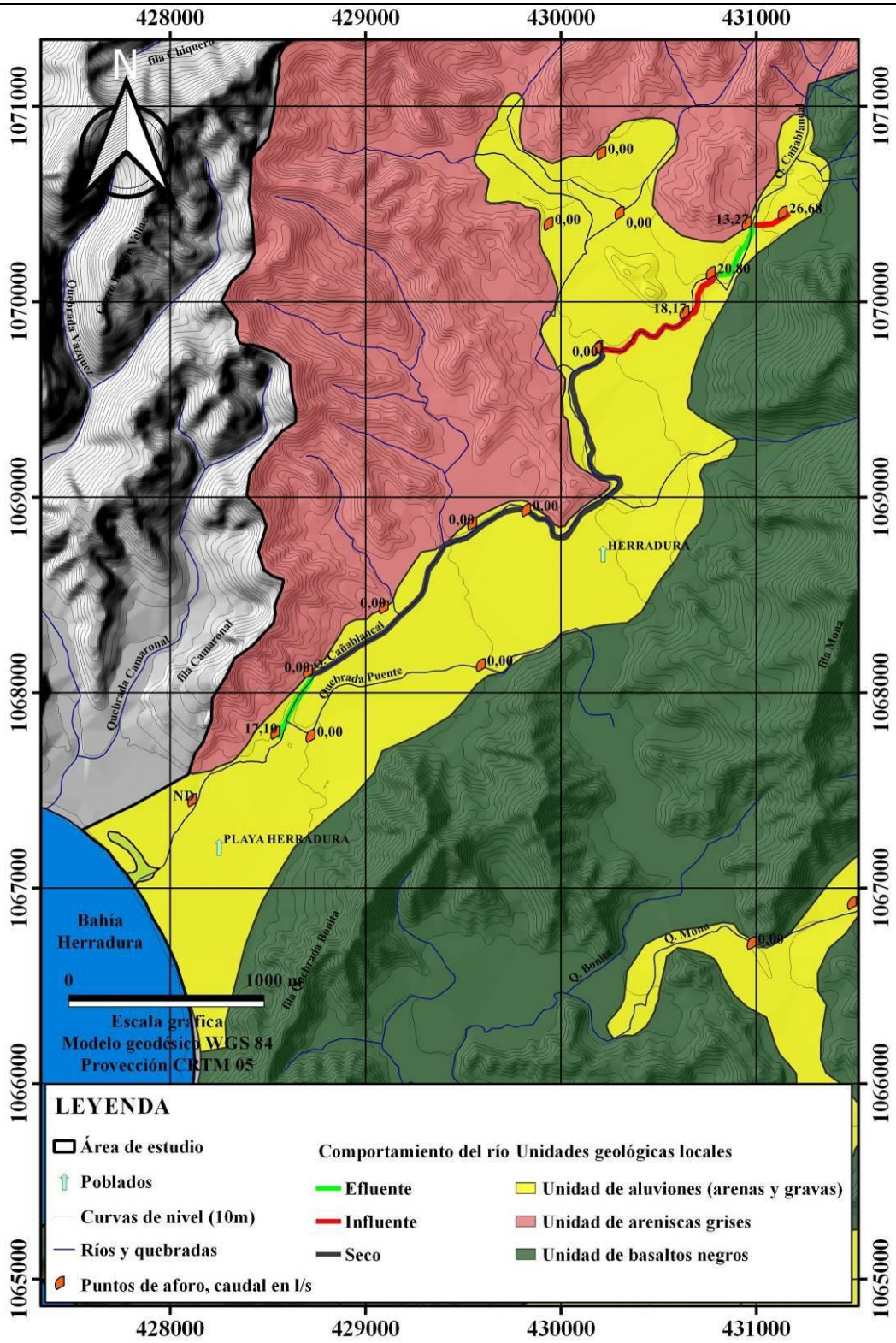


Figura 32 Mapa de aforos diferenciales en la subcuenca de la quebrada Cañablancal

Fuente: Trabajo de campo (2020) - Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

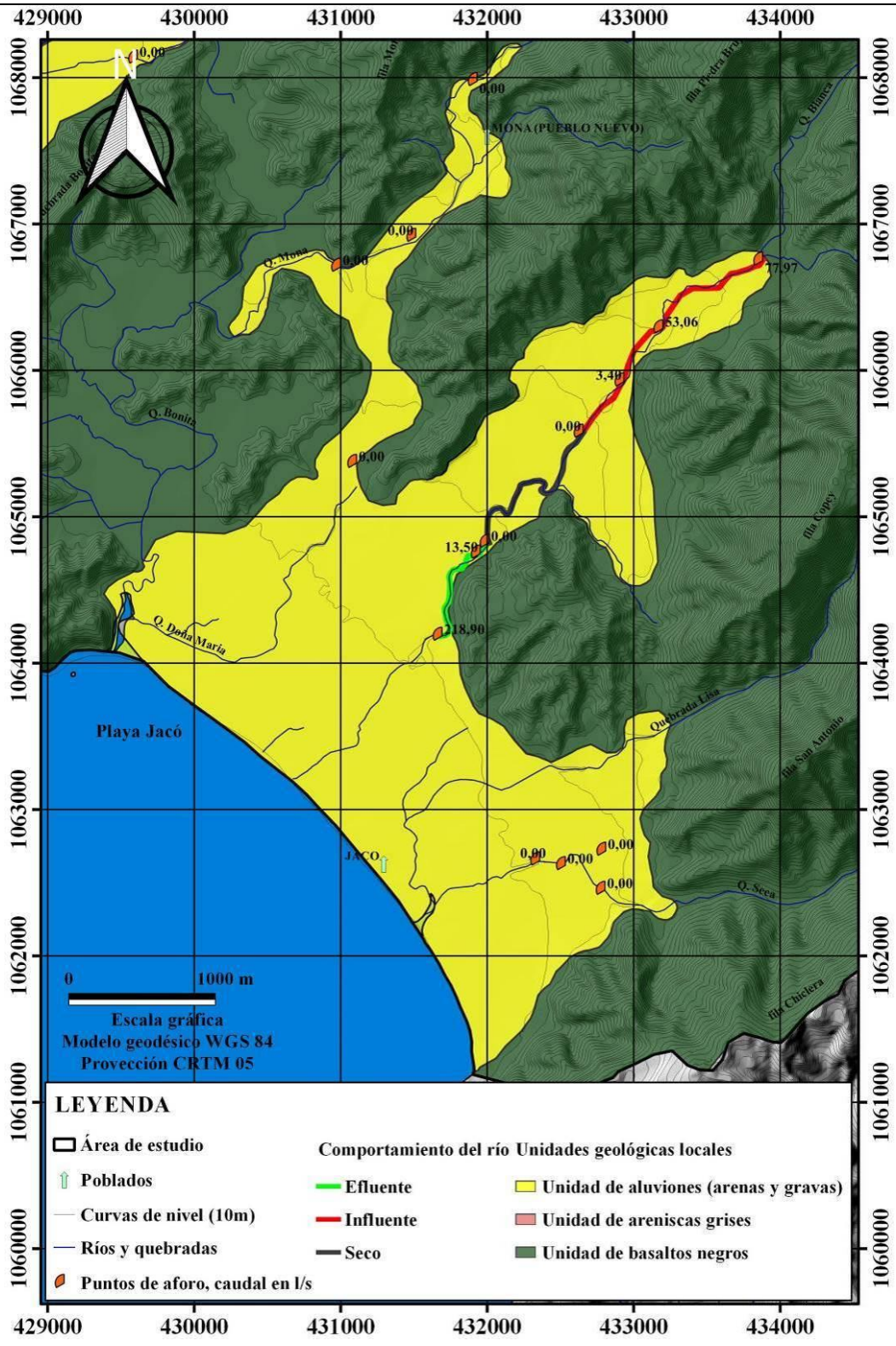


Figura 33 Mapa de aforos diferenciales en la subcuenca del río Naranjal
Fuente: Trabajo de campo (2020) - Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

5.6 Sondeos eléctricos verticales (SEVs)

Se tiene el registro de catorce sondeos eléctricos verticales que se han realizado en la zona de estudio seis fueron hechos por Arias y Morera (2002) y siete por una contratación de servicios profesionales externos que hizo el SENARA durante el año 2015, en la siguiente tabla se muestra la información de los sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio:

Tabla 8 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) en la zona de estudio

SONDEO	CÓDIGO	X (LONG)	Y (LAT)	Z (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD DEL SONDEO (m)	FUENTE
SEV1	SEV1	432004	1062746	8,94	30,00	Arias y Morera (2000)
SEV2	SEV2	432229	1061903	7,58	15,00	Arias y Morera (2000)
SEV3	SEV3	431466	1064276	12,43	30,00	Arias y Morera (2000)
SEV4	SEV4	430287	1064351	5,98	30,00	Arias y Morera (2000)
SEV5	SEV5	430510	1063815	3,57	30,00	Arias y Morera (2000)
SEV6	SEV6	431040	1063327	3,31	30,00	Arias y Morera (2000)
SEV7	SEV7	433063	1063419	33,25	30,00	Arias y Morera (2000)
SEV8	GT-PFC-05	433123	1061309	250,00	150,00	SENARA (2015)
SEV9	GT-PFC-12	432233	1063048	14,00	150,00	SENARA (2015)
SEV10	GT-PFC-13	431776	1065355	28,00	150,00	SENARA (2015)
SEV11	GT-PFC-14	429113	1067740	18,00	150,00	SENARA (2015)
SEV12	GT-PFC-15	429750	1070783	56,00	150,00	SENARA (2015)
SEV13	GT-PFC-16	434705	1068224	128,00	150,00	SENARA (2015)
SEV14	GT-PFC-17	435248	1064607	412,00	150,00	SENARA (2015)

Para los siete primeros sondeos (SEV1 al SEV7 en la Tabla 8) realizados por Arias y Morera en el año 2000 para el SENARA en el sector de Jacó, se interpretaron los resultados y se definieron en profundidad las siguientes capas geoléctricas:

Capa Geoléctrica No. l: Los valores de la resistividad son menores a 30 ohmnio-m, con espesores variables ente 1os 1 y 5 m. Se asocia con la capa superficial de suelo y se caracteriza por ser arenas finas saturadas que representan el manto acuífero más superficial, el cual ha sido captado por 1a mayoría de los pozos excavados. En el panel de correlación se observan tres anomalías de resistividad menores a los 15 ohmnio-m, que se han asociado con lentes arenosos saturados y que podrían corresponder con las mejores capas acuíferas (Arias y Morera, 1997).

Capa Geoléctrica No. 2: Los valores de resistividad se encuentran entre 30 y 50 ohmnio-m, se han asociado con arenas de granulometría media, con a1gún contenido variable de saturación y con espesor fluctuante entre los l y 12 m (Arias y Morera, 1997).

Capa Geoléctrica No.3: Los valores de resistividad se encuentran entre 50 y 70 ohmnio-m y corresponden con arenas gruesas con algún porcentaje importante de arcillas, su espesor es muy variable y su potencial acuífero es medio (Arias y Morera, 1997).

Capa Geoléctrica No.4: Los valores de la resistividad se encuentran entre l0 y 100 ohmnio-m, se interpretan como arenas medias, secas y arcillosas, su potencial acuífero es bajo (Arias y Morera, 1997).

Capa GeoléctricaNo.5: Los valores de resistividad son mayores a 100 ohmnio-m y se han asociado al basamento resistivo de la zona, se asociaría con los materiales basálticos Arias y Morera, 1997).

En el modelaje del Sondeo Eléctrico vertical número 3 (SEV3 en la Tabla 8), se observa una anomalía resistiva que posiblemente se asocie con un lente de arcillas que de cierta manera produce el confinamiento de la capa resistiva número 2, razón que explicaría las condiciones de artesianismo de un pozo ubicado en esta localidad (pozo HE-18 SENARA en Arias y Morera, 1997).

La Tabla 9 resume la interpretación en profundidad de los resultados de los valores de resistividad eléctrica obtenida en los sondeos eléctricos verticales del SEV8 al SEV14:

Tabla 9 Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)

SONDEO	DE (m)	HASTA (m)	RESISTIVIDAD (Ω-M)	LITOLOGÍA	FORMACIÓN SUPERFICIAL
SEV8	0	2	89	Limos arenosos densos	Complejo de Nicoya (basaltos)
	2	10	32	Limos arenosos saturados	
	10	150	2001	Basaltos sanos	
SEV9	0	1	208	Gravas con matriz arenosa	Depósitos aluviales recientes
	1	20	75	Gravas con matriz limo arenosa saturada	
	20	60	159	Gravas arenosas	
	60	150	1160	Basaltos moderadamente fracturados	
SEV10	0	5	47	Limos arenosos	Depósitos aluviales recientes
	5	10	218	Arenas y gravas drenadas	
	10	30	73	Arenas y gravas saturadas	
	30	145	313	Basaltos fracturados	
	145	150	1125	Basaltos densos	
SEV11	0	2	51	Arenas densas drenadas	Depósitos aluviales recientes
	2	10	304	Gravas drenadas	
	10	25	35	Arenas saturadas	
	25	70	270	Basaltos alterados	
	70	140	86	Basaltos fracturados saturados	
	140	150	1647	Basaltos sanos	
SEV12	0	8	82	Gravas con matriz arcillosa	Depósitos aluviales recientes
	8	12	75	Gravas con matriz arcillosa saturada	
	12	60	50	Areniscas fracturadas	
	50	140	12	Lutitas	
	140	150	81	Areniscas	
SEV13	0	5	72	Gravas con matriz arcillosa	Complejo de Nicoya (basaltos)
	5	10	92	Gravas con matriz arenosa	
	10	80	303	Basaltos fracturados saturados	
	80	150	997	Basaltos fracturados	
SEV14	0	5	898	Coluvio (bloques con	Complejo de Nicoya

			arcillas)	(basaltos)
5	30	96	Brechas basálticas	
30	150	2405	Basaltos sanos	

5.7 Pozos perforados

En la zona de estudio se tienen registrados en la base de datos del SENARA un total de 72 pozos perforados (Figura 34), los cuales fueron revisados, filtrados y procesados para utilizar los registros que cuenten con la información más confiable y completa de litología, armado (tramos ciegos de tubería y rejillas), niveles estáticos (dinámicos) y pruebas de bombeo, el listado de los pozos a utilizar en el presente análisis hidrogeológico es el siguiente:

Tabla 10 Pozos perforados reportados en la Base de Datos del SENARA

POZO	PROPIETARIO	X (LONG)	Y (LAT)	Z (MSNM)
HE-001	HACIENDA LILLY POZ SA	433038	1063329	31,67
HE-002	DIDIER SMIDERLE	431450	1063558	5,00
HE-003	HOTELES RECREATIVOS SA	430529	1064181	3,00
HE-004	ASOC EMPL GRUPO ARH	432238	1063030	13,50
HE-005	PYA, SUENOS DEL HERRADURA	428642	1067653	8,00
HE-012	AYA	432238	1063030	13,50
HE-016	MARÍO DIVARI	432788	1062679	15,00
HE-017	MULTI INV DE JACÓ SA	429443	1068382	17,00
HE-019	MUNIC JACÓ	431865	1064930	17,00
HE-020	ASOC VECINOS DE JACÓ	430318	1069001	24,00
HE-021	MARLIN DORADO S,A,	428791	1066433	27,00
HE-023	MARINA DE HERRADURA S.A.	428713	1068163	26,00
HE-024	MARINA DE HERRADURA S.A.	428893	1068332	16,00
HE-027	MARINA HERRADURA	429143	1068052	14,00
HE-028	MARINA HERRADURA	428813	1067833	12,00
HE-035	SOC USUARÍOS SUENOS HERREDURA	428330	1067625	8,00
HE-036	SOCIEDAD USUARÍOS LOS SUENOS	428372	1067358	5,00
HE-043	HELIOS FERILAN INVERSIONES SA	429343	1068612	16,00
HE-044	CIPRIANO SA	435600	1065987	527,00

HE-045	COMUNIDAD	430193	1068581	23,00
HE-047	REDES SUBTERRANEAS MATELEC SA	431790	1064780	16,00
HE-048	INVERSIONES SANDER DE JACÓ SA	428742	1067733	6,00
HE-051	MA Y MO DOMINGUENOS SA	435841	1066926	545,00
HE-058	ARGENT CAPITAL SA	435399	1062882	333,00
HE-059	BANCO CUSCATLAN DE COSTA RICA	429843	1068232	37,00
HE-061	CIPRIANO SA	435489	1064827	497,00
HE-062	TALLER INDUSTRIAL METASOL SA	435153	1062343	297,00
HE-064	RDUARDO ROMAN ACOSTA	430642	1067431	79,00
HE-067	CRISANTO HERRERA PEREZ	430442	1067781	25,00
HE-068	AYA	431790	1064880	12,00
HE-069	AYA	431790	1064880	16,00
HE-070	YOLANDA CHAVES MAYORGA	431842	1067500	29,00
HE-071	NOVAMENT S,A	429032	1068368	15,00
HE-075	INVERSIONES VIQUEZ PACHECO LTDA	431967	1067680	49,00
HE-076	BANCO BANEX SA	428942	1067608	16,00
HE-077	VALLE OCCIDENTAL VA OC SA	431239	1064431	12,38
HE-078	BANCO CUSCATLAN DE COSTA RICA SA	429992	1067832	33,00
HE-080	NOVANETT SA	428762	1068110	16,00
HE-088	JMJ Y ASOCIADOS DE PACIFICO SA	428483	1067475	6,00
HE-098	ESTAMOS QAP SA	428602	1067283	4,00
HE-099	INVERSIONES VARALFA SA	434522	1061958	297,00
HE-101	LUIS FERNANDO LEON ALVARADO	430452	1068642	31,00
HE-102	CONDOMINIO RESIDENCIAL COOPERATIVO	430493	1068031	51,00
HE-103	SOCIEDAD COMERCIAL Y GANADERA EL RECREO SA	431658	1063367	7,00
HE-106	SOCIEDAD COMERCIAL Y GANADERA EL RECREO SA	431571	1063472	7,00
HE-112	LUIS FERNANDO LEON ALVARADO	430448	1068501	39,00
HE-114	BUFETE FERNANDEZ ESQUIVEL Y ASOCIADOS SA #2	430353	1068156	46,00
HE-115	BUFETE FERNANDEZ ESQUIVEL Y ASOCIADOS #3	430358	1068261	32,00
HE-116	CIELO VISTA DEL OCEANO SA #1	430552	1067811	36,00
HE-117	CIELO VISTA DEL OCEANO SA #2	430602	1067701	91,00
HE-120	JAEA SA #1	432059	1063333	13,00
HE-121	JAEA SA #2	432489	1063734	28,00
HE-123	COSTA RICA PROPERTY DEVELOPMENT SA	435645	1066259	532,00
HE-125	COSTA RICA PROPERTYDEVELOPMENT SA #1	435815	1066369	506,00
HE-131	PLAZA HERRADURA SA	430271	1068815	23,00
HE-134	AyA	431047	1065170	15,38

HE-140	INURSA SA	428766	1066583	106,00
HE-141	INURSA SA	429287	1067016	102,00
HE-150	Cipriano SA	435535	1065284	507,00
HE-176	SENARA	434776	1067977	136,00
HE-183	SENARA	430238	1068675	27,00
HE-184	SENARA	430080	1068792	41,00
TS-013	COBESA SA	429791	1070537	34,00
TS-018	CORPORACION PIPASA	430341	1070536	48,00
TS-091	COMPACTADORAS DE CENTROAMERICA SA	429991	1070386	42,00
TS-106	CORPORACION COMMAX SA, #1	430321	1070911	72,00
TS-107	CORPORACION COMMAX SA #2	429841	1070956	64,00
TS-113	S,AGROP,EL TREMEDAL DE SAN RAMON SA	430241	1070456	42,00
TS-120	EL TREMEDAL DE SAN RAMON SA	430219	1070588	42,00
TS-121	EL TREMEDAL DE SAN RAMON SA	430339	1070388	34,00
TS-127	LORIA DELGADO SA	430506	1069084	29,00
TS-143	Vista Del Cielo CR Ltda,	430657	1071161	137,00
TS-158	Vista Del Cielo CR Limitada	430744	1071191	163,00
TS-166	SENARA	429673	1071013	80,00
TS-170	SENARA	430353	1069726	37,00

Fuente: SENARA (2020) y Trabajo de Campo (2020).

Se aclara que los pozos en la tabla anterior en donde se indica que el propietario es el SENARA son piezómetros de exploración perforados entre el año 2015 y 2017, la información completa de la profundidad, armado, niveles, pruebas de bombeo y litología de los pozos perforados y los piezómetros de exploración está en el Anexo 3.

El análisis porcentual de la cantidad de los pozos indica que en los sectores aluviales está la mayor cantidad pozos perforados con 49 (68 %), en las rocas del Complejo de Nicoya se tienen 18 pozos (25 %) y en las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo el conteo es de 5 pozos (7 %); esto se ilustra en el siguiente gráfico de la Figura 35.

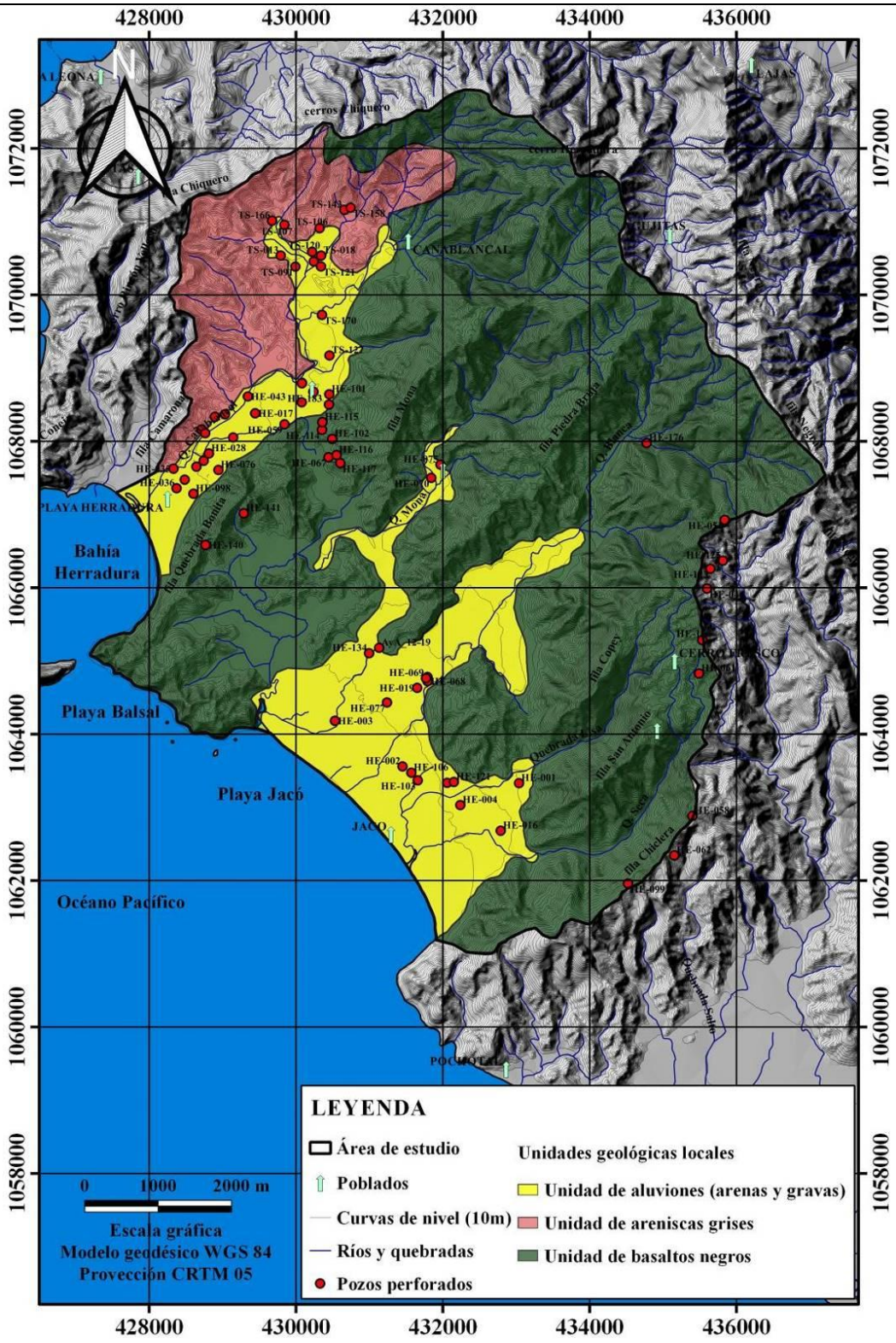


Figura 34 Mapa de ubicación de los pozos perforados
Fuente: SENARA (2020) - Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

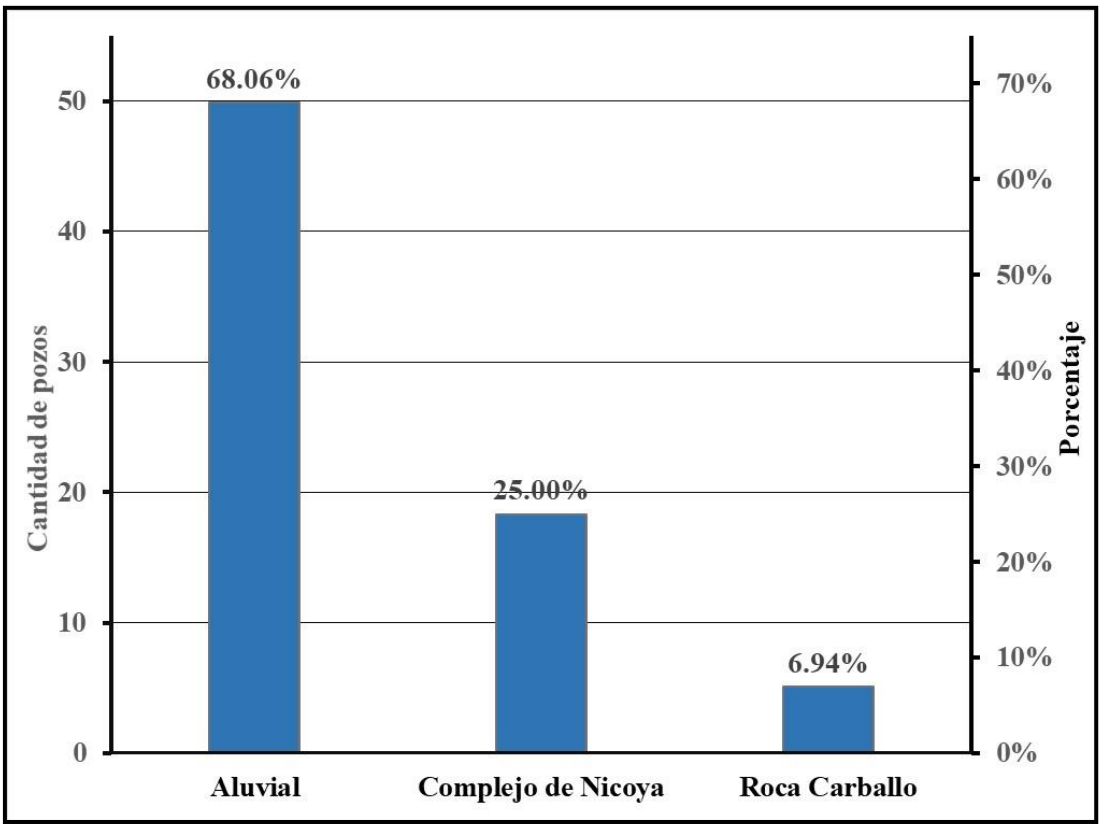


Figura 35 Porcentaje de pozos registrados por formación geológica

5.8 Red de monitoreo de pozos

Se definió una red de monitoreo de 17 pozos perforados, de los cuales tienen datos históricos desde el año 2015 así como pozos que fueron incorporados durante el trabajo de campo durante el año 2020 como es el caso de los pozos 9 y 10, los pozos del 14 al 17 son los pozos de extracción para abastecimiento del AyA en el sector de Jacó cuyas mediciones de los niveles de agua son realizados por la UEN de Gestión Ambiental del AyA.

En la siguiente tabla se muestra los datos básicos y en la Figura 36 se puede observar la disposición en la red de monitoreo de los pozos con respecto a la zona de estudio, los datos de los niveles de agua recopilados en el periodo de análisis están en el Anexo 4.

Tabla 11 Red de monitoreo de niveles de aguas subterránea en pozos perforados y excavados

POZO	NOMBRE	TIPO	LUGAR	X (LONG)	Y (LAT)	PROF (m)
1	HE-176	Perforado	Herradura	434435	1067821	100,00
2	HE-168	Perforado	Herradura	429035	1068028	NI
3	HE-045	Perforado	Herradura	430236	1068677	33,00
4	HE-183	Perforado	Herradura	430238	1068675	60,00
5	HE-020	Perforado	Herradura	430082	1068797	35,00
6	HE-184	Perforado	Herradura	430080	1068792	51,00
7	TS-170	Perforado	Herradura	430356	1069728	50,00
8	TS-166	Perforado	Herradura	429709	1071128	100,00
9	Finca Pipasa	Perforado	Herradura	429813	1070738	NI
10	Cañablancal	Perforado	Herradura	431153	1070491	40,00
11	TS-127	Perforado	Herradura	430455	1069172	30,00
12	HE-131	Perforado	Herradura	429806	1068326	30,50
13	Finca Valle Escondido	Excavado	Herradura	429924	1070366	20,00
14	HE-068	Perforado	Jacó	431792	1064722	38,50
15	HE-069	Perforado	Jacó	431770	1064762	40,00
16	HE-019	Perforado	Jacó	431650	1064631	34,00
17	HE-134	Perforado	Jacó	430995	1065104	38,00

NI = No indica el dato

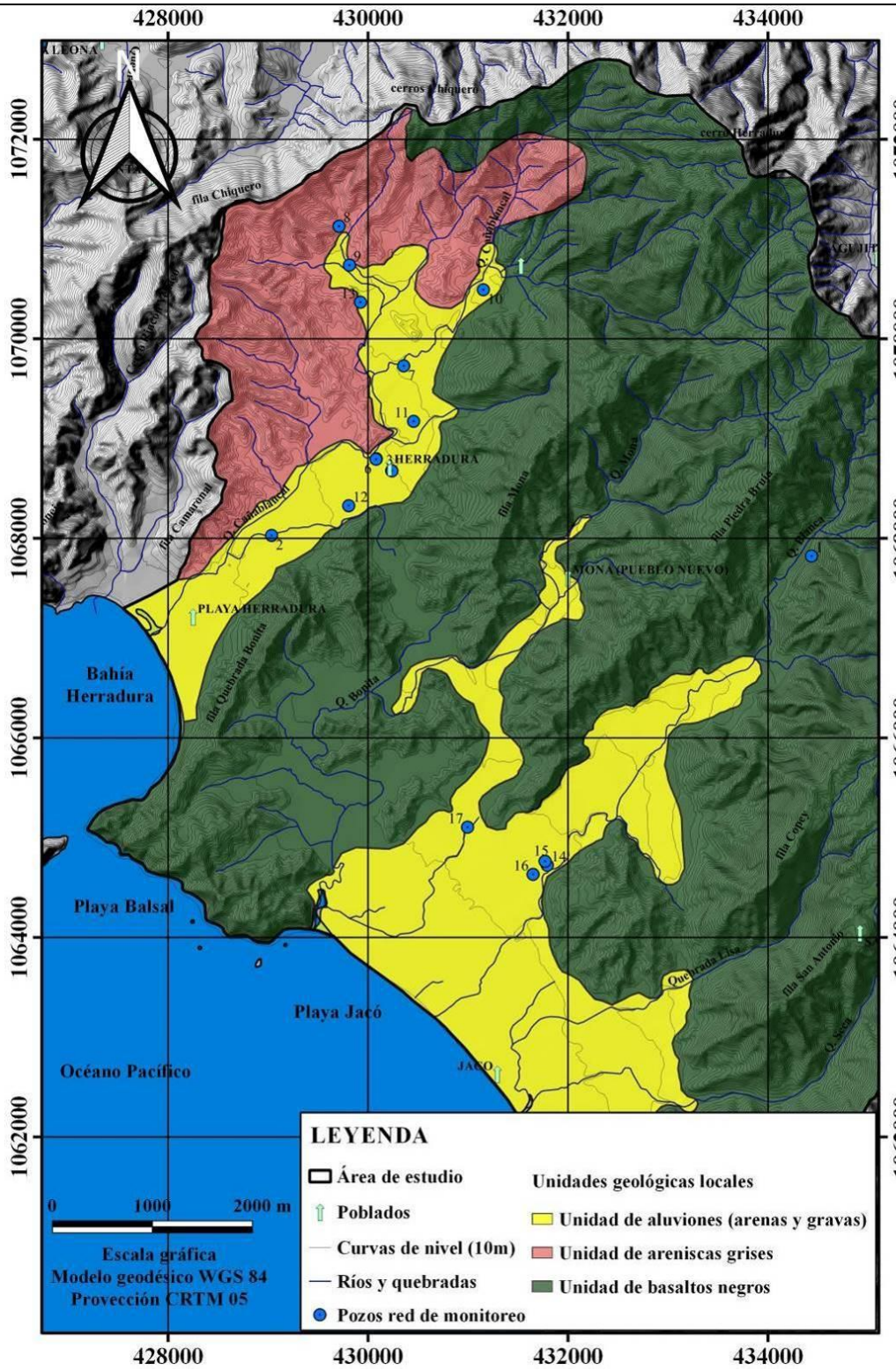


Figura 36 Mapa de ubicación de la red de monitoreo de pozos
Fuente: SENARA (2020) y Trabajo de campo (2020)
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

6 RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA A LOS ACUÍFEROS

6.1 Recarga potencial por medio del balance de humedad de suelos

Schosinsky (2006) define que el potencial de las aguas subterráneas de un acuífero, representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero, para que no sea sobreexplotado. Dicho potencial se estima mediante la recarga de agua al acuífero, que se determina conociendo:

a) En primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje.
b) En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie.
c) En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo.

De esta manera para el cálculo del agua de la precipitación que logra percolar en profundidad hacia los acuíferos en la zona de estudio, se desarrollará la metodología propuesta por Schosinsky (2006) para calcular la recarga potencial de agua hacia los acuíferos mediante la técnica de un balance hídrico de suelos.

6.1.1 Unidades de balance hídrico

Para el desarrollo del balance hídrico de suelos en la zona de estudio, aplicando criterio de formaciones geológicas y la geomorfología por pendiente principalmente, las seis unidades que se definieron para el balance de humedad de suelos se definen en la Tabla 12, por lo que el balance hídrico se desarrollará en un área de 70,66 km^2, para las zona de las playas Herradura y Jacó se ha considerado una recarga de 0 mm ya que son los sectores de descarga del agua subterránea de ambos acuíferos.

Tabla 12 Unidades definidas para el balance hídrico y la recarga potencial

FORMACIÓN GEOLÓGICA	UNIDAD DE BALANCE	ÁREA (km^2)
Punta Carballo	Areniscas	7,10
Complejo de Nicoya	Basaltos2	1,80
Complejo de Nicoya	Basaltos3	48,04
Complejo de Nicoya	Basaltos4	0,39
Depósitos Cuaternarios	Herradura	3,88
Depósitos Cuaternarios	Jacó	9,45
TOTAL		**70,66**

6.1.2 Coeficiente de intercepción por el follaje (C_{fo})

Schosinsky (2006) define que para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje de la vegetación (Ret) en una zona determinada, se aplicará la siguiente ecuación:

$$Ret = (P)(C_{fo}) \text{ (ecuación 1)}$$

Donde:

Ret = Retención de lluvia en el follaje de la vegetación [mm/mes].
P = Precipitación mensual del mes [mm/mes].
C_{fo} = Coeficiente de retención del follaje [adimensional].

Si la precipitación (P) es menor o igual a 5 mm/mes, Ret = P. Si el producto (P)(C_{fo}) es mayor o igual de 5 mm/mes. Si el producto (P) x (C_{fo}) es mayor o igual de 5 mm/mes, entonces Ret = (P)(C_{fo}). Y por último si P es mayor de 5mm/mes y el producto de (P)(C_{fo}) menor de 5, Ret = 5 (Schosinsky 2006). Los coeficientes de intercepción propuestos por Schosinsky y Losilla (2000) son los siguientes:

Tabla 13 Coeficientes de intercepción (C_{fo})

POR COBERTURA	C_{fo}
Bosque	0,20
Otros	0,12

(Tomado de Schosinsky y Losilla, 2000)

6.1.3 Coeficiente de infiltración (C_i)

Schosinsky (2006) propone que para calcular la precipitación que infiltra en el terreno, la lluvia que pasa a través de la vegetación y que no es interceptada por el follaje se tiene que ser multiplicada por un coeficiente de infiltración, como se indica en la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)\ (P\text{-}Ret) \text{ (ecuación 2)}$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

De esta manera el coeficiente de infiltración C_i se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$C_i = (Kp + Kv + Kfc) \text{ (ecuación 3)}$$

Donde:

- C_i [tanto por uno] = Coeficiente de infiltración.
- Kp [tanto por uno] = Fracción que infiltra por efecto de pendiente.
- Kv [tanto por uno] = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal.

- Kfc [tanto por uno] = Fracción que infiltra por tex tura del suelo.

La consideración para utilizar el C_i es la siguiente:

- C_i = (Kp + Kv + Kfc) para Kp + Kv + Kfc < 1.
- C_i = 1 para Kp + Kv + Kfc ≥ 1.
- C_i = 0 para P < 5 mm / mes.

Coeficiente por Infiltración debido a la Textura del Suelo (K_{fc})

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (k_{fc}), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky & Losilla, 2000):

$$k_{fc} = 0{,}267\ln(_{fc}) - 0{,}000154_{fc} - 0{,}723 \text{ (ecuación 4)}$$

Donde:

- k_{fc} [adimensional] = Coeficiente de infiltración.
- (fracción que infiltra por textura del suelo).
- f_c [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

El valor de f_c corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, por considerar que este es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia (Schosinsky, 2006).

Para aplicar esta ecuación, el rango de f_c ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día. Para valores de fc menores a 16 mm/día, $k_{fc} = 0{,}0148f_c/16$. Para valores de f_c mayor a 1568 mm/día, k_{fc} = 1 (Schosinsky, 2006). Con las observaciones mencionadas en el párrafo

anterior, el cálculo del coeficiente de infiltración por textura del suelo, se representa en la siguiente ecuación:

Las ecuaciones para calcular el coeficiente de infiltración por textura de suelo (k_{fc}) son las siguientes:

- Si fc se encuentra entre 16 y 1568 mm/día, entonces $k_{fc} = 0{,}267*\ln(f_c) - 0{,}000154f_c - 0{,}723$.
- Si fc es menor a 16 mm/día $k_{fc} = 0{,}0148*fc/16$.
- Si fc es mayor de 1568 mm/día $k_{fc} = 1$.

Para la zona de estudio el f_c y el k_{fc} se obtuvieron con base en el promedio las 54 pruebas de infiltración hechas con la metodología del doble anillo, asignando el valor promedio del k_{fc} a cada unidad de balance. Para las unidades de balance de las areniscas y los basaltos se utilizaron pruebas de infiltración que están cerca de los límites de la zona de estudio en los sectores noreste y noroeste.

Los valores de las pruebas de infiltración se muestran en la Tabla 14, la ubicación de las pruebas de infiltración se ilustra en la Figura 37 y los datos obtenidos para el coeficiente del k_{fc} están en el Anexo 4, de esta manera se obtuvo el mapa con los valores del factor k_{fc} para la unidades de balance (Figura 38).

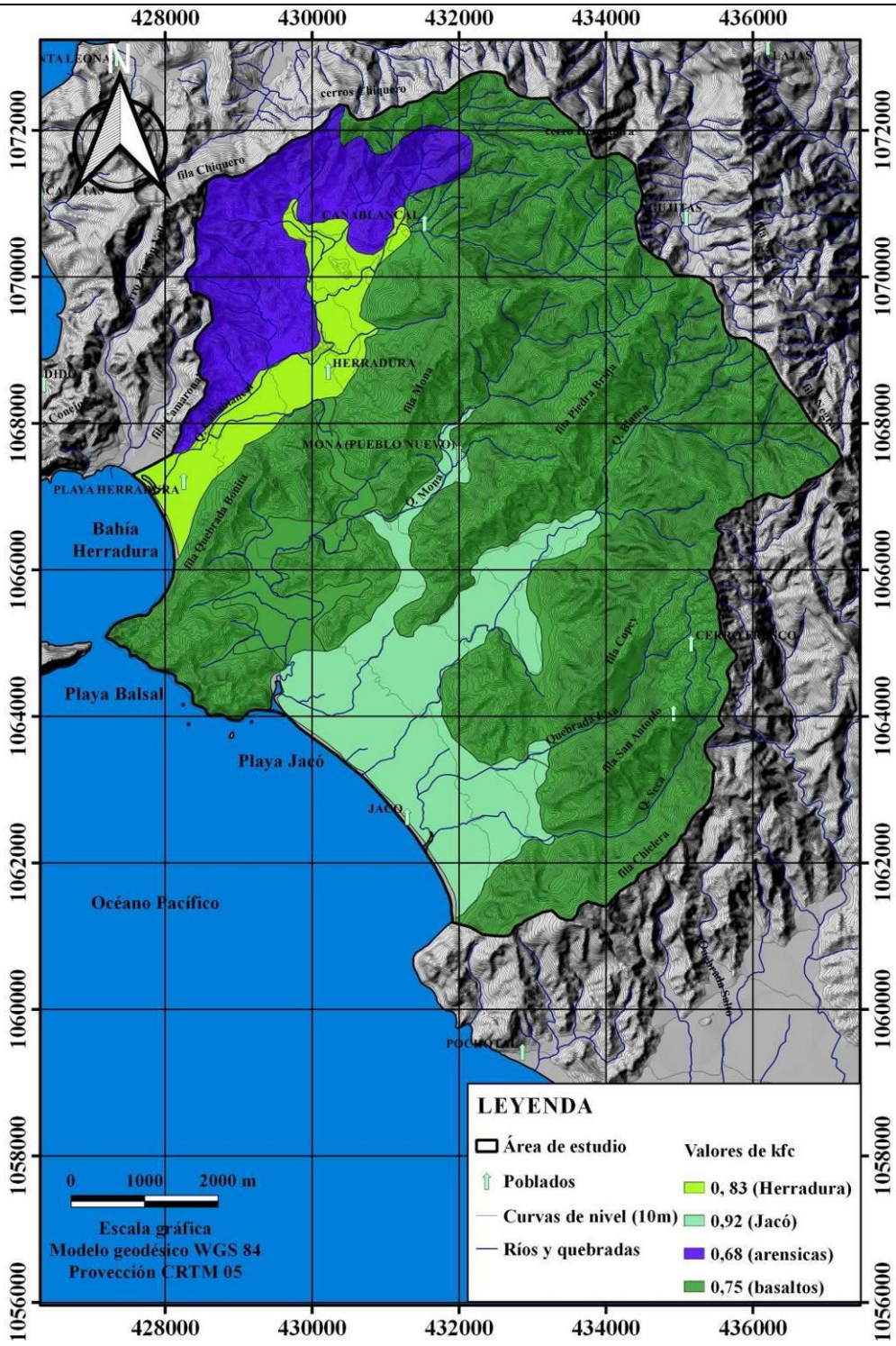


Figura 38 Mapa de valores de Kfc
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

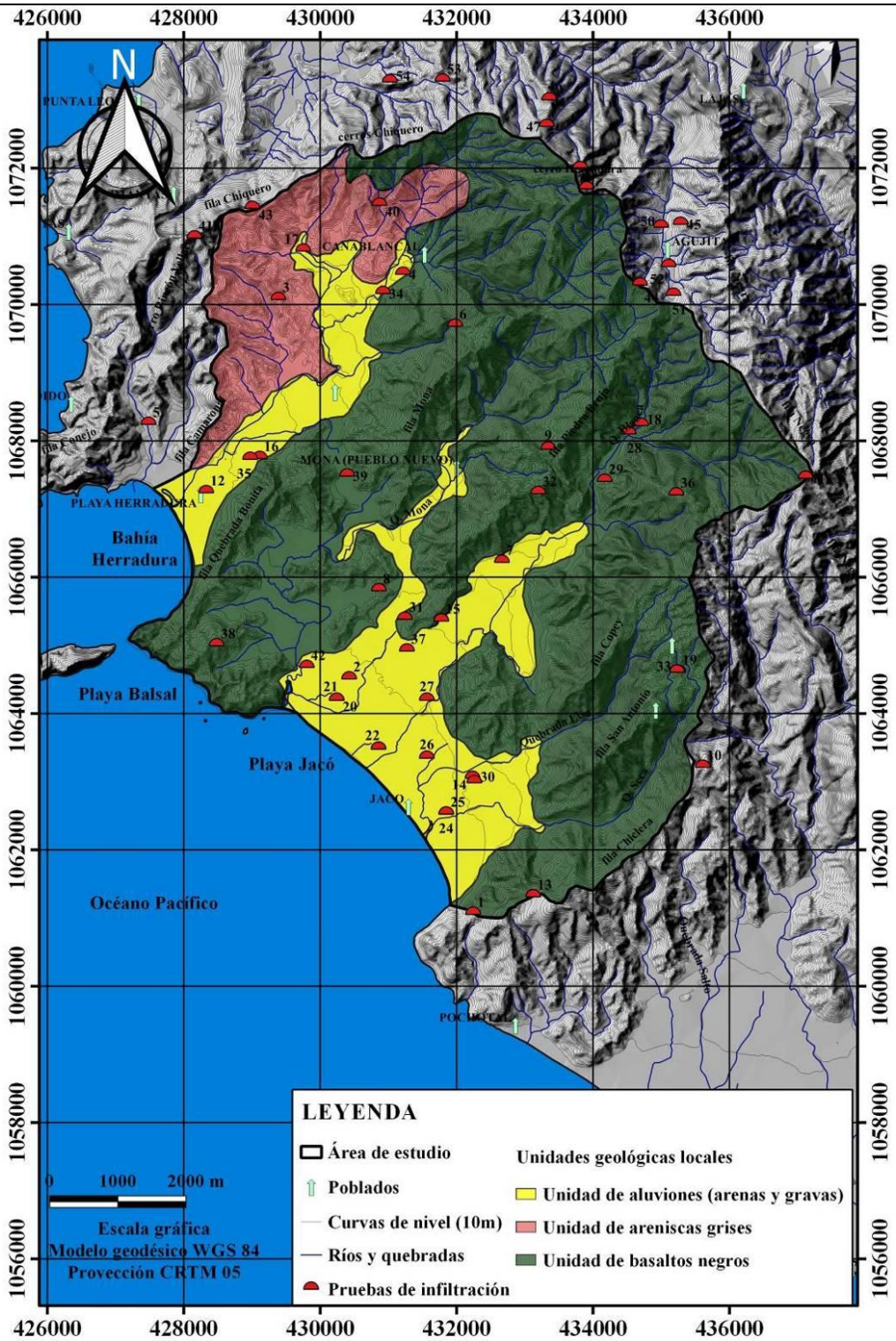


Figura 37 Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración
Fuente: SENARA (2015) y Corrales (2017)
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

Tabla 14 Datos y valores de las pruebas de infiltración

NUMERO DE PRUEBA	X (LONG)	Y (LAT)	f_c (mm/dia)	k_{fc}	UNIDAD DE BALANCE	FUENTE
1	432242	1061053	5098,97	1	Basaltos	Senara, 2015
2	430424	1064507	620,00	0,8980	Jaco	Senara, 2015
3	429384	1070073	1229,00	0,9870	Areniscas	Senara, 2015
4	431213	1070443	721,00	0,9230	Basaltos	Senara, 2015
5	427482	1068241	5,00	0,0046	Areniscas	Senara, 2015
6	431979	1069681	7,00	0,0060	Basaltos	Senara, 2015
7	432664	1066216	387,00	0,8080	Herradura	Senara, 2015
8	430861	1065799	50,00	0,3140	Areniscas	Senara, 2015
9	433343	1067877	308,00	0,7600	Areniscas	Senara, 2015
10	435609	1063210	2057,00	0,9970	Areniscas	Senara, 2015
11	437117	1067451	644,00	0,9050	Areniscas	Senara, 2015
12	428328	1067238	341,00	0,7820	Herradura	Senara, 2015
13	433123	1061309	4531,00	1	Basaltos	Senara, 2015
14	432233	1063048	5075,00	1	Jaco	Senara, 2015
15	431776	1065355	1104,00	0,9780	Jaco	Senara, 2015
16	429113	1067740	549,00	0,8770	Herradura	Senara, 2015
17	429750	1070783	399,00	0,8150	Areniscas	Senara, 2015
18	434705	1068224	11653,00	1,0000	Basaltos	Senara, 2015
19	435248	1064607	431,00	0,8300	Basaltos	Senara, 2015
20	430241	1064193	1223,40	0,9870	Jaco	Arias y Morera, 2000
21	430241	1064193	290,40	0,7470	Jaco	Arias y Morera, 2000
22	430855	1063476	44,60	0,2840	Herradura	Arias y Morera, 2000
23	430855	1063476	2793,60	1	Jaco	Arias y Morera, 2000
24	431847	1062523	1755,60	1	Jaco	Arias y Morera, 2000
25	431847	1062523	1214,40	0,9860	Jaco	Arias y Morera, 2000
26	431563	1063343	27,10	0,1540	Jaco	Arias y Morera, 2000

27	431563	1064194	2,80	0,0030	Jaco	Arias y Morera, 2000
28	434521	1068101	1322,93	0,9900	Basaltos	Senara, 2015
29	434170	1067405	716,46	0,9200	Basaltos	Senara, 2015
30	432260	1062983	45,29	0,2900	Jaco	Senara, 2015
31	431241	1065381	11,76	0,0100	Basaltos	Senara, 2015
32	433197	1067225	854,85	0,9500	Basaltos	Senara, 2015
33	435233	1064606	680,60	0,9100	Basaltos	Senara, 2015
34	430921	1070161	282,58	0,7400	Basaltos	Senara, 2015
35	428972	1067728	150,08	0,5900	Herradura	Senara, 2015
36	435221	1067206	641,49	0,9000	Basaltos	Senara, 2015
37	431271	1064915	243,58	0,7100	Jaco	Senara, 2015
38	428481	1064992	78,51	0,4300	Basaltos	Senara, 2015
39	430393	1067483	963,47	0,9600	Herradura	Senara, 2015
40	430868	1071455	359,51	0,7900	Areniscas	Senara, 2015
41	428155	1070975	6865,92	1	Areniscas	Corrales, 2017
42	429802	1064674	800,89	0,9400	Jaco	Senara, 2015
43	429005	1071409	7025,76	1	Areniscas	Corrales, 2017
44	434689	1070285	637,92	0,9031	Basaltos	Corrales, 2017
45	435283	1071176	214,56	0,6774	Basaltos	Corrales, 2017
46	433357	1073002	937,44	0,9598	Basaltos	Corrales, 2017
47	433321	1072612	828,00	0,9435	Basaltos	Corrales, 2017
48	433812	1071993	192,96	0,6524	Basaltos	Corrales, 2017
49	433907	1071696	1857,60	1	Basaltos	Corrales, 2017
50	434996	1071134	334,08	0,7772	Basaltos	Corrales, 2017
51	435178	1070135	2969,28	1	Basaltos	Corrales, 2017
52	435110	1070557	106,56	0,5071	Basaltos	Corrales, 2017
53	431795	1073278	1,44	0,0013	Basaltos	Corrales, 2017
54	431021	1073266	184,32	0,6415	Basaltos	Corrales, 2017

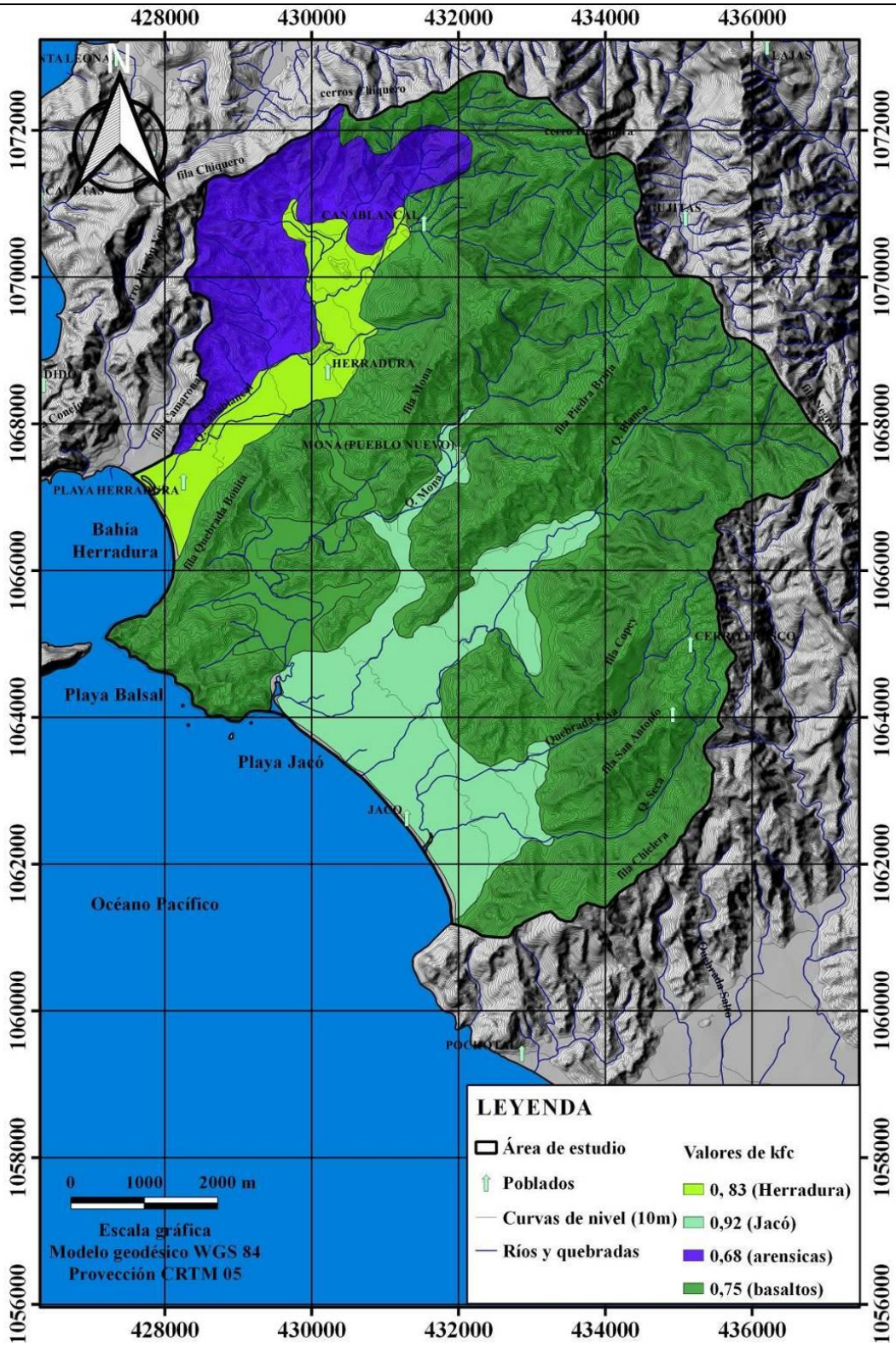


Figura 38 Mapa de valores de K_{fc}
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

Coeficiente por la Pendiente del Terreno (k_p)

Para obtener este elemento se utilizó el modelo de elevación digital para la zona de estudio, el cual se construyó con las curvas de nivel a escala 1:25000 disponibles en el sitio del SNIT. Se hizo una interpolación con la metodología TIN (Red Irregular Triangulada) y de ese archivo se genera el mapa de pendientes en porcentaje que luego es reclasificado con los valores de k_p de la siguiente tabla:

Tabla 15 Componente k_p para el coeficiente de infiltración

POR PENDIENTE	PENDIENTE (%)	k_p
Muy plana	0,02 – 0,06	0,30
Muy plana a plana	0,06 – 0,30	0,25
Plana	0,30 – 0,40	0,20
Plana a algo plana	0,40 – 1,00	0,18
Algo plana	1,00 – 2,00	0,15
Promedio	2,00 – 7,00	0,10
Fuerte	> 7	0,06

(Modificado de Schosinsky y Losilla, 2000)

Cabe mencionar que la metodología de Schosinsky y Losilla (2000) no tiene valores asignados entre los intervalos de pendientes con valores entre 0,06 – 0,30 % y entre 0,40 – 1 %; por lo que se asignaron los valores de k_p de 0,25 y 0,18 respectivamente, ya que son los valores medios entre los rangos establecidos en la tabla anterior, en la Figura 39 se tiene el mapa con los valores de k_p.

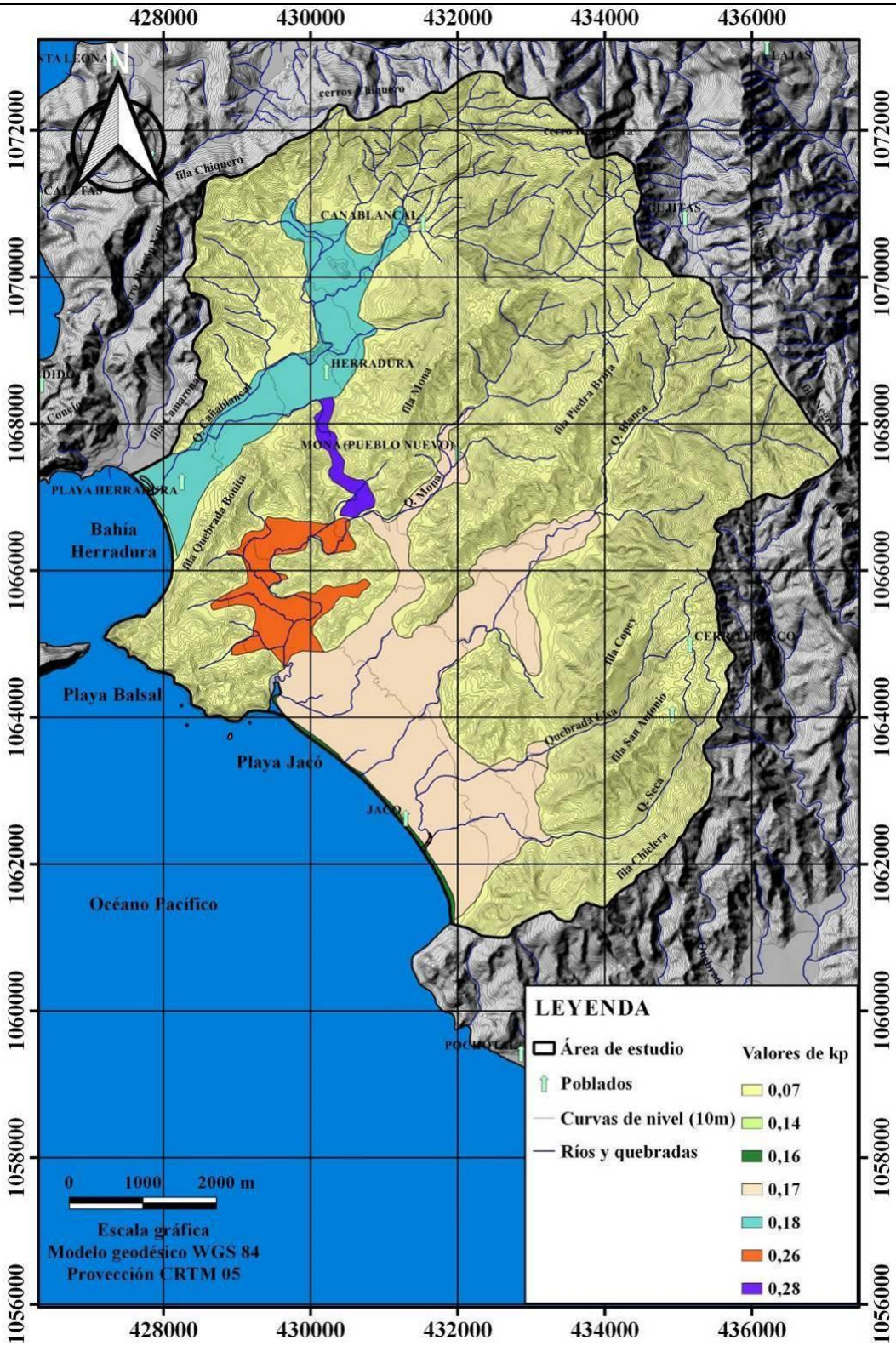


Figura 39 Mapa de valores de k_p
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

Coeficiente por la Cobertura Vegetal (k_v)

Con base en el uso del suelo y los rangos que establecen Schosinsky y Losilla (2000) se procedió a clasificar los valores de los coeficientes de k_v que define la metodología, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 16 Componente k_v por el uso de suelo

POR COBERTURA VEGETAL	k_v
Cobertura con zacate menos 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más de 75%	0,21
Urbano y playa	0,00

(Modificado de Schosinsky y Losilla, 2000)

Para el uso de suelo Urbano se utilizará un valor de 0,00; esto para realizar un análisis conservador del coeficiente de infiltración, debido a la cobertura e impermeabilización de los sectores construidos en la zona de estudio, el mapa con los valores asignados de k_v se ilustra en la Figura 40.

De esta manera y una vez que se han integrado todos los componentes se procedió a realizar el álgebra de mapas en el SIG y obtuvo el mapa de la Figura 41 del coeficiente de infiltración C_i para la zona de Herradura y Jacó y así proceder al cálculo de la precipitación que infiltra.

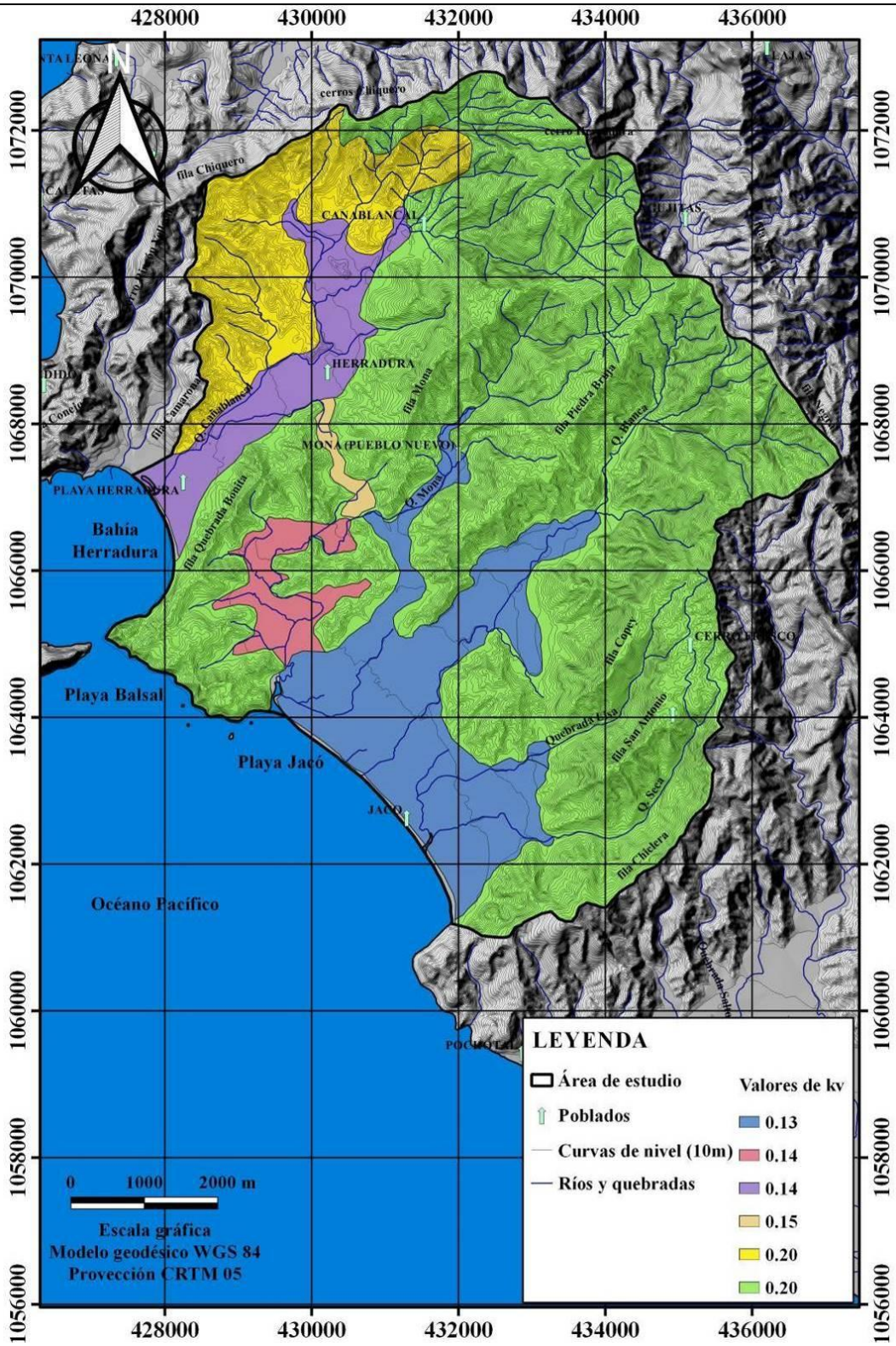


Figura 40 Mapa de valores de k_v
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

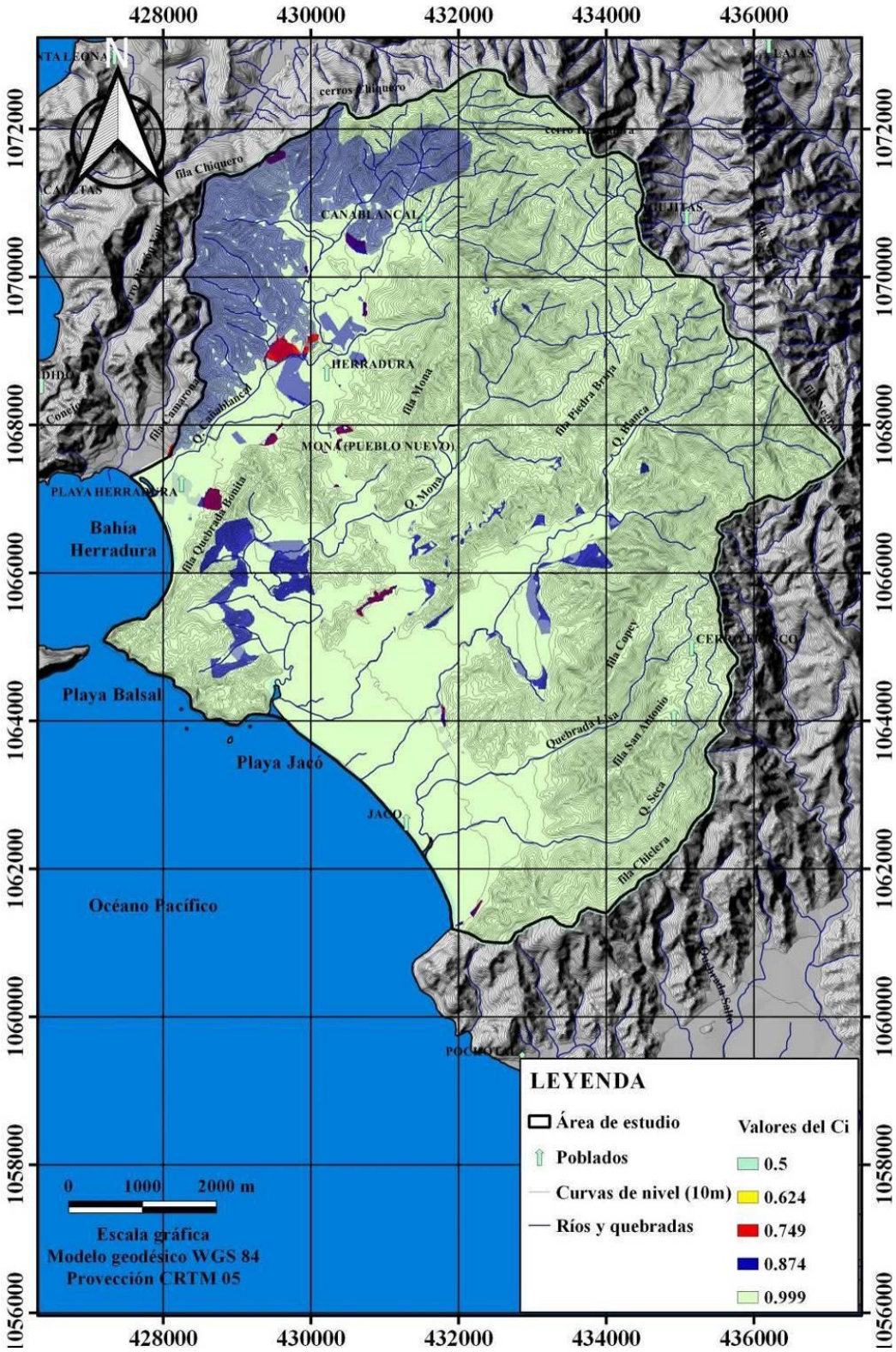


Figura 41 Mapa de valores de C_i
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

6.1.4 Precipitación que Infiltra

Continuando con la metodología de Schosinsky (2006) para el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente, se han de considerar los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración. El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente (**P_i)** al suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)\ (P\text{-}Ret) \quad \text{(ecuación 5)}$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

P = Precipitación mensual en [mm/mes] (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes]

En el mapa de la Figura 42 se tiene el mapa de la precipitación que infiltra en la zona de estudio, en donde los valores mayores se tienen en las zonas más planas de los depósitos cuaternarios aluviales de Herradura y Jacó.

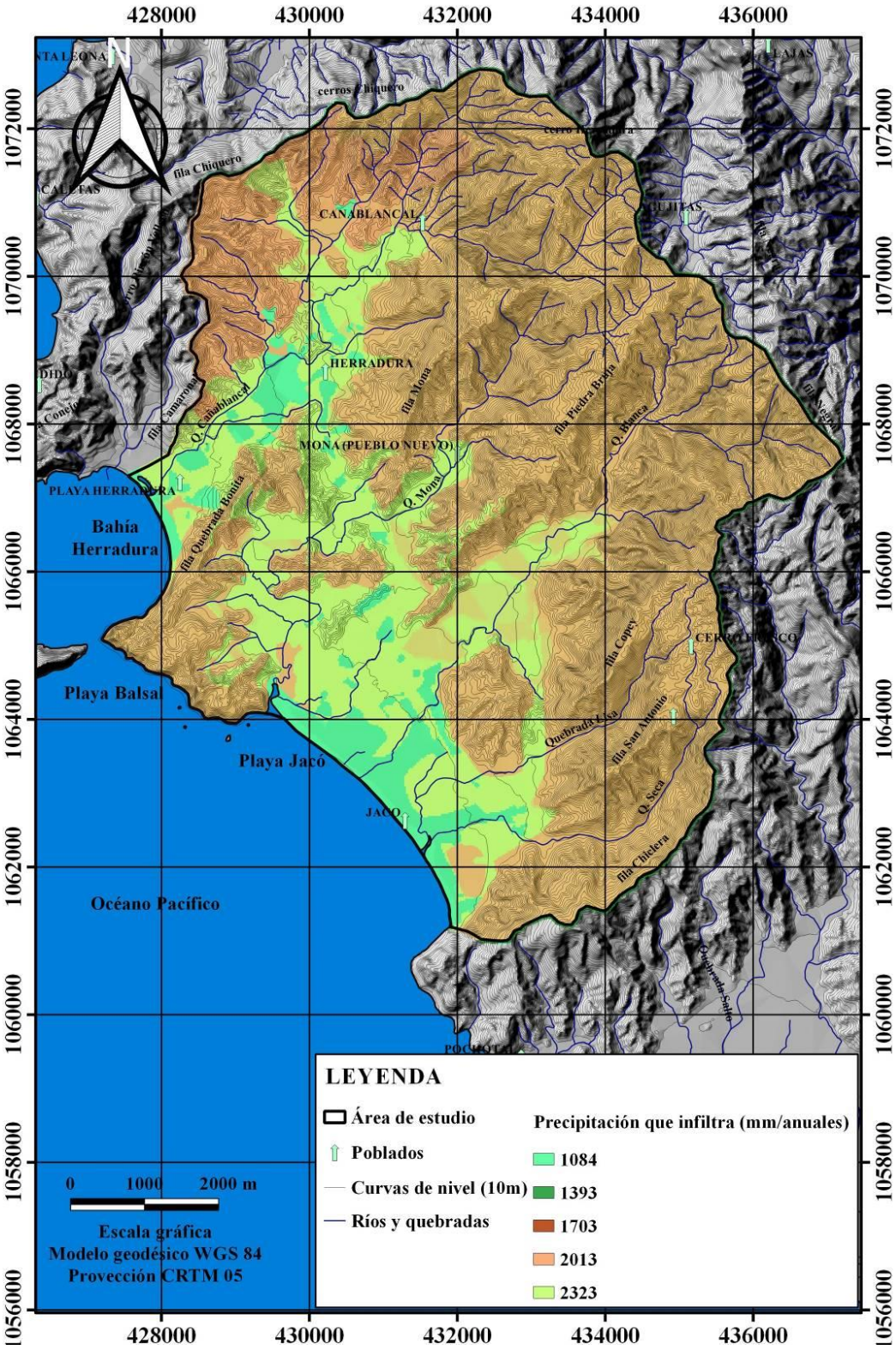


Figura 42 Mapa de la precipitación que infiltra
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

6.1.5 Cálculo de la recarga potencial a los acuíferos

Los datos de los análisis de capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente utilizados y promediados para cada unidad están en el Anexo 5; con base en las unidades de balance se procedió a la asignación y el cálculo de cada uno de los parámetros para el cálculo de la recarga potencial anual en la zona de estudio, para esto se utilizó la hoja electrónica desarrollada por Schosinsky (2006) para cada unidad (Anexo 6), en la cual se asignaron los valores que se muestran en la siguiente tabla y se procedió al cálculo de la recarga potencial en donde se tiene los siguientes resultados para cada unidad de balance:

Tabla 17 Parámetros y recarga potencial anual por unidad de balance

UNIDAD DE BALANCE	CC (%)	PM (%)	DA (g/cm^3)	Cfo	kv	kp	kfc	PROF. DE RAÍCES (mm)	RECARGA POTENCIAL ANUAL (mm)	% DE LA PREC.
Herradura	35,54	23,86	1,75	0,13	0,14	0,18	0,49	673,88	1031,53	39,30%
Jacó	30,28	20,83	1,76	0,13	0,13	0,17	0,97	509,17	1071,94	40,84%
Basaltos4	36,84	27,00	1,43	0,12	0,14	0,26	0,97	368,66	1103,21	42,03%
Basaltos2	36,84	27,00	1,43	0,19	0,20	0,07	0,99	2236,42	804,70	30,56%
Basaltos3	36,84	27,00	1,43	0,12	0,15	0,28	0,99	408,17	1097,65	41,82%
Areniscas	31,97	24,62	1,37	0,19	0,20	0,07	1,00	2124,10	854,92	32,57%

CC= Capacidad de Campo (%). PM= Punto de marchitez permanente (%). DA= Densidad aparente (g/cm^3).

De acuerdo a los cálculos realizados con los datos de la precipitación promedio mensual de las estaciones Punta Leona, Jacó, Piedra Bruja y Muelle Herradura, la recarga potencial de agua hacia los acuíferos en la zona de estudio empieza a ser significativa a partir del mes del mes de junio como se muestra en el gráfico de la Figura 43, con un desfase de unos dos meses con respecto al inicio de la precipitación fuerte en el mes de mayo para las microcuencas y acuíferos de la zona de estudio en la zona de Herradura y Jacó.

La recarga potencial llega a un máximo en el mes de octubre, disminuye significativamente en el mes de noviembre y se tiene 0 mm en el mes de diciembre por lo que se puede definir un periodo de seis meses en el periodo de junio a noviembre (Figura

43) en donde se tiene el mayor potencial de recarga por la precipitación, esto se realiza por medio de forma difusa en toda la zona de estudio. En promedio se ha calculado una recarga potencial de 994 mm/año por lo que para un área de 70,9 km^2 de toda la zona de estudio nos da una caudal de recarga de $70{,}47\times10^6$ m^3/año o su equivalente a 2234,71 litros por segundo, esto corresponde con un potencial infiltración eficaz hacia los acuíferos de un 37,88 % de los 2624,24 mm de la precipitación promedio anual para toda la zona de estudio.

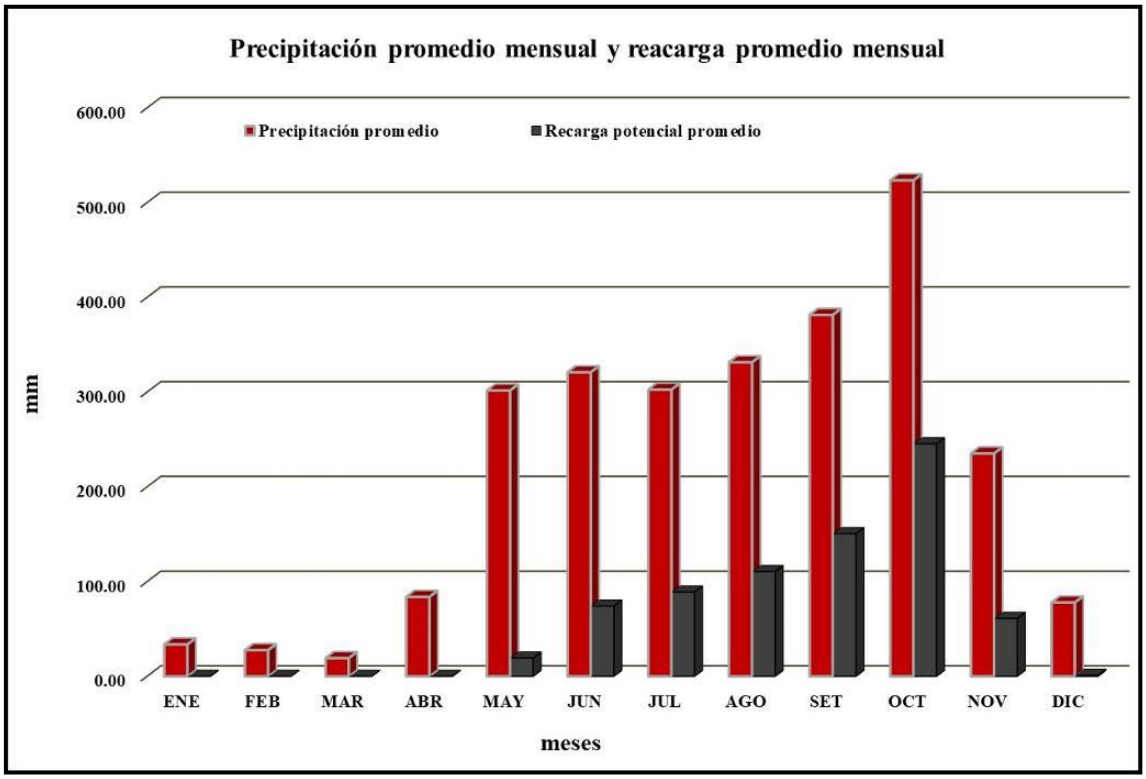


Figura 43 Gráfico de la precipitación promedio mensual (mm) y recarga promedio mensual (mm)

La distribución de la recarga potencial con respecto a las unidades de balance se muestra en la Figura 44, la recarga mayor de 1103 y 1097 mm anuales se presenta un la unidad de balance de basaltos en la formación del Complejo de Nicoya, en un sector plano al NW en la zona plana que comunica Herradura y Jacó; y en la que en el momento de realizar esta investigación contaba con poca cobertura vegetal esto significa una percolación de un 42 % de la precipitación promedio anual.

Las unidades de balance que corresponde con los acuíferos Herradura y Jacó tienen una capacidad de recarga potencial de 1031 mm/año y 1072 mm/año respectivamente, con un 39 y 40 % de la precipitación promedio anual respectivamente, esto se debe a la baja pendiente del terreno y los usos de suelo predominante de zacate, algunas plantaciones las cuales en ciertas épocas del año se encuentran sin ningún tipo de cobertura ya que los están preparando para la siembra de los cultivos y por lo tanto se ha modelado con baja profundidad de raíces que disminuye la evapotranspiración, favoreciendo así la infiltración eficaz o profunda en el balance de suelos.

Las unidades de balance Basaltos y Areniscas, específicamente en los sectores con las mayores pendientes en las filas y cerros tienen los potenciales de recarga más bajos, con 805 mm anuales (31 %) y 855 mm anuales (32 %) respectivamente debido a que la gran mayoría de estas unidades están cubiertas por bosques primarios y/o secundarios, los cuales por su profundidad de raíces de la variada cantidad de árboles y arbustos que favorecen la evapotranspiración.

También estás zonas de los cerros que bordean las divisorias de aguas y que están formados por las rocas del Complejo de Nicoya y las areniscas de la formación Punta Carballo tienen pendientes mayores al 7 % sin embargo favorece muy poco la escorrentía; a pesar de que estas unidades tienen las recargas más bajas relativas en la zona de estudio, las mismas tienen un área muy significativa de captación y la recarga en estas rocas juega un papel muy importante en el flujo base en los ríos y las quebradas en la época seca, que en las zonas influentes recargan los depósitos aluviales en las zonas más bajas y de menor pendiente, esto aunado los bajos espesores de suelos residuales (0 - 0,60 cm) lo cual favorece la recarga potencial a pesar de tener coeficientes (k_{fc}) con valores promedio de 0,75 pero muy variables, esto se debe por el alto grado de meteorización diferencial la cual se ve reflejado en las variaciones texturas de los suelos desarrollados en esta rocas.

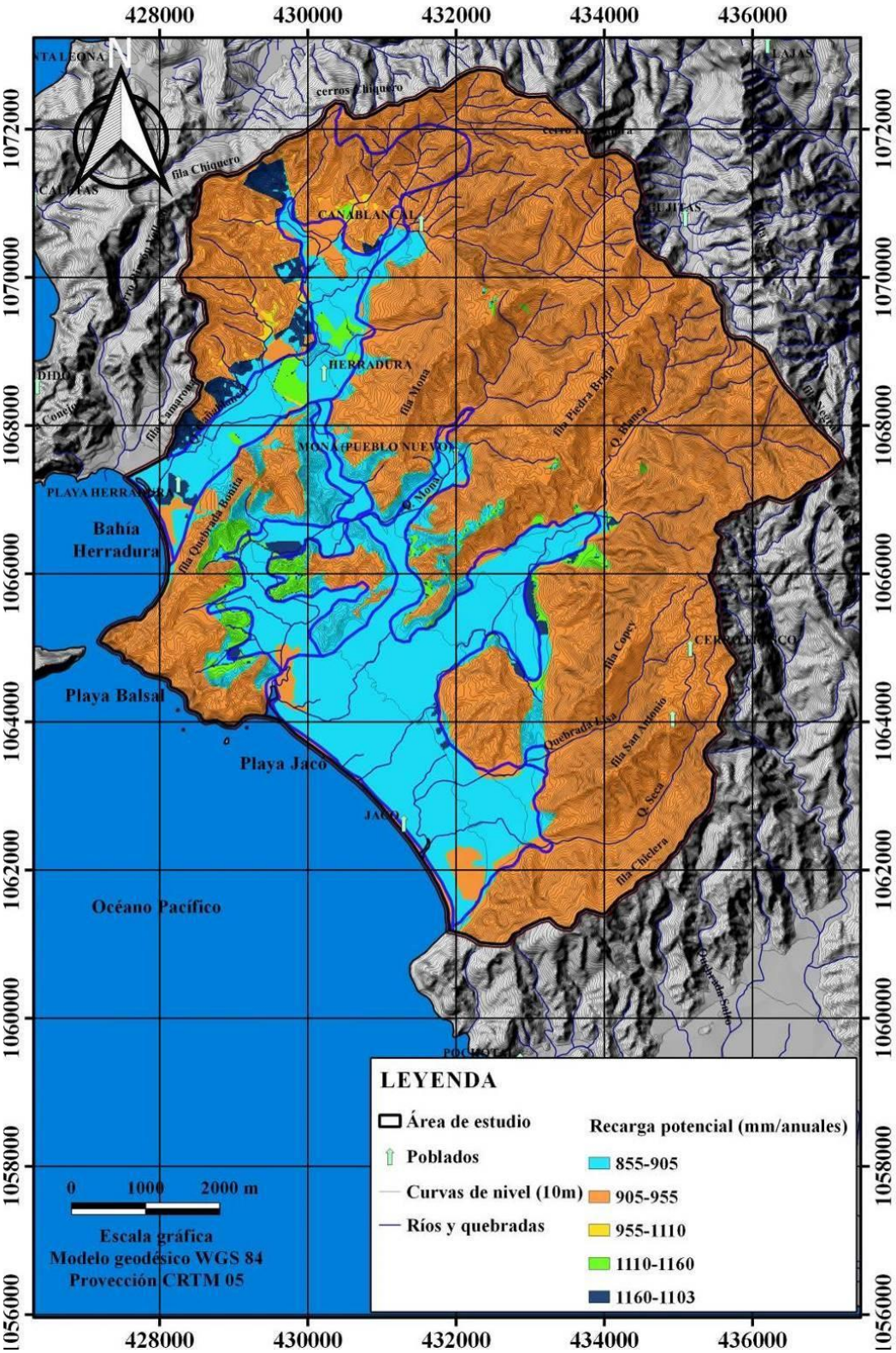


Figura 44 Mapa de recarga potencial
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

6.2 Cálculo de la recarga de agua subterránea con la fluctuación de la tabla de agua

Otra metodología para el cálculo de la recarga de agua hacia los acuíferos se puede realizar por medio de la metodología de la fluctuación de la tabla de agua en el acuífero, la cual se basa en la premisa que el incremento o ascenso del nivel del agua subterránea en un acuífero libre se debe al arribo de la recarga de agua hasta el nivel freático (traducido de Healey, 2010). De esta manera con el supuesto que la cantidad de agua disponible en una columna de área unitaria de superficie es igual a la capacidad específica del acuífero multiplicada por la altura de agua en la columna, la recarga se puede calcular con la siguiente fórmula (traducido de Healey, 2010):

$$R = S_y \, \Delta H / \Delta t \text{ (ecuación 6)}$$

Donde:

- R = Recarga de agua subterránea.
- S_y = Rendimiento específico del acuífero.
- ΔH = cambio en la altura de la tabla de agua en un intervalo de tiempo Δt.

6.2.1 Acuífero Herradura

La metodología del cálculo de la recarga por medio la fluctuación de la tabla de agua se realizará solamente en los Depósitos Aluviales en el sector de Herradura; ya que con base en la información disponible es un acuífero libre que tiene la suficiente información de los niveles de agua en pozos para desarrollar el análisis. Con base en la red de monitoreo se han seleccionado los pozos 4, 6 y 7 (HE-183, HE-184 y HE-170 respectivamente de la Tabla 11) para desarrollar el cálculo de la recarga con la metodología de hidrogramas de pozos, ya que estos pozos son los que tienen un mayor registro de mediciones del nivel estático.

El Pozo 4 de la red de monitoreo, corresponde al piezómetro con el código HE-183 en el sector de Herradura el cual se ubica muy cerca del pozo de extracción de la ASADA de Herradura en la plaza de deportes de la comunidad, muestra una variación de carga hidráulica de 10,63 metros, en el periodo de noviembre del 2019 a marzo del 2021, eso se ilustra en el siguiente gráfico:

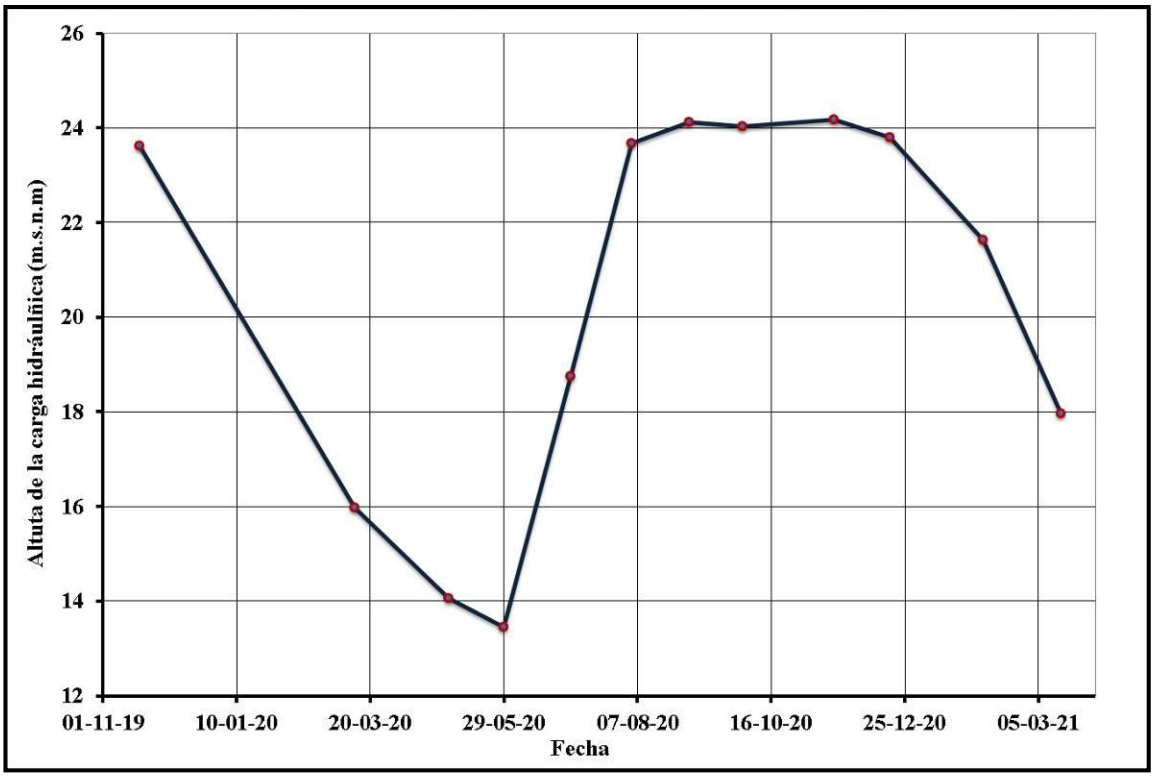


Figura 45 Gráfico de la variación del nivel de agua en el Pozo 4 (HE-183) de la red de monitoreo en el sector de Herradura

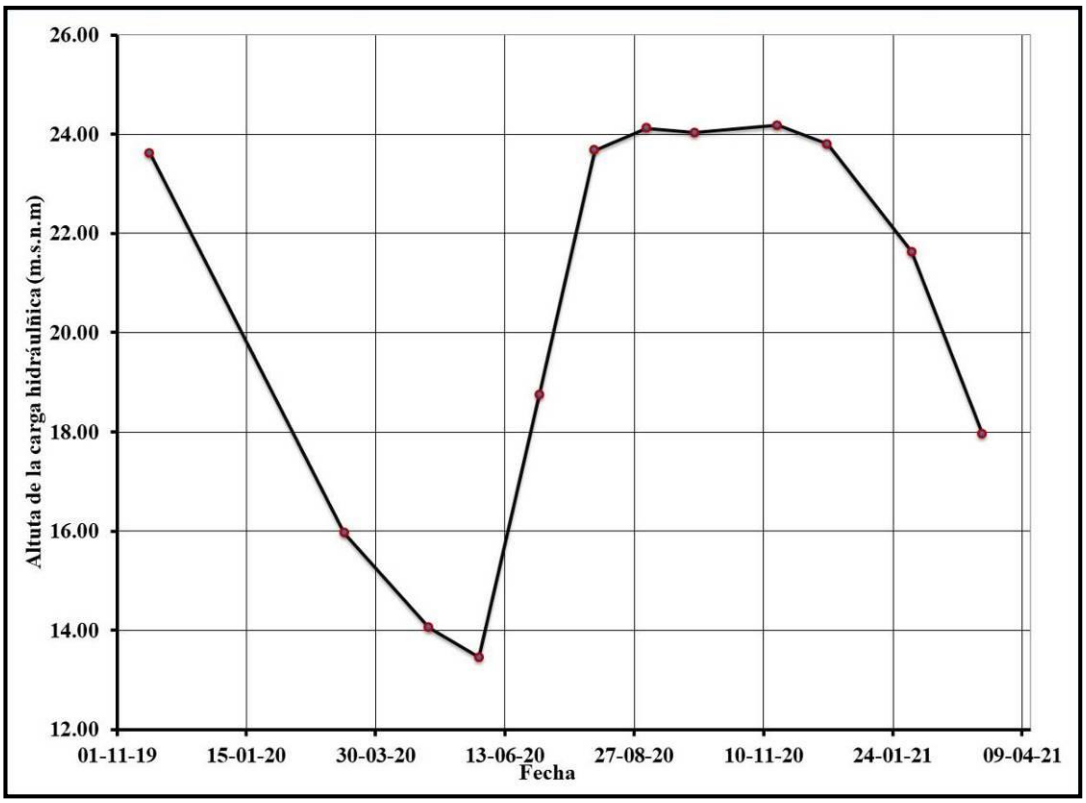


Figura 46 Gráfico de la variación del nivel de agua en el Pozo 6 (HE-184) de la red de monitoreo en el sector de Herradura

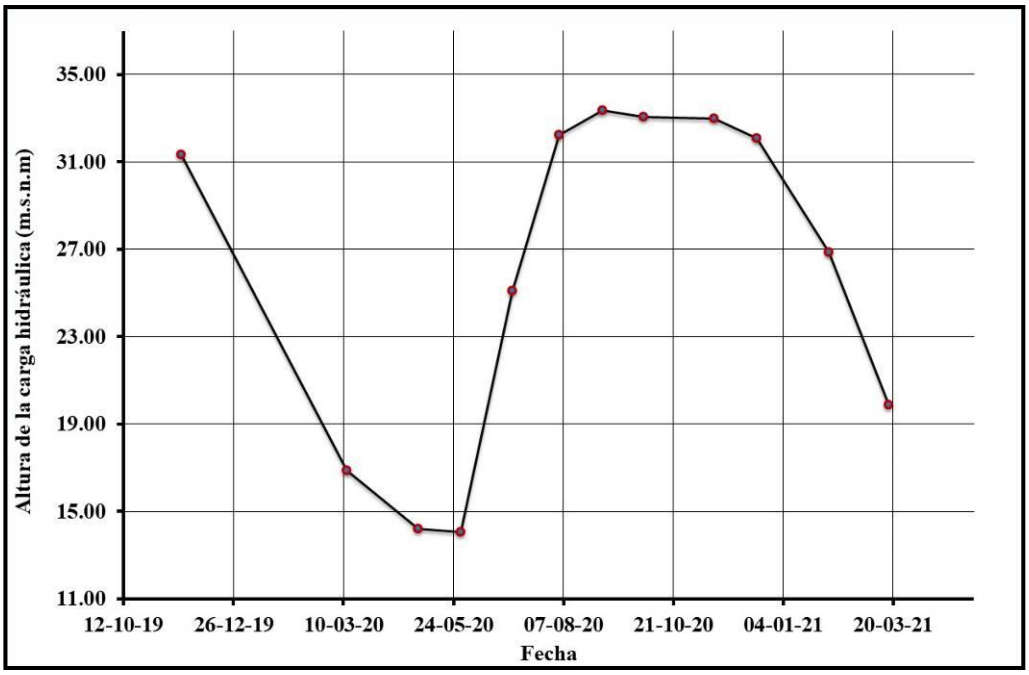


Figura 47 Gráfico de la variación del nivel del agua en el Pozo 7 (TS-170) de la red de monitoreo en el sector de Herradura

El Pozo 6 de la red de monitoreo, corresponde al piezómetro con el código HE-184 en el sector de Herradura el cual se ubica en el sector del pozo de extracción de la ASADA de Herradura en las oficinas administrativas, muestra una variación de carga hidráulica de 10,66 metros, en el periodo de noviembre del 2019 a marzo del 2021 como se muestra en el siguiente gráfico de la variación de los niveles estáticos medidos:

El Pozo 7 de la red de monitoreo, corresponde al piezómetro con el código TS-170 en el sector de Herradura el cual se ubica en el sector NW de la planicie en Herradura, muestra una variación de carga hidráulica de 19,08 metros, en el periodo de noviembre del 2019 a marzo del 2021 como se modela en el siguiente gráfico de la variación de los niveles estáticos:

En la siguiente tabla se tiene los resultados aplicando la ecuación seis para el cálculo de la recarga en los tres piezómetros seleccionados del acuífero Herradura:

Tabla 18 Cálculo de la recarga con la metodología de la fluctuación de la tabla de agua

CÓDIGO	Sy	Δh (m)	RECARGA ANUAL (mm)	% PREC	AREA (m^2)	CAUDAL (l/s)
HE-183	0,06	10,66	639,60	24,37	4296506,49	87,14
HE-184	0,06	10,63	637,80	24,30	4296506,49	86,89
TS-170	0,06	19,29	1157,40	44,10	4296506,49	157,69
PROMEDIO			**811,60**	**30,92**		**110,57**

Sy= Rendimiento específico del acuífero. Δh= variación de la altura de la tabla de agua en los piezómetros (m).

Con respecto al valor del rendimiento específico (S_y) seleccionado de 0,06 para este acuífero se definió con base en el valor del coeficiente de almacenamiento y en el capítulo 7 en encuentra una explicación mayor sobre este dato, cuando se define el modelo hidrogeológico conceptual para esta zona en el sector de Herradura. El análisis indica que para las gravas y arenas aluviales del acuífero Herradura la recarga es unos 0,81 metros por año, por lo que considerando un área de 4,30 km^2, se tiene una recarga de 111 litros por segundo.

La comparación entre la metodología del cálculo de la recarga potencial (Schosinsky, 2006) con la metodología de la fluctuación de la tabla de agua se muestra en la Tabla 19; se tiene que hay una buena correlación de ambas metodologías, con una diferencia de 219,93 mm anuales, siendo el valor mayor para la metodología de recarga potencial por balance hídrico de suelos.

A pesar de que el cálculo de la recarga por fluctuación de niveles se puede considerar como un dato más conservador, para el análisis de la presente investigación y especialmente para la construcción de los modelos numéricos (Capítulo 8) se utilizará los datos de recarga potencial obtenido por el método de balance hídrico de suelos ya que se tienen más información de pruebas de campo como pruebas de infiltración, textura, capacidad de campo y punto de marchitez de los suelos en todas las unidades de balance.

También la metodología por fluctuación de niveles solo se hizo para el acuífero Herradura y con solo un dato de coeficiente de almacenamiento (sección 7.3), en cambio el balance hídrico de suelos se hizo para toda la zona de estudio.

Tabla 19 Comparación de las metodologías para el cálculo de la recarga en el acuífero Herradura

ACUÍFERO	**AREA (m^2)**	**FLUCTUACIÓN DE LA TABLA DE AGUA**		**RECARGA POTENCIAL (Schosinsky, 2006)**	
		RECARGA (mm)	CAUDAL (l/s)	RECARGA (mm)	CAUDAL (l/s)
HERRADURA	4296506,49	811,60	110,57	1031,53	140,54

7 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

De acuerdo a las condiciones geomorfológicas observadas en el campo, con base en el mapa geológico local y las unidades de balance hídrico locales (recarga potencial); para los depósitos cuaternarios de origen fluvial de las gravas y arenas aluviales se definen dos unidades acuíferas que son el Acuífero Herradura y el Acuífero Jacó, mientras que para los basaltos del Complejo de Nicoya y las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo se han definido dos acuíferos fracturado de bajo a muy bajo potencial, los modelos hidrogeológicos conceptuales para cada unidad se describen a continuación.

7.1 Unidad hidrogeológica de muy bajo potencial en areniscas

La parte superior de estas rocas sedimentarias está conformada por un suelo que tiene espesores que varían entre los 0,30 y 0,75 metros con una textura muy variada entre gravas mal graduadas con limos, hasta limos de alta y baja plasticidad, con base en siete pruebas de campo se tiene un promedio de una tasa de infiltración de 0,67 m/día ($7{,}75\times10^{-06}$ m/s), el valor de porosidad se recopiló la información de diez ensayos de suelo en donde se obtuvo una porosidad promedio de 46,41% y la densidad aparente es 1,40 g/cm^3 (Anexo 5).

En las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo se ha reportado en las bases de datos pocos pozos perforados, de acuerdo a cinco informes finales de perforación de los pozos HE-023, TS-107 TS-143 TS-166 y el TS-158 se define que la zona no saturada está compuesta por areniscas meteorizadas y fracturadas que pueden llegar a tener un espesor de 8 a 10 metros, los pozos que se perforan en esta formación geológica tienen profundidades mayores a los 60 metros, debido a que topográficamente se sitúan en los cerros y por lo tanto se busca una buena penetración en la formación geológica para captar con la rejilla un buen trecho de la zona saturada con un buen fracturamiento, sin embargo los caudales reportados de extracción son bajos de entre 2,60 a 4 litros por segundo como se ilustra en la Figura 51 y la Figura 52.

En la zona de estudio se realizó un sondeo eléctrico vertical (SEV-12, Tabla 9) en donde se definen tres capas para las rocas de la formación Punta Carballo, una arenisca fracturada de 5 a 75 metros de profundidad con una resistividad de 50 Ω-m, una capa de lutitas de 75 a 140 m con un valor de 12 Ω-m y una capa de areniscas de 140 a 150 m con un valor de resistividad de 81 Ω-m.

El pozo TS-166 que se localiza a una altura de 70 m.s.n.m, tiene una profundidad de 100 metros y se realizaron ensayos- de geofísica de pozos (potencial espontáneo y resistividad eléctrica), las rocas se dividieron en 4 capas, la capa 1 con valores de resistividad promedio de 490 Ω-m, la capa 2 con valores promedio de 50 Ω-m, la capa 3 con valores promedio de 180 Ω-m y la capa 4 con resistividades promedio de 40 Ω-m, todas ellas dentro de la misma litología correspondiente con areniscas finas con lentes de areniscas gruesas.

Analizando las pruebas de bombeo de los pozos (TS-115 y TS-113) en estas rocas se ha determinado una conductividad hidráulica muy baja debido a una baja porosidad secundaria por fracturamiento y se le asigna a este acuífero una conductividad hidráulica (K) de 2,49 m/día ($2,88\times10^{-5}$ m/s) que se clasifica como mala; por lo que con el espesor promedio captado de 48,67 metros se tiene una transmisividad (T) baja de 71,80 m^2/día ($8,30\times10^{-4}$ m^2/s).

De acuerdo con los rangos que establece Freeze y Cherry (1979) se la asigna a este acuífero una porosidad de un 10 % y un coeficiente de almacenamiento (S) de 1 10^{-4} el cual es un valor para un acuífero confinado.

Debido a la baja cantidad de pozos perforados y su distribución es difícil definir una dirección de flujo (Figura 50); aunado a que estas rocas están altamente fracturadas por lo que los niveles del agua subterránea pueden presentar mucha variación en profundidad como resultado de la densidad y a los patrones de fracturamiento, se reportan valores entre los 0 m para los sectores confinados (pozo TS-163) y los 12,10 metros (pozo TS-107).

El pozo TS-166 muestra un comportamiento de confinamiento, por lo que reportan niveles piezométricos muy cerca del nivel de la superficie del terreno, con una profundidad promedio de 1,74 metros. Para este pozo se tiene un hidrograma del nivel piezométrico (Figura 48) desde el año 2019 en donde se muestra que la variación de la profundidad del nivel del agua fluctúa entre los 0,05 a 3,70 metros.

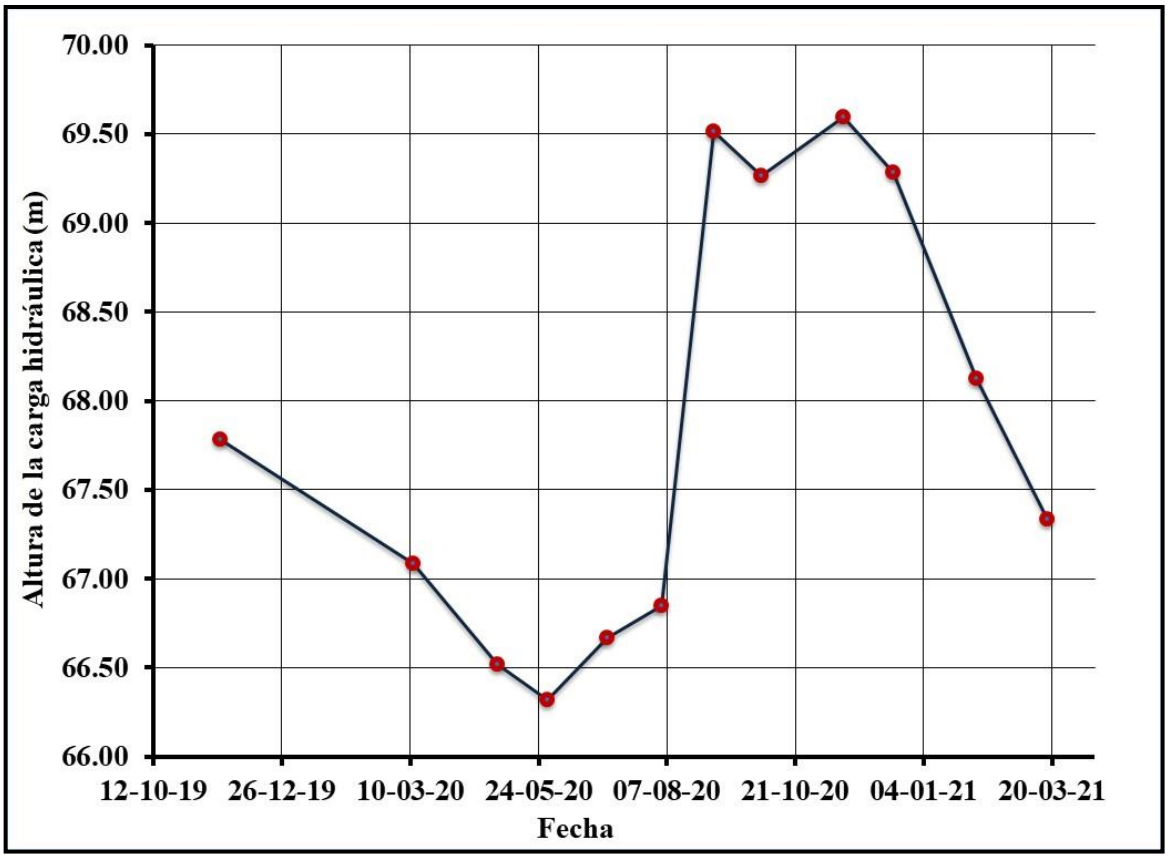


Figura 48 Gráfico de la variación del nivel del agua subterránea en el Pozo 8 (TS-166) de la red de monitoreo en el sector noroeste de Herradura

Para el sector con las mayores pendientes en las filas y cerros la recarga potencial en las areniscas es de unos 833,46 mm anuales lo que representa un 31,58 % de la precipitación, debido a que la gran mayoría de esta unidad están cubiertas por bosques primarios y/o secundarios, los cuales favorecen la evapotranspiración y tienen las pendientes mayores al 7 % favoreciendo la escorrentía superficial y subsuperficial. Esta unidad hidrogeológica tiene una significativa área de captación de lluvia y por lo tanto la

recarga en estas rocas juega un papel muy importante en el flujo base en la época seca para la parte alta y media de la microcuenca de la quebrada Cañablancal (Figura 44).

Por lo tanto, esta unidad hidrogeológica se clasifica como de muy bajo potencial acuífero en rocas fracturadas sedimentarias (areniscas) de la formación Punta Carballo, dependiendo del sector se puede comportar como un acuífero libre cubierto o un acuífero confinado.

7.2 Unidad hidrogeológica de bajo potencial en basaltos

Los basaltos del Complejo de Nicoya en superficie tienen un perfil de meteorización y arcillitización variable de unos 5 a 8 metros, los suelos en la parte superior de estas rocas están tienen espesores de suelo que oscilan entre los 0,3 a 1 metro; están conformados por texturas variadas desde gravas limosas hasta limos de alta plasticidad, lo cual crea un alta variabilidad en las tasas de infiltración con valores de 0,72 a 11,65 m/día, con base en ocho muestras de suelo la porosidad promedio es de 38,17 % y la densidad aparente es 1,43 g/cm^3 (Anexo 5).

Analizando los afloramientos en el campo esta rocas están muy fracturadas sin embargo se estima que tienen una baja permeabilidad aparente ya que las fracturas están cerradas, de acuerdo a los datos de los sondeos eléctricos verticales (Tabla 10) se definen que los basaltos del Complejo de Nicoya fracturado y meteorizados tienen un valor de 214 Ω-m, y las capas de basaltos sanos tienen una resistividad promedio de 1668 Ω-m, lo cual es vislumbra una baja permeabilidad.

Los pozos que se han perforado en esta litología tienen una profundidad promedio de 82 metros con un espesor captado o saturado de 32 metros para la cual se reporta una resistividad de unos 86 Ω-m (SEV11, Tabla 10), debido a la heterogeneidad en los patrones de fracturamiento de los basaltos y la variación en los grados de profundidad y meteorización la profundidad de los niveles de agua tienen una gran diferenciación en función de la altura en donde se ubica el pozo, con valores que oscilan entre los 0 y 160 metros, para un promedio de 35,68 metros bajo el nivel del suelo, lo que indica que se

podrían estar captando diferentes zonas saturadas en función del sector en donde se localiza el pozo y el nivel de fracturamiento captado, por estas razones es muy difícil establecer líneas isopotenciales de la altura de la carga hidráulica, esto aunado a la baja densidad de pozos perforados reportados en las bases de datos institucionales.

Algunos pozos como el HE-117 y el HE-176 muestran confinamiento por lo que inclusive se reportan niveles piezométricos a nivel de la superficie del terreno; para el caso del pozo HE-176 se tiene un hidrograma del nivel piezométrico (Figura 49) desde el año 2019 en donde se muestra que la variación del nivel del agua entre los 0,65 a 0,70 m.

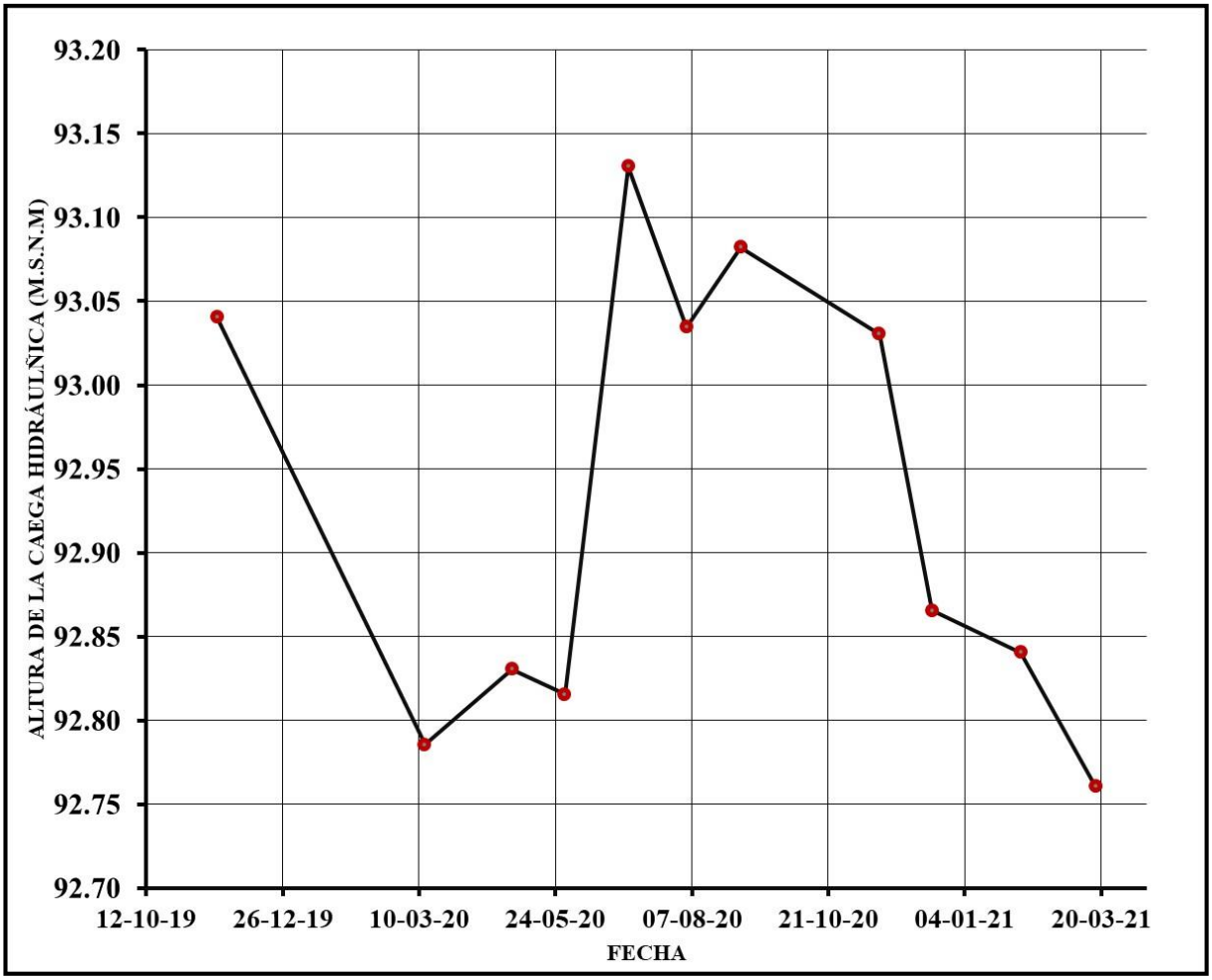


Figura 49 Gráfico de la variación del nivel en el Pozo 1 (HE-176) de la red de monitoreo en el sector noreste de Jacó

Con base en el análisis de las pruebas de bombeo de los pozos HE-51, HE-67, HE-117, HE-123, HE-125, HE-140 y HE-150 se ha determinado una conductividad hidráulica muy baja debido a que la baja porosidad secundaria por fracturamiento se encuentra rellena por minerales y arcillas producto de la alteración hidrotermal y la meteorización a niveles más superficiales, por lo que se le asigna a este acuífero una conductividad hidráulica (*K*) de 1,34 m/día ($1{,}55\times10^{-5}$ m/s) que se clasifica como mala; por lo que con el espesor promedio captado de 32 metros se tiene una transmisividad (*T*) baja de 42,37 m^2/día ($4{,}90\times10^{-4}$ m^2/s). De acuerdo con los rangos que establece Freeze y Cherry (1979) se la asigna a este acuífero una porosidad de un 10 % y un coeficiente de almacenamiento (*S*) de $1\ 10^{-4}$ para un acuífero confinado.

En los basaltos del Complejo de Nicoya se ha calculado potenciales de recarga entre 778,08 y 1107 mm anuales que corresponden a un 29,48 % y 41,95 % del total de la precipitación promedio anual de 2639,28 mm para la zona de estudio (Figura 44). La gran mayoría de estas unidades están cubiertas por bosques primarios y/o secundarios, los cuales favorecen la evapotranspiración y tienen las pendientes mayores al 7 % favoreciendo la escorrentía, sin embargo estas unidades tienen un área muy significativa de captación y la recarga en estas rocas juega un papel muy importante en el flujo base de la quebrada Bonita, el río Copey y la quebrada Cañablancal en la época seca.

El mecanismo de recarga se considera principalmente como difusa en los sectores de gran fracturamiento en los cauces de las quebradas en las partes medias de los cerros. La descarga se produce como flujo base principalmente en la quebrada Cañablancal en la zona de Herradura y en el río Copey en sector de Jacó y de manera artificial por medio de los pozos perforados profundos. Se define que en profundidad, luego de la zona meteorizada y altamente fracturada, estas rocas conforman un basamento hidrogeológico, lo que provoca que exista un flujo sub-superficial en las partes superiores meteorizadas y fracturadas que le brindan un aporte lateral a los depósitos cuaternarios aluviales especialmente en las zonas del pie de monte con el cambio de pendiente del terreno hacia las llanuras aluviales, considerándose como una recarga lateral significativa para los depósitos cuaternarios aluviales.

De esta manera esta unidad hidrogeológica se clasifica como de bajo potencial acuífero en rocas volcánicas, conformando acuíferos fracturados libres y confinados en los basaltos del Complejo de Nicoya como se muestra en la Figura 51 y en la Figura 52.

7.3 Acuífero Herradura

Para los depósitos fluviales de las gravas y arenas de varias granulometrías que han rellenado las partes bajas y planas de la microcuenca de la quebrada Cañablancal se ha definido el Acuífero Herradura que cubre un área de unos 4 km^2, desde la parte plana en la playa hasta los sectores del poblado de Cañablancal a una elevación de 60 a 70 metros sobre el nivel del mar (Figura 50).

Los suelos en la parte superior de estos depósitos aluviales tienen espesores que oscilan entre los 0,30 a 0,60 metros; están conformados por arenas arcillosas y limos de alta plasticidad, la tasa de infiltración promedio es de 0,45 m/día ($5{,}15\times10^{-7}$ m^2/s), con base en dos muestras de suelo la porosidad promedio es de 28,12 % y la densidad aparente es 1,58 g/cm^3 (Anexo 5).

Luego de la capa de suelos en la parte superior en algunos sectores se tienen unas capas de arenas finas limpias y limos arenosos con un espesor que varía entre los 6 a 8 como se muestra en los perfiles hidrogeológicos de la Figura 51 y la Figura 52; sin embargo está capa no está distribuida de manera uniforme en todo el área que reviste el acuífero, inclusive en algunos sectores no está presente a nivel superficial sino que las gravas y arenas afloran en superficie como es el caso de la mayoría de las quebradas y drenajes intermitentes.

Esta capa superior de materiales finos y arenosos finos está compuesta por materiales de color gris a verde oscuro y en general son reportadas como “arcillas” de alta plasticidad en los informes de las perforaciones realizadas en la zona de Herradura; esta capa de materiales finos y arenosos finos cumple un rol sumamente importante como cobertura de protección de potenciales contaminaciones hacia las zonas de granulometrías

más gruesas y permeables subyacentes en los aluviones, en el sector SW entre la carretera costanera y la playa Herradura esta capa de sedimentos finos le origina un confinamiento a las arenas y gravas inferiores que conforman la zona saturada del acuífero Herradura.

La zona saturada del acuífero está conformado por intercalaciones de capas de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas de origen coluvio-aluvial; los cuales fueron depositados por la dinámica fluvial en la subcuenca de la quebrada Cañablancal en la zona de Herradura. También estos depósitos tienen intercalaciones de lentes de arcillas con arenas y arcillas con clastos de tamaño de gravas.

Con base en el análisis y la correlación de los afloramientos cartografiados en el campo, los treinta y dos pozos perforados y dos sondeos eléctricos verticales se ha determinado un espesor para las intercalaciones de las capas de arenas y gravas en los depósitos aluviales que oscila entre los 8,56 a 53 metros para un promedio de 28,29 metros.

De acuerdo a los datos del sondeo eléctrico vertical SEV-11 se tiene una capa de gravas drenadas de 1 a 10 m con un valor de 304 Ω-m, de 10 a 25 m una capa de arenas saturadas con un valor de12 Ω-m el cual se debe a la saturación de los materiales, de 25 a 55 metros la capa de basaltos alterados con un valor de 270 Ω-m, de 55 a 140 metros se tiene una capa de basaltos fracturados saturados con un valor de 86 Ω-m y de 140 a 150 m están los basaltos sanos con una resistividad de 1647 Ω-m el cual se puede considerar como el basamento hidrogeológico a nivel local.

El espesor saturado para estos materiales con agua subterránea se estima en unos 17 a 19 metros en promedio (Figura 51 y Figura 52), de acuerdo al análisis de las pruebas de bombeo de los pozos y pruebas de permeabilidad realizadas en piezómetros de investigación se le asigna a esta acuífero una conductividad hidráulica promedio (K) de 50,23 m/día ($5{,}81\times10^{-4}$ m/s) que se clasifica como buena; por lo que con el espesor promedio de 30,78 metros se tiene una transmisividad (*T*) alta de 1546,08 m^2/día ($1{,}79 \times 10^{-2}$ m^2/s).

De acuerdo con los rangos que establece Freeze y Cherry (1979), se la asigna a este acuífero una porosidad total de un 25 % y con base en la prueba de bombeo de los pozos HE-027 y HE-028 se tiene un coeficiente de almacenamiento (*S*) 6×10^{-2} que corresponde al rango de un acuífero libre principalmente en sector norte y noreste de Herradura; sin embargo existe la posibilidad de que se presente situaciones de semiconfinamiento específicamente en los partes cercanas a la playa Herradura como consecuencia de las capas de materiales finos superiores.

Con base en las mediciones de la red de monitoreo de los pozos perforados la profundidad del agua subterránea oscila entre los 5 y 12 metros con el máximo en octubre y el mínimo en el mes de abril como se muestra en el hidrograma del pozo HE-184 (Figura 46), la dirección del flujo del agua subterránea es hacia el sur en el sector al norte de la cuenca de la quebrada Cañablancal hasta el centro del poblado de Herradura con un gradiente hidráulico que oscila entre 0,02 y 0,03 (véase la Figura 50, la Figura 51 y la Figura 52).

En este sector cambia la dirección de flujo hacia el oeste/suroeste con un gradiente hidráulico muy bajo de 0,005 a 0,01 hasta la descarga del acuífero en la zona de la playa Herradura (Figura 51 y Figura 52), este comportamiento hidráulico es debido a la presencia de una falla regional que actúa como una barrera hidrogeológica y como consecuencia de la condiciones geomorfológicas e hidrogeológicas de las rocas del Complejo de Nicoya.

El mecanismo de recarga principal del agua hacia el acuífero originado en las gravas a arenas es principalmente difuso por la infiltración de la precipitación con unos 1031 milímetros anuales; sin embargo en la época seca la quebrada Cañablancal juega un rol fundamental por medio de una recarga localizada en el sector de Cañablancal al NE del pueblo de Herradura, ya que tiene unos sectores de influencia en el tramo entre las coordenadas (430200-1069740 y 431165-1070445) que aportan unos 80 litros por segundo que son producto del flujo base principalmente del aporte de los basaltos del Complejo de Nicoya y en algún grado las areniscas de la formación Punta Carballo.

El proceso de descarga natural es en el océano Pacífico en todo el frente de la playa de Herradura y por el flujo base de la quebrada Cañablancal; así como también se tiene artificialmente una descarga por medio de pozos perforados de los que se puede contabilizar un caudal de extracción de aproximadamente 196 litros por segundo (0,196 m^3/s), está información es con base en los datos del Archivo Nacional del SENARA y las concesiones otorgadas por la Dirección de Agua del MINAE.

Por consiguiente, las gravas y arenas de los depósitos cuaternarias aluviales que conforman el acuífero Herradura se clasifican como un acuífero poroso libre de un alto potencial; esto se refleja en los pozos que tienen un caudal promedio de extracción de 6,92 litros por segundo.

Este acuífero tiene una gran importancia en la economía local del sector de Herradura y de la playa Herradura, ya que parte de la extracción y distribución de agua para consumo humano en la zona de Herradura se hace por medio de pozos perforados de la ASADA Herradura y la ASADA Los Sueños.

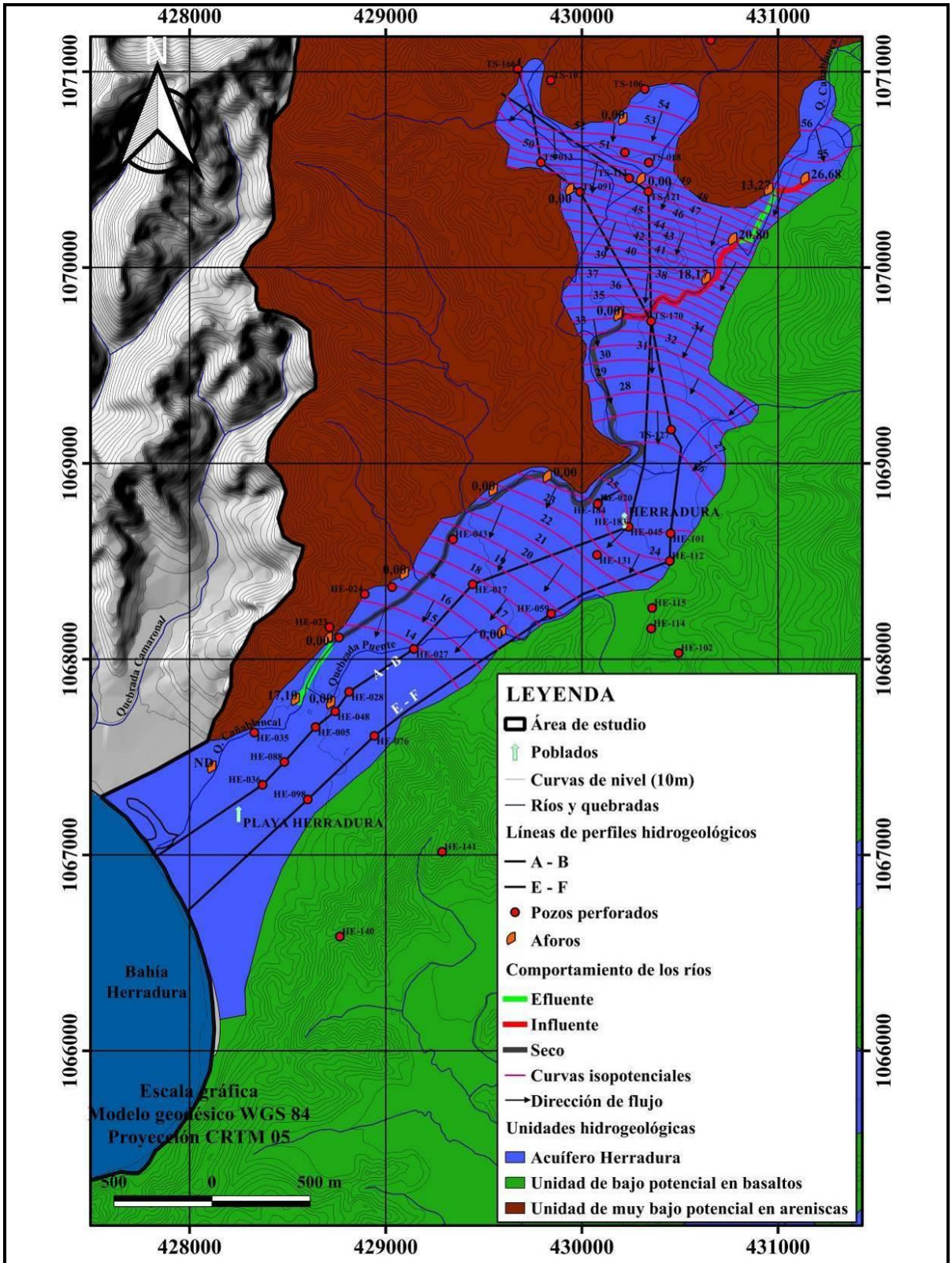


Figura 50 Mapa hidrogeológico local del sector de Herradura
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

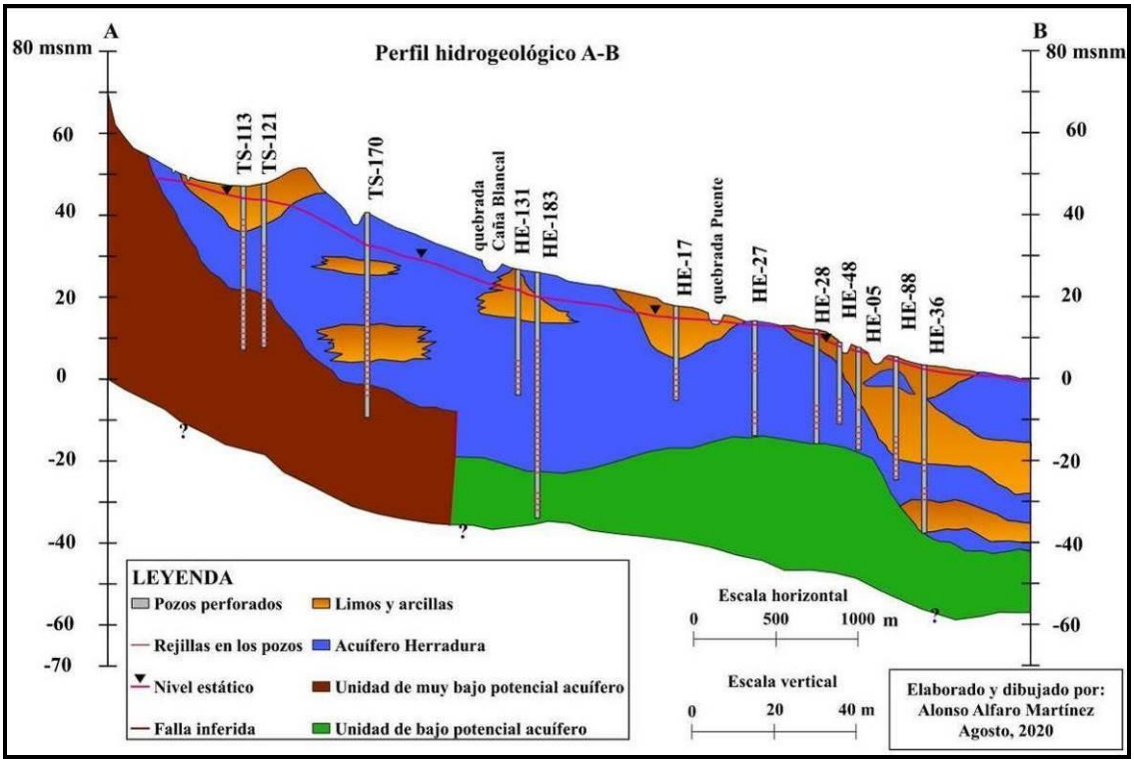


Figura 51 Perfil Hidrogeológico A – B

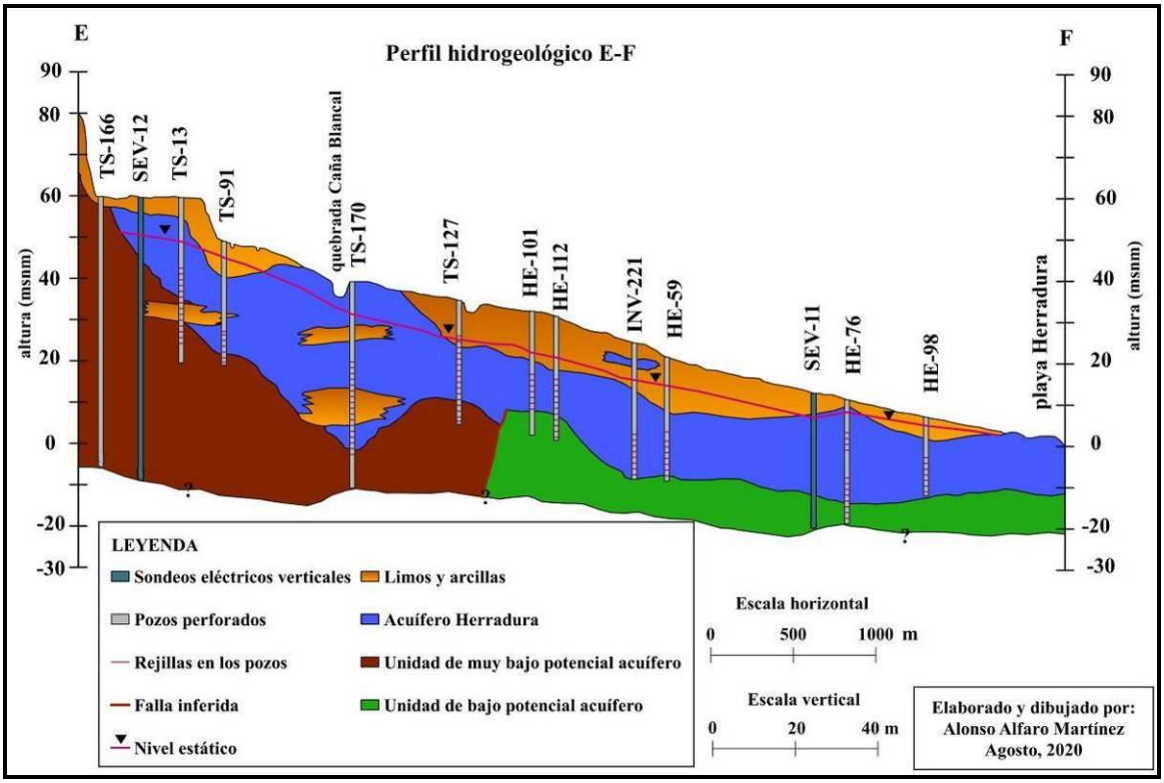


Figura 52 Perfil Hidrogeológico E – F

7.4 Acuífero Jacó

Para los depósitos cuaternarios de origen fluvial en la zona de Jacó se ha definido el acuífero Jacó que cubre un área de 10 km^2, desde la parte plana en la playa hasta los sectores del poblado de la Mona y la confluencia de la quebrada Blanca con el río Copey a una elevación de 60 metros sobre el nivel del mar en ambos lugares (Figura 54).

Los suelos en la parte superior de estos depósitos aluviales tienen espesores que oscilan entre los 0,30 a 0,60 metros; están conformados por arenas arcillosas y limos de alta plasticidad, la tasa de infiltración promedio es de 1,80 m/día ($2{,}08\times10^{-5}$ m/s), con base en cuatro muestras de suelo la porosidad promedio es de 32,47 % y la densidad aparente es 1,76 g/cm^3 (Anexo 5).

Luego de la capa de suelo en la parte superior se tiene unas capas de arenas finas y limos arenosos con un espesor promedio de 4 a 6 metros, de color gris a verde oscuro y en general son reportadas como de materiales de alta plasticidad ("arcillas") en las perforaciones realizadas en la zona de Jacó, situación muy similar a la información de las perforaciones realizadas en el sector de Herradura.

El acuífero está conformado por capas de origen fluvial de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas con intercalaciones de lentes de arenas finas, limos y arcillas de origen principalmente aluvial; estos sedimentos fueron depositados por la dinámica fluvial en las partes bajas de las microcuencas de las quebradas La Mona Doña María, Bonita y el río Naranjal, en el sector de la llanura aluvial de Jacó.

Arias y Morera (2000), con base en siete sondeos eléctricos verticales (SEV01 al SEV07 en la Tabla 9) definen para la zona de Jacó que en el panel de correlación se observan tres anomalías de resistividad menores a los 15 Ω-m, mismas que se han asociado con lentes arenosos saturados y que podrían corresponder con las mejores capas acuíferas productoras en el acuífero Jacó.

En los sondeos SEV9 y SEV10 (Tabla 9), las capas de los aluviones tienen resistividades con valores de 1594 Ω-m para unas gravas arenosas y 73 Ω-m para unas arenas y gravas saturadas respectivamente, de esta manera tenemos que para el acuífero Jacó las resistividades se consideran bajas debido a lo variable de las granulometrías y a la saturación con agua.

Analizando los afloramientos observados en el campo, la correlación e interpretación de los pozos perforados y los sondeos eléctricos verticales (Figura 55, Figura 56 y la Figura 57) se ha determinado un espesor para las capas de arenas y gravas de los depósitos aluviales que oscila entre los 23 a 25,25 metros y un espesor saturado con agua subterránea de unos 18 a 20 metros en promedio.

Con base en las mediciones de la red de monitoreo de los pozos perforados la profundidad del agua subterránea oscila entre los 4 y los 5 metros con el máximo en el mes de abril y el mínimo en el mes de noviembre como se muestra en el hidrograma del pozo HE-19 (Figura 53). La dirección del flujo del agua subterránea es hacia el suroeste descargando el agua subterránea en la playa Jacó, con un gradiente hidráulico de 0,01 (Figura 54).

De acuerdo al análisis de las pruebas de bombeo de los pozos (HE-16, HE-106, HE-68, HE-69 y el pozo HE-134) en la zona de Jacó se tiene una transmisividad (*T*) promedio de 1588,40 m^2/día ($5{,}04\times10^{-5}$ m^2/s), para una conductividad hidráulica (*K*) promedio de 79,42 m/día ($9{,}19\times10^{-4}$ m/s) de acuerdo con el espesor promedio de 20 metros.

Sustentado en las observaciones de campo y la observación de la profundidad de los niveles del agua subterránea a este acuífero conformado por arenas y gravas se les asigna una porosidad de un 25 % y un coeficiente de almacenamiento de un acuífero confinado (*S*) de 1×10^{-4} a partir de los valores para los acuíferos confinados (Fetter, 2000).

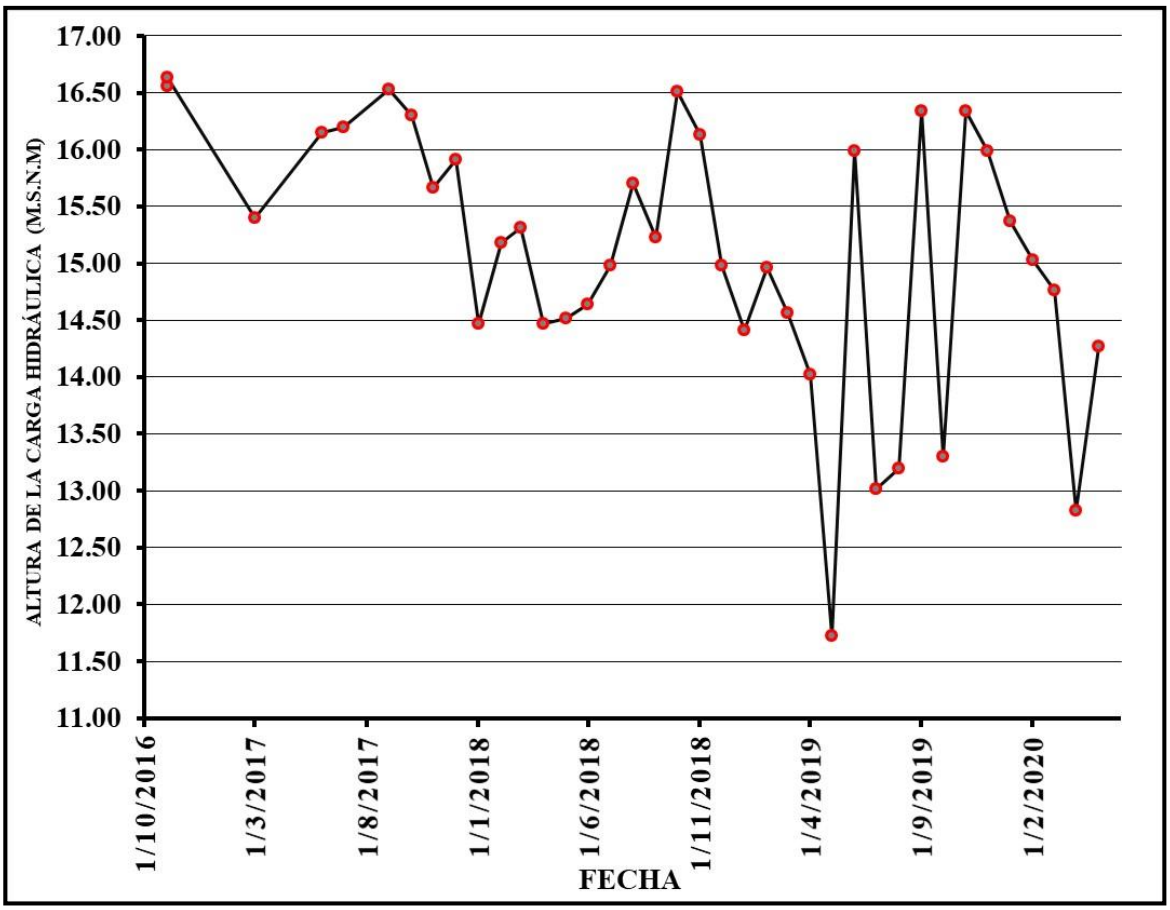


Figura 53 Gráfico de la variación del nivel de agua en el pozo HE-19 de la red de monitoreo en el sector de Jacó

El mecanismo de recarga del agua hacia el acuífero originado en las gravas a arenas en Jacó es de manera difusa pero directa por la infiltración de la precipitación con unos 1071 mm anuales; por medio de las ventanas o sectores en donde alas capas superiores de tienen texturas de arenas finas limpias o arenas medias ya que la capa no es constante y presenta discontinuidad laterales, así como también en los sectores de los pie de montes en los contactos entre los depósitos aluviales cuaternarios y las partes fracturadas y meteorizadas de los basaltos que le inyectan una recarga lateral.

Para este acuífero es muy importante los aportes de los flujos base de la quebrada Doña María y el río Copey, el cual brinda el principal aporte en la zona de la subcuenca del río Naranjal, ambos cursos superficiales recolectan mucha escorrentía y flujo base de los cerros al noreste y noroeste del sector de Jacó.

En la época seca el río Copey juega un rol fundamental en una recarga localizada hacia el acuífero, ya que tiene unos sectores de influencia que se determinaron con base en los aforos diferenciales en un tramo de aproximadamente 2 km sobre los depósitos aluviales en la zona NE de Jacó desde las coordenadas 433880E/1066755N donde se han aforado 77 litros por segundo hasta el sitio con la coordenada 432654E/1065573N en donde el río pierde por completo su caudal (Figura 54).

El río Copey a partir de la coordenada 432012E/1064822N inicia la efluencia de agua subterránea hasta la desembocadura en playa Jacó; así mismo también se tiene que a partir de este sector empieza la zona urbana de Jacó y se depositan directamente aguas residuales de tipo servidas en el cauce (Figura 54).

El proceso de descarga natural del acuífero es en el océano Pacífico en toda la zona de la playa de Jacó y por medio del flujo base de los ríos y quebradas en los sectores más cercanos a la playa. También se tiene la descarga artificial por medio de pozos perforados de los que se puede contabilizar un caudal de extracción de aproximadamente 153 litros por segundo (0,153 m^3/s) está información es con base en los datos del Archivo Nacional del SENARA y las concesiones otorgadas por la Dirección de Agua del MINE.

De esta manera las gravas y arenas de los depósitos cuaternarias aluviales en la zona de la planicie de Jacó se clasifican como un acuífero poroso confinado de un alto potencial; esto se refleja en los pozos que tienen un caudal promedio de extracción de 40 litros por segundo.

Este acuífero tiene una gran importancia en la economía local del sector de Jacó, ya que parte de la extracción y distribución de agua para consumo humano en la zona se hace por medio de pozos perforados del AyA, así como también de una toma de agua superficial en la parte alta de la subcuenca del río Copey en la quebrada Piedra Bruja.

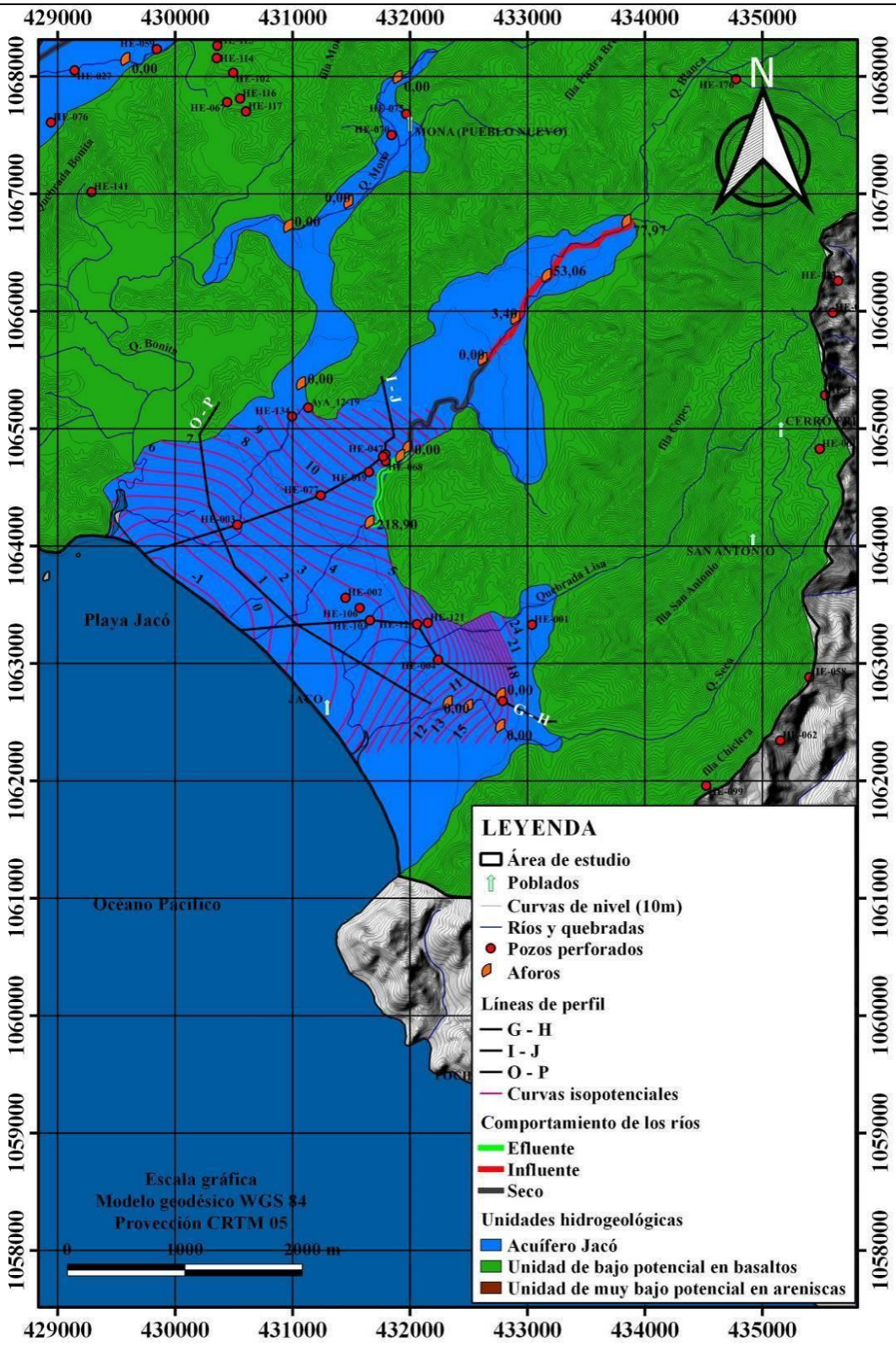


Figura 54 Mapa hidrogeológico local del sector de Jacó
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

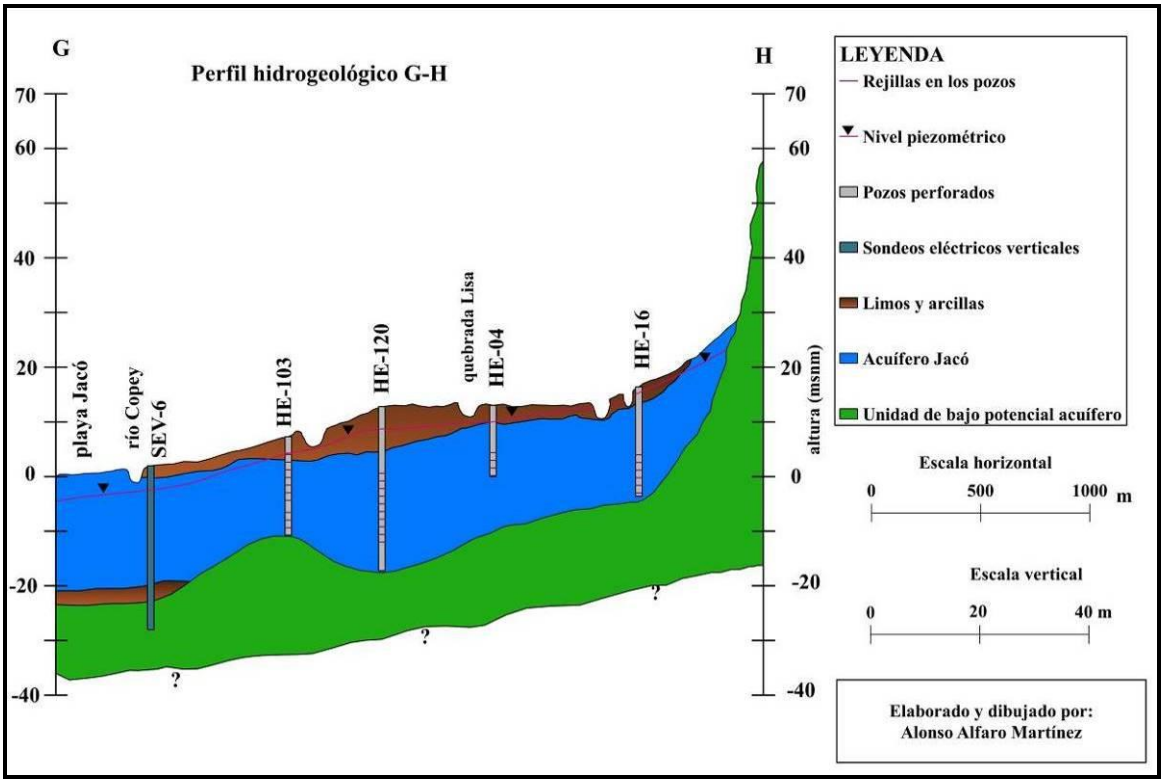


Figura 55 Perfil Hidrogeológico G – H

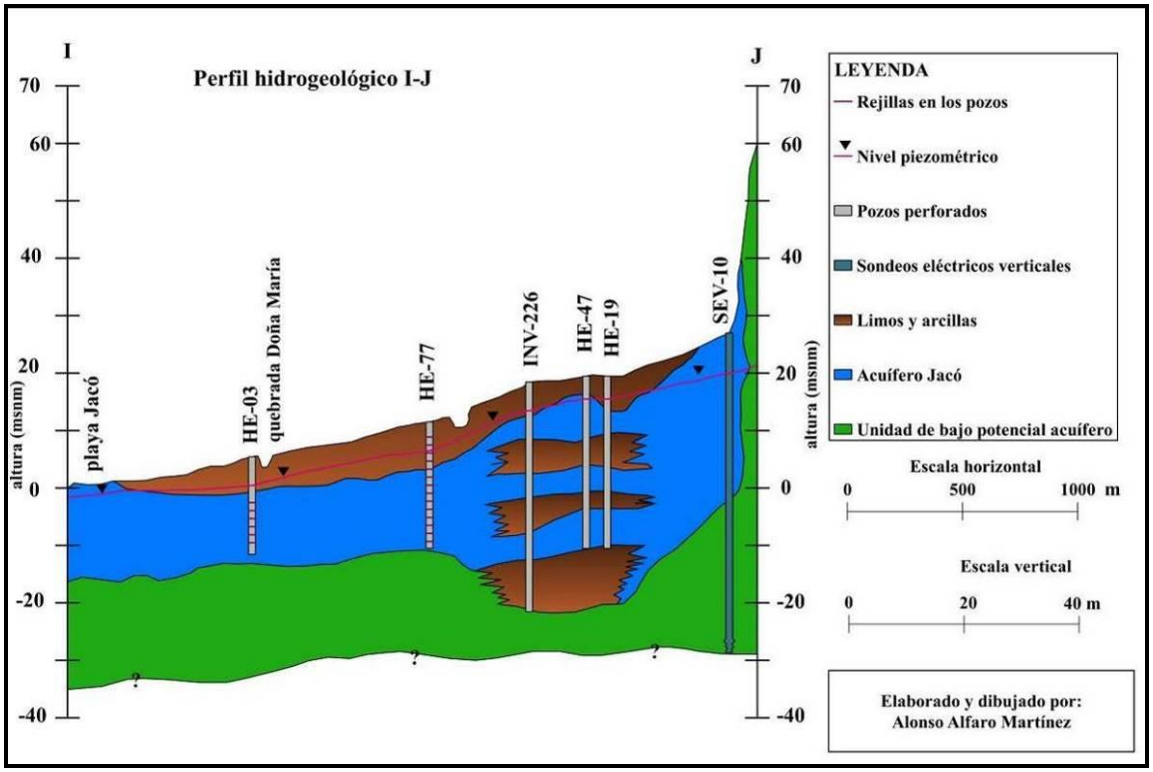


Figura 56 Perfil Hidrogeológico I – J

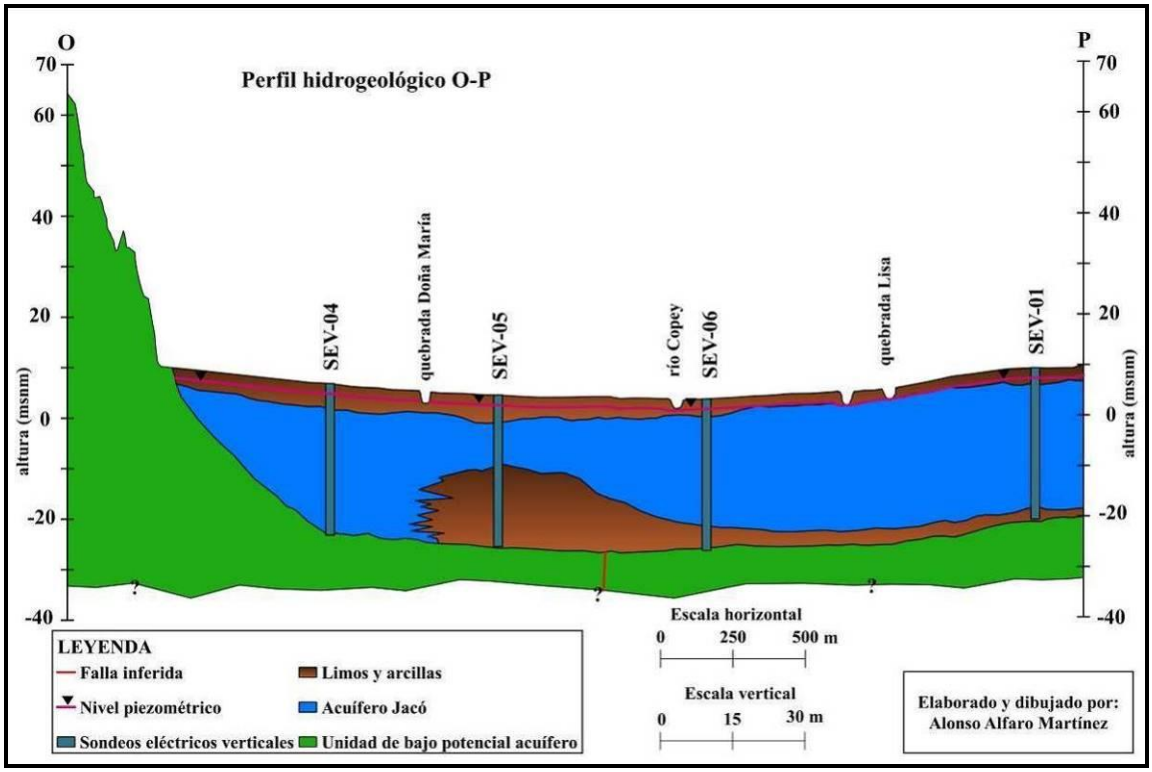


Figura 57 Perfil Hidrogeológico O – P

7.5 Barrera hidrogeológica – sistemas de fallas regionales

La falla inversa con componente de rumbo dextral que se localiza entre la zona de Herradura y Jacó (véase la Figura 5) se ha determinado como una barrera hidrogeológica negativa; por lo que se clasifica como una divisoria tanto hidrológica como hidrogeológica; delimitando muy bien la cuenca hidrogeológica del acuífero Herradura la cual es recargada por la cuenca de la quebrada Cañablancal y los depósitos que forman parte de la planicie aluvial del sector de Jacó, la cual es irrigada por los ríos y las quebradas de las microcuencas de la quebrada Doña María y el río Naranjal. Debido a la presencia de esta barrera hidrogeológica negativa es que el flujo del agua subterránea en el sector del centro del poblado de Herradura cambia de dirección de sur a un rumbo sur/suroeste hasta la descarga del agua subterránea en la zona de la playa Herradura (Figura 50). La presencia de esta estructura y el movimiento de esta originaron que se forme una zona de debilidad y morfológicamente se dieron las condiciones para que se depositaran de sedimentos de origen sedimentario y volcánico, con granulometrías de gravas, arenas y sedimentos finos como limos, arcillas y lentes de mezclas de arcillas.

8 MODELOS NUMÉRICOS DE LOS ACUÍFEROS HERRADURA Y JACÓ

Debido a que se han planteado dos modelos hidrogeológicos conceptuales que indican que el acuífero Herradura y el acuífero Jacó son dos sistemas hidráulicamente separados se procederá a realizar dos modelos numéricos, uno para el acuífero Herradura y otro para el acuífero Jacó.

Ambos modelos serán construidos en dos dimensiones (*x*,*y*), utilizando el método de diferencias finitas y se correrán en un estado estacionario utilizando el código *MODFLOW-2005* versión 1.12.00 (Harbaugh et.al., 2017) por medio de la interfase para uso gráfico *ModelMuse* (Wiston, 2009).

8.1 Acuífero Herradura

8.1.1 Dominio del modelo numérico y discretización horizontal

El dominio del modelo numérico del acuífero Herradura tiene una extensión con un área de 7,67 km^2 como se ilustra en la Figura 58 y la Figura 59 y el mismo está encuadrado entre las coordenadas de la siguiente tabla.

Tabla 20 Coordenadas de los vértices del dominio en la zona de Herradura

VÉRTICE	COORDENADAS (CRTM 05)
Norte	430080 - 1070738
Sureste	431406 - 1069774
Sur	428691 - 1066036
Suroeste	427364 - 1067000

La geometría del acuífero Herradura se ha simplificado en los sectores NE y SW como se muestra en la Figura 58, debido a que en los bordes de los Depósitos aluviales en el la zona NE no se cuenta con suficiente información de los espesores del aluvión cerca del contacto (pie de monte) con las areniscas y basaltos, y para el sector SW no se tiene suficientes datos de elevación cercanos a la zona de la costa; de esta manera la zona activa a modelar tiene un área de 3,97 km^2 para la cual se definen los siguientes límites:

i. La superficie del terreno se importó del modelo de elevación digital (celdas de 10 x 10 m) del archivo en formato raster creado en el programa QGis 3.10.
ii. El sector de la Playa Herradura-océano Pacífico al sur y el SW.
iii. Los basaltos del Complejo de Nicoya en la zona sur y SE.
iv. Las areniscas de la fm. Punta Carballo al norte y la zona NW del dominio.

Se define un tamaño de celda uniforme con un ancho y largo (Δ_x, Δ_y) de 20 metros y con un área 400 m^2 para cada celda. Dentro del dominio se tienen 98 columnas orientadas NE-SW y 286 filas orientadas NW-SE para un total de 28028 celdas; específicamente la zona activa tiene un total de 9928 celdas.

Para mejorar la ubicación en los ejes del acuífero Herradura a modelar de forma simplificada y con el objetivo principal de que el eje *x* sea paralelo a la dirección principal del flujo del agua subterránea se hizo una rotación de 36° (rumbo 36°) del dominio y la zona activa, lo descrito anteriormente se muestra en la Figura 58 así como también en la Figura 59.

8.1.2 Capas del modelo

La discretización vertical será en dos capas que se describen a continuación:

1. La capa superior denominada ***Arenas finas*** con un espesor constante de siete metros por debajo de la superficie del terreno y se definió un modo *convertible*, lo que significa que el código Modflow define el tipo análisis y la clase de acuífero (libre o confinado) que ejecuta en la capa resolviendo el código; esto con base en las características geométricas e hidráulicas que se le definan a la capa.

2. La capa inferior denominada ***Aluvión*** que consiste propiamente del acuífero Herradura está conformado por las intercalaciones de gravas, arenas y sedimentos finos, cuyo espesor promedio con base en el modelo hidrogeológico conceptual es de 31 metros, sin embargo para el modelo numérico el espesor es variable con base en los análisis de los afloramientos, los pozos perforados y los perfiles hidrogeológicos en donde se obtuvo el

valor de la elevación sobre el nivel del mar del contacto del aluvión con el basamento (areniscas y basaltos) y luego se hizo un modelo de interpolación para definir su geometría (Figura 60), por lo que el espesor es variable, a esta capa se le asigna en el MODFLOW una característica confinada.

En la Figura 61 se muestra de manera esquemática un corte transversal del dominio activo del modelo numérico, con el espesor de la capa de *Arenas finas* y de la capa de *Aluvión*, esto para la zona activa definida.

8.1.3 Asignación de propiedades para las capas del modelo

Conductividad hidráulica

Los parámetros asignados para las dos capas del modelo son los siguientes:

Tabla 21 Valores de la conductividad hidráulica para las capas del modelo

CAPA	NOMBRE	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)
Superior	Arenas finas	$5{,}00\times10^{-5}$	$5{,}00\times10^{-5}$	$5{,}00\times10^{-6}$
Inferior	Aluvión	$5{,}81\times10^{-4}$	$5{,}81\times10^{-4}$	$5{,}81\times10^{-5}$

Para la capa superior denominada *Arenas finas* el valor de $5{,}00 \times 10^{-5}$ m/s se ha asignado con base en el valor medio de conductividad hidráulica para arenas finas limpias y limos arenosos según Freeze y Cherry (1979). El valor de $5{,}81\times10^{-4}$ m/s para la capa inferior de *Aluvión* se definió con base en el modelo hidrogeológico conceptual para las intercalaciones de gravas, arenas y sedimentos finos de los aluviones, para ambas capas la conductividad hidráulica en los ejes *x* y *y* se asumen iguales y la conductividad en el eje *z* se asume diez veces menor.

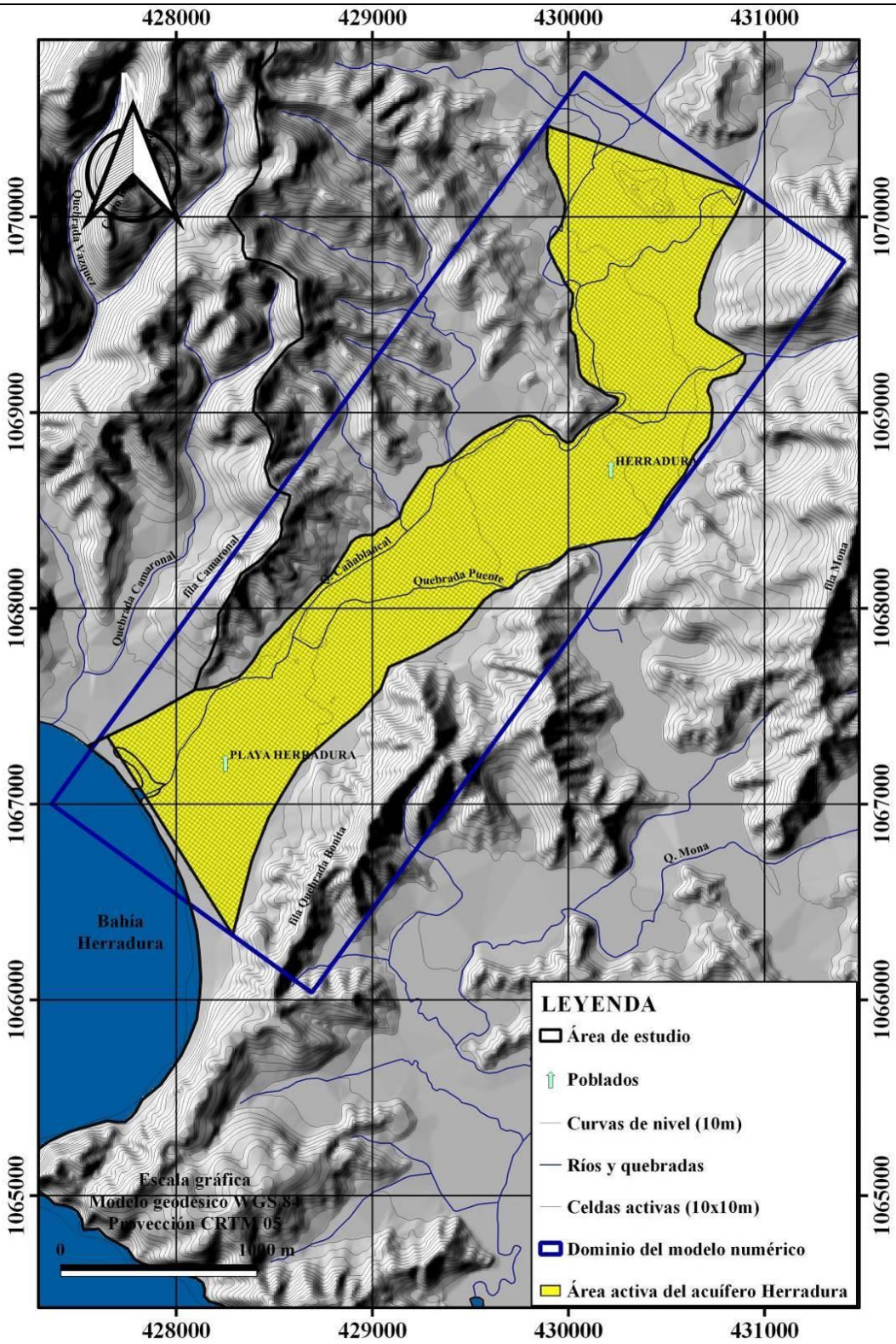


Figura 58 Mapa del dominio y la zona activa a modelar en el acuífero Herradura
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

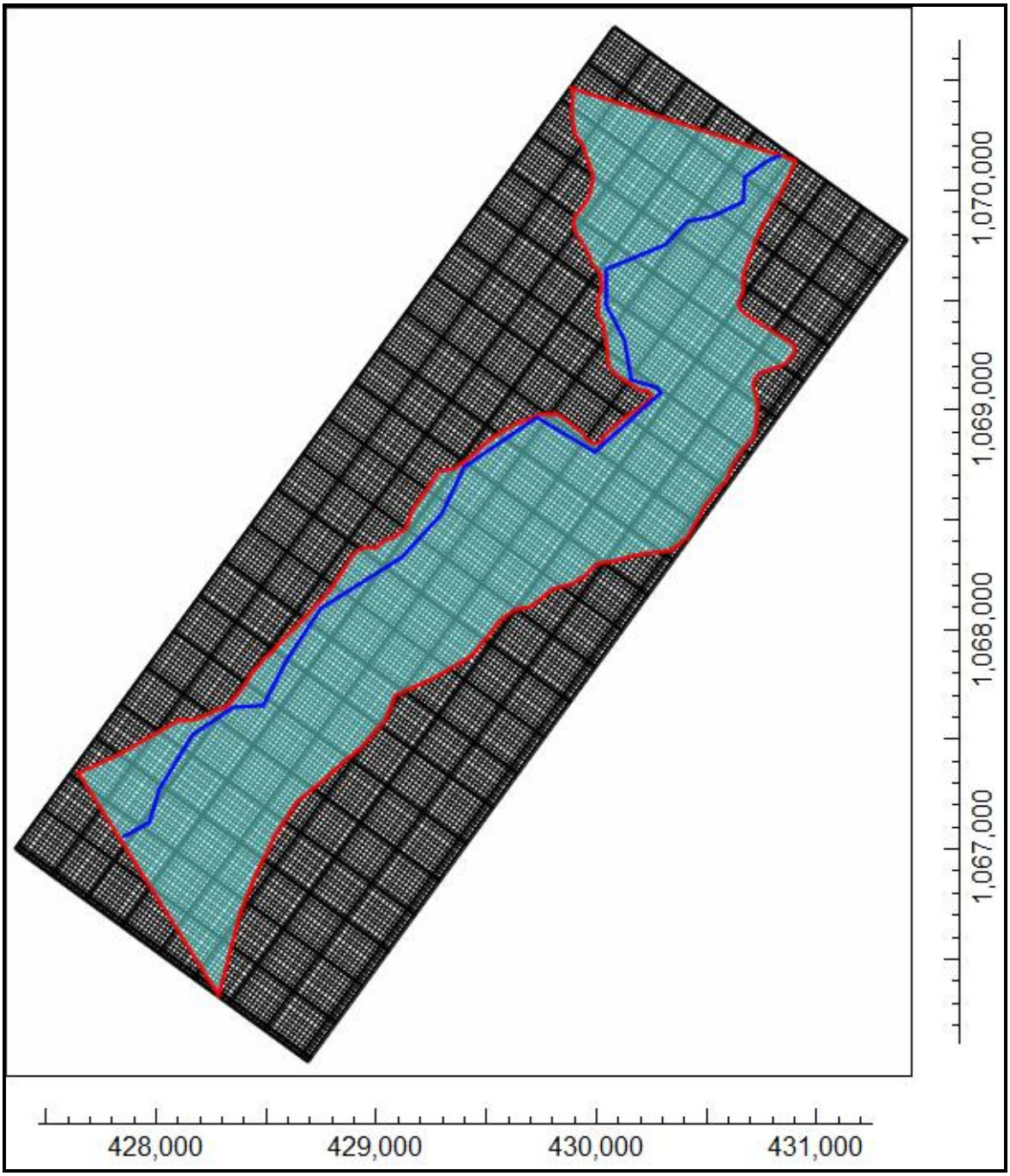


Figura 59 Mapa local del dominio, las celdas inactivas (color gris) y activas (color celeste) dentro del contorno rojo en el acuífero Herradura, el tamaño de celda es de 400 m^2

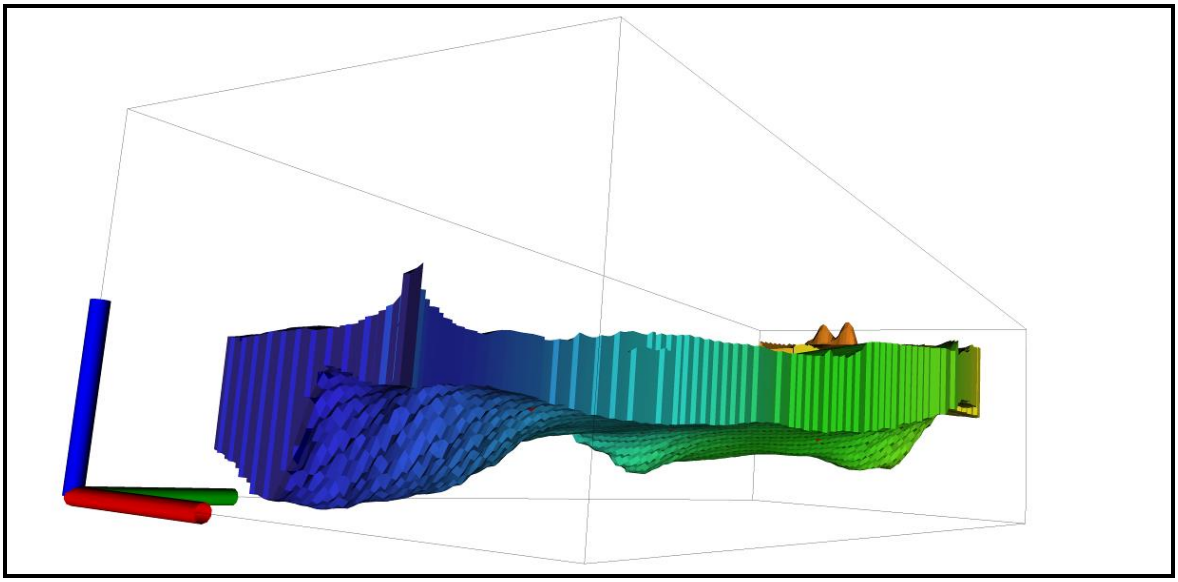


Figura 60 Corte esquemático donde se observa el piso de la capa de aluvión en el acuífero Herradura, nótese el espesor variable y la distribución espacial del piso

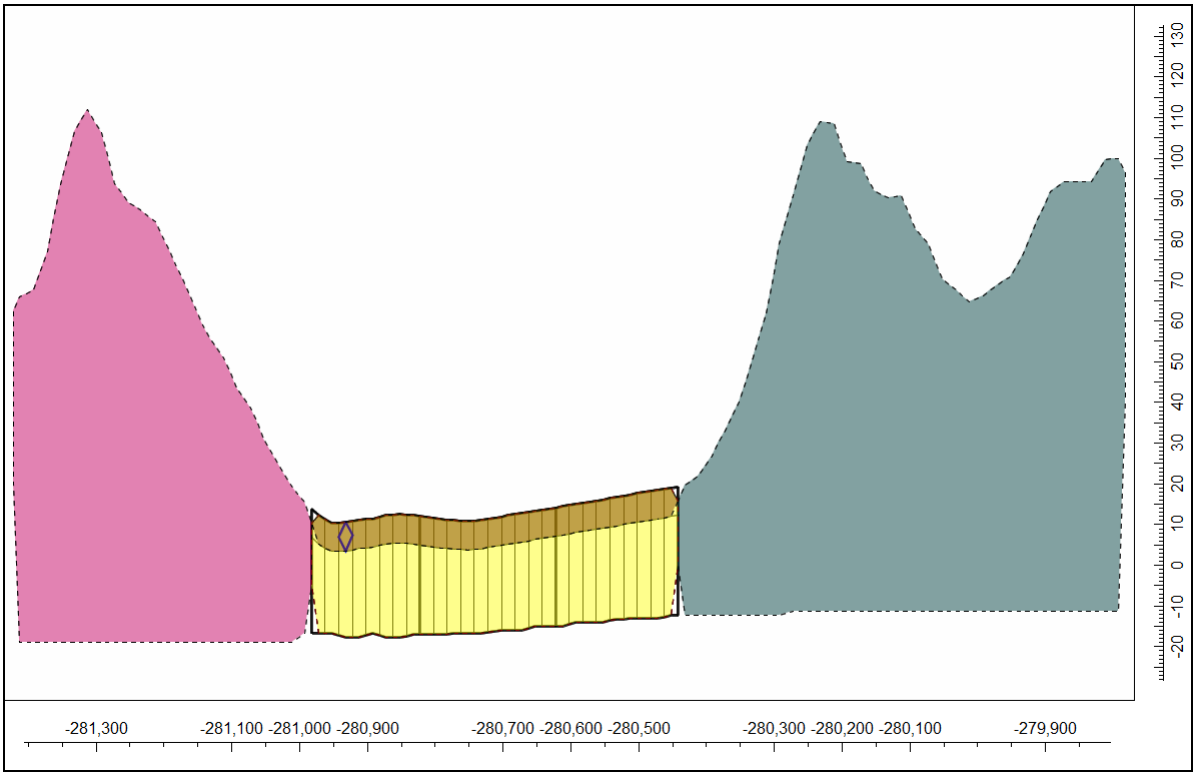


Figura 61 Corte esquemático donde se muestra el espesor de las dos capas (Arenas finas en la parte superior de color café y Aluvión en la parte inferior de color amarillo) del modelo numérico dentro de la zona activa (líneas verticales) en el acuífero Herradura

Coeficiente de almacenamiento y porosidad

Los parámetros asignados para ambas capas se indican en la siguiente tabla son los siguientes:

Tabla 22 Valores del coeficiente de almacenamiento (*S*) y porosidad (*n*) para las capas del modelo

CAPA	NOMBRE	S	n
Superior	Arenas finas	NA	0,28
Inferior	Aluvión	0,06	0,25

NA = no aplica

El valor de las porosidades y del coeficiente de almacenamiento asignados en la tabla anterior fueron definidos en el modelo hidrogeológico conceptual (sección 7.3), sin embargo se destaca que debido a que el modelo se correrá en modelo estacionario los valores de porosidad y coeficiente de almacenamiento no serán utilizados por el código MODFLOW para calcular las cargas hidráulicas en el acuífero Herradura.

8.1.4 Condiciones de frontera

Se han definido las siguientes condiciones de frontera dentro del domino del modelo en el sector de Herradura:

Sectores inactivos sin flujo

La formación Punta Carballo y el Complejo de Nicoya se ha determinado como unidades de no flujo y por lo tanto corresponden a las zonas no activas del modelo (Figura 59). Para esta investigación se hace el supuesto de que no se tiene aporte de recarga lateral de las areniscas y basaltos hacia las gravas y arenas de en los aluviones.

Recarga potencial

Para al acuífero Herradura se ha definido una recarga potencial de 1031,53 mm/año con base en metodología de Schosinsky (2006) que equivale a $3{,}27\times10^{-8}$ m/s, este valor se introduce por medio de la asignación del valor a un polígono en la parte superior de las celdas activas del dominio.

La quebrada Cañablancal

Como se ha constatado en el trabajo de campo y los aforos diferenciales la mayor parte de las quebradas afluentes y de corta distancia en la zona de Herradura se mantienen sin agua en el pico de la época seca; por lo tanto para efectos de simplificar el modelo numérico solo se utilizará el cauce principal de la quebrada Cañablancal, la cual es la única que conserva flujo de agua en algunos sectores en la época seca y es el principal cuerpo de agua de la microcuenca. Para esta quebrada se le asignó una conductancia de $8{,}50\times10^{-3}$ m^2/s; la configuración de la superficie del espejo de agua es a 2,50 metros de profundidad con respecto a la superficie del terreno y el fondo del cauce a 3 metros de profundidad, para una columna de agua constante en la quebrada de 0,50 metros. Durante la construcción del modelo se planteó utilizar la quebrada como una con *carga general* o como un *drenaje* del sistema, sin embargo los mejores resultados en la convergencia se obtuvieron como un *río* en la configuración del MODFLOW para la quebrada Cañablancal.

Borde de carga constante con valor cercano a 0 m.s.n.m en el sector costero de la playa Herradura

La carga hidráulica del modelo cercana al mar se definió con base en la información de campo, con mediciones y observaciones en los sitios de las diferencias de niveles existentes entre el terreno y el nivel del agua, de esta manera se configuró a una profundidad de 2 metros por debajo de la superficie del terreno llegando casi a una carga constante cercana a los 0 metros sobre el nivel del mar, esto se ilustra de manera esquemática en la siguiente figura:

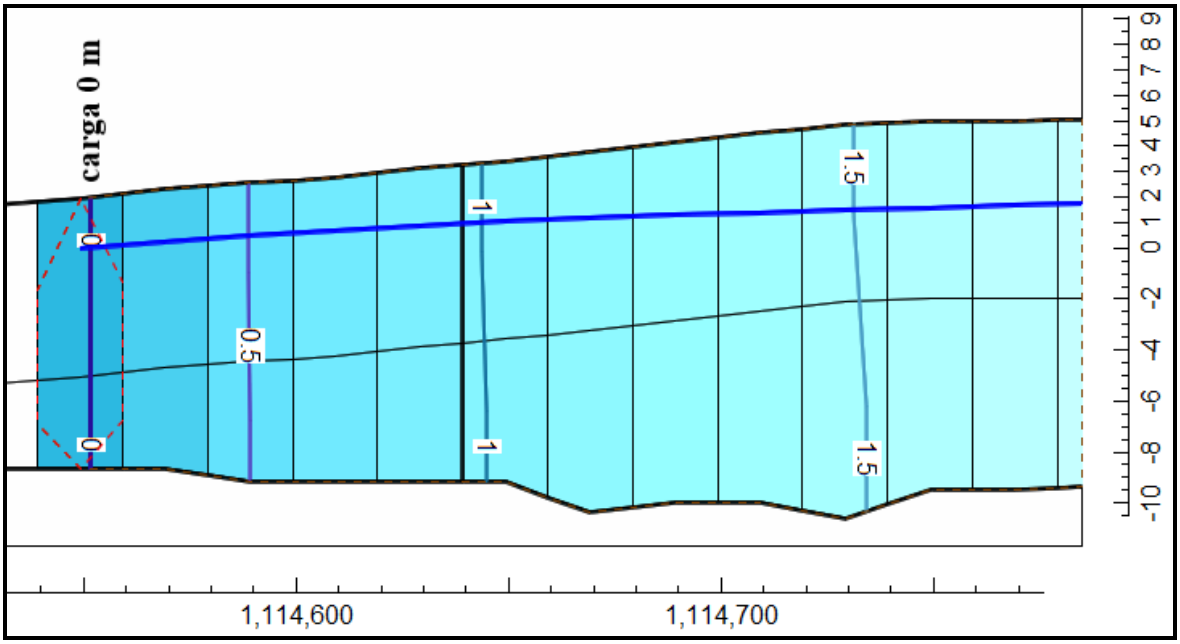


Figura 62 Esquema de la configuración de la carga constante cercana 0 metros sobre el nivel del mar (línea punteada de color rojo en la franja vertical de color azul) en el sector cercano a la costa en la playa Herradura

Pozos de extracción

De acuerdo a la información de la base de datos del SENARA y las concesiones otorgadas del registro de la DA del MINAE, se procedió a incluir en el modelo numérico la extracción de agua subterránea por medio de 22 pozos perforados que están en la Tabla 23, los pozos se configuraron para que la extracción de agua sea de la capa inferior del *Aluvión*.

El dato de caudal negativo significa por convención en modelación numérica una extracción de agua del sistema acuífero; el total los pozos suman un caudal de 0,196 m^3/s (196,66 l/s) de extracción de agua subterránea. Con los datos de la Tabla 23 se creó un archivo tipo *shape* en el sistema de información geográfica QGis el cual luego fue importado en el programa ModelMuse y configurado en el paquete de *pozos* en el MODFLOW.

Tabla 23 Pozos de extracción en el sector activo de modelación en el acuífero Herradura

POZO	PROPIETARIO	X (LOG)	Y (LAT)	Q (m^3/s)
HE-005	PYA, SUENOS DEL HERRADURA	428642	1067653	-0,0350
HE-017	MULTI INV DE JACO SA	429443	1068382	-0,0038
HE-020	ASADA HERRADURA 1	430082	1068797	-0,0097
HE-024	MARINA DE HERRADURA S.A.	428893	1068332	-0,0045
HE-027	MARINA HERRADURA	429143	1068052	-0,0180
HE-028	MARINA HERRADURA	428813	1067833	-0,0300
HE-035	SOC USUARIOS SUENOS HERREDURA	428330	1067625	-0,0095
HE-043	HELIOS FERILAN INVERSIONES SA	429343	1068612	-0,0025
HE-045	ASADA HERRADURA 2	430236	1068677	-0,0224
HE-048	INVERSIONES SANDER DE JACO SA	428742	1067733	-0,0020
HE-059	BANCO CUSCATLAN DE COSTA RICA	429843	1068232	-0,0080
HE-071	NOVAMENT S,A	429032	1068368	-0,0150
HE-076	BANCO BANEX SA	428942	1067608	-0,0070
HE-080	NOVANETT SA	428762	1068110	-0,0150
HE-088	JMJ Y ASOCIADOS DE PACIFICO SA	428483	1067475	-0,0020
HE-098	ESTAMOS QAP SA	428602	1067283	-0,0009
HE-101	LUIS FERNANDO LEON ALVARADO	430452	1068642	-0,0015
HE-112	LUIS FERNANDO LEON ALVARADO	430448	1068501	-0,0042
HE-168	ASADA HERRADURA 3	429035	1068028	-0,0008
HE-131	PLAZA HERRADURA SA	429806	1068326	-0,0030
TS-091	COMPACTADORAS DE CENTROAMERICA SA	429991	1070386	-0,0009
TS-127	LORIA DELGADO SA	430455	1069172	-0,0010
TOTAL				**-0,1966**

Las condiciones de frontera establecidas para el modelo numérico de Herradura se exponen en la Figura 63, en donde se ilustra la carga constante cercana al mar, el cauce de la quebrada Cañablancal, la recarga en la superficie del terreno y los pozos extrayendo agua subterránea de la capa inferior de *Aluvión*.

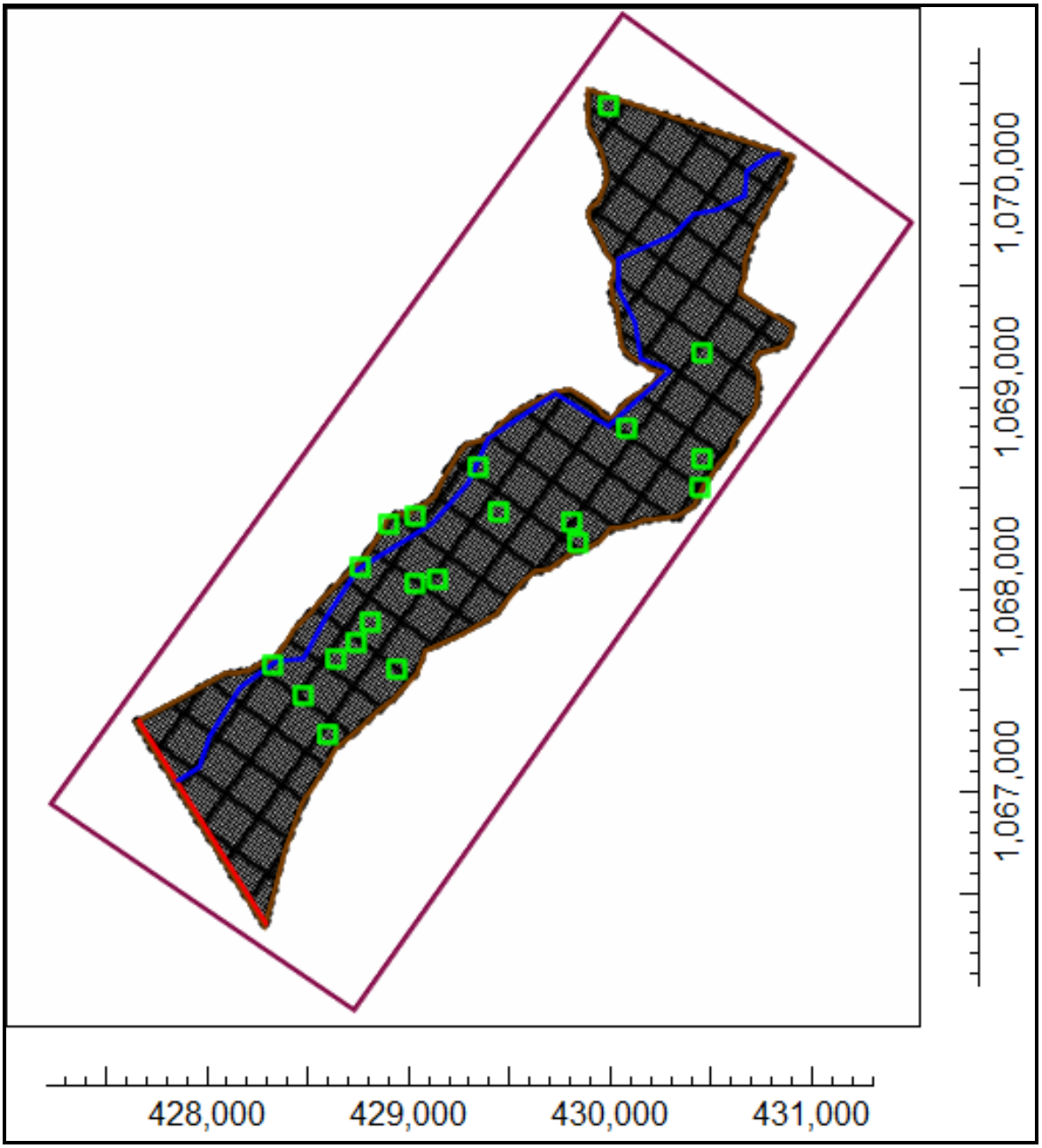


Figura 63 Geometría de la carga constante cercana al mar (línea en color rojo), la quebrada Cañablancal (color azul), la recarga en rectángulo con color morado en el borde y los pozos de extracción que son los puntos en color verde

8.1.5 Tiempo de modelación

El modelo numérico para el acuífero Herradura considera el caso del estado *estacionario (steady state* por sus siglas en ingles*)*, por lo que la configuración que utiliza el programa de cómputo ModelMuse es que el tiempo inicial de -1 s y tiempo final de 0 s para el escenario actual, en el que se consideraron las condiciones de frontera del acuífero.

8.1.6 Modelo numérico del acuífero Herradura en el escenario climático al año 2019

Se presentan a continuación la discusión de los resultados obtenidos para el modelo numérico del acuífero Herradura en el marco del escenario climático al año 2019 y las condiciones de frontera definidas.

Dirección de flujo y cargas hidráulicas

En la capa superior del modelo numérico denominada como *Arenas finas* las líneas isopotenciales muestran, para el pico de la época lluviosa y la recarga total anual de $3{,}27\times10^{-8}$ m/s las zonas de influencia y efluencia de la quebrada Cañablancal como se puede observar en la Figura 64, estas zona tienen una buena correlación con los datos de los aforos diferenciales que se hicieron en la quebrada Cañablancal durante el mes de mayo del 2020 (sección 5.5). Sin embargo de debe tomar en cuenta que los aforos se realizaron en el pico de la época seca en el año 2020 y en el modelo los sectores de influencia y efluencia se obtienen con el total de la recarga potencial para los meses de setiembre y octubre, es por ello que en el mapa de la Figura 64 se muestran más sectores en la relación quebrada-acuífero que en el mapa de aforos diferenciales plasmados en la Figura 32.

Con estos resultados se vuelve fundamental el monitoreo de la calidad de agua de la quebrada Cañablancal ya que su influencia es directa al acuífero y podría afectar la calidad del aguas de las reservas subterráneas.

Así mismo en la misma Figura 64 se muestran sectores en donde el modelo numérico revela las celdas que se secan con base en las propiedades hidráulicas de dicha capa en el sector norte y noreste de Herradura, de acuerdo con el espesor promedio de 7 metros, la conductividad hidráulica definida y la configuración establecida.

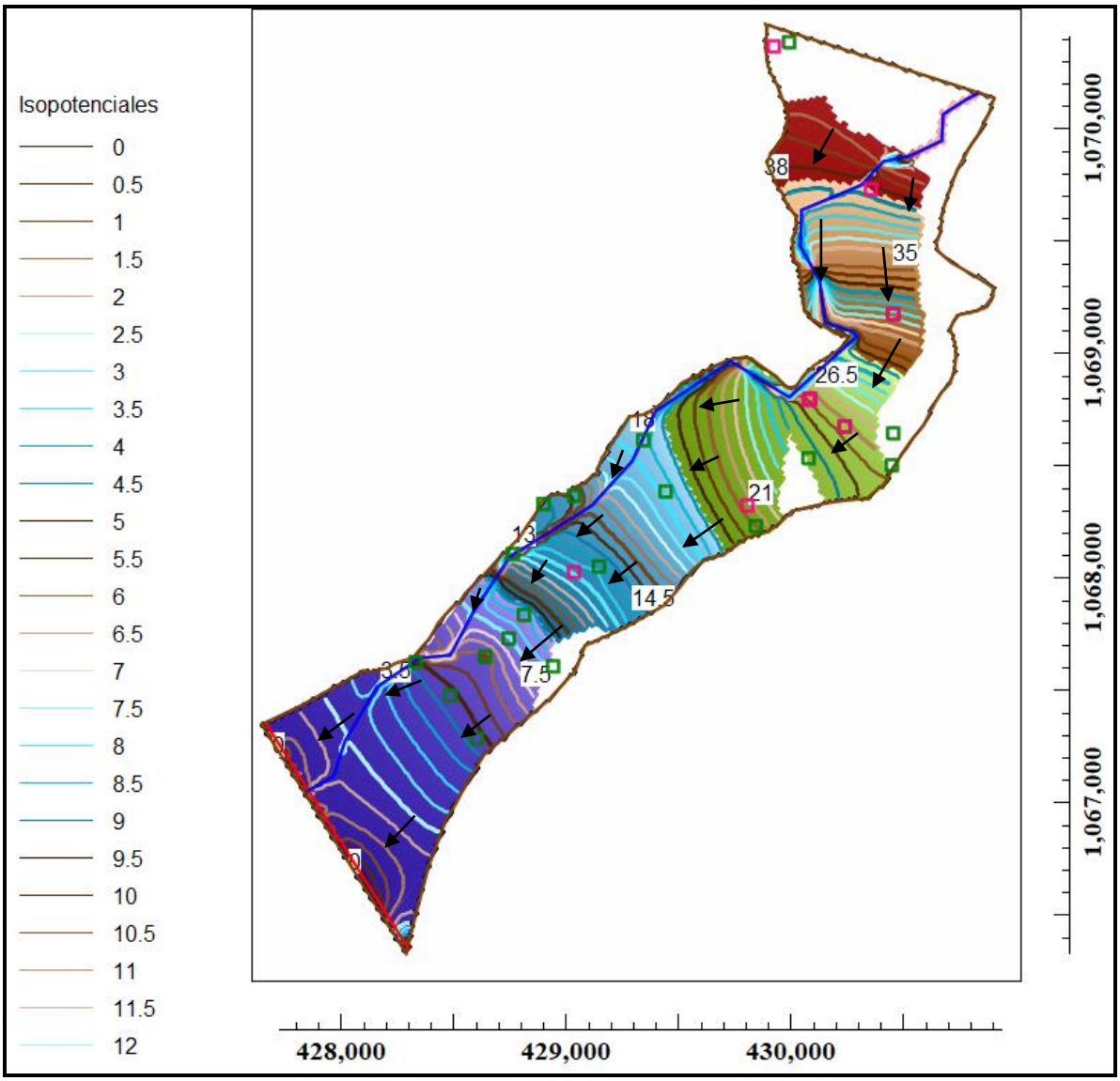


Figura 64 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa superior de Arenas finas en el Acuífero Herradura (las celdas blancas dentro de la zona activa están secas)

En la capa inferior de *Aluvión* las celdas todas están saturadas para la configuración actual de los parámetros hidráulicos definidos, el modelo numérico para las cargas hidráulicas del agua subterránea muestra un resultado de un gradiente de promedio de 0,01

- 0,03 con dirección sur y suroeste para descargar en la zona de la playa Herradura, esto se ilustra en la Figura 64 así como en la Figura 65.

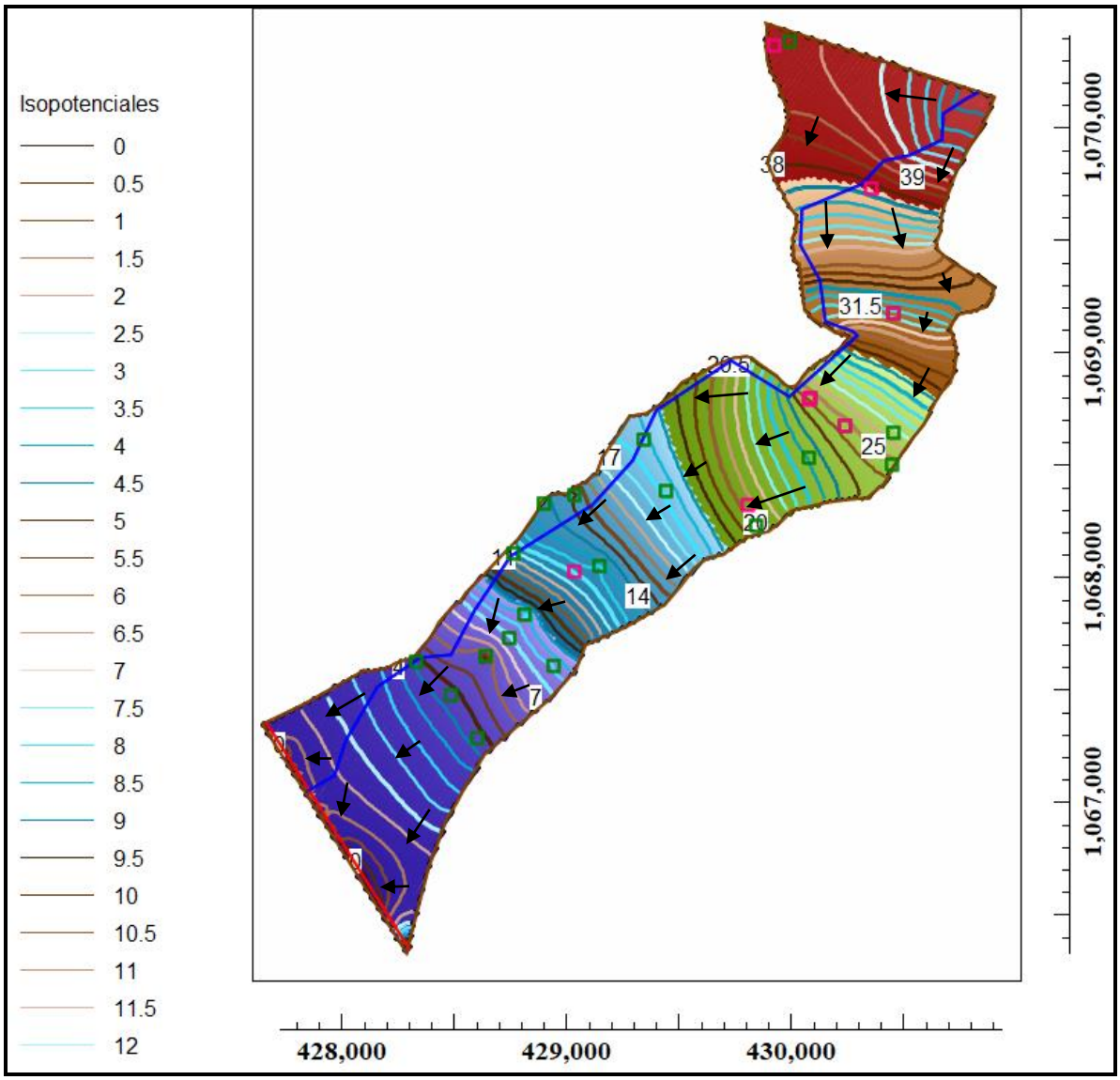


Figura 65 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa de Aluvión en el Acuífero Herradura

Para analizar las cargas hidráulicas modeladas se definieron siete líneas de perfil en la zona activa del modelo en el acuífero Herradura, cuatro líneas son perpendiculares a la dirección del flujo con orientación NW-SE y tres perfiles transversales la dirección del flujo del acuífero con rumbo NE-SW; la ubicación de las líneas de perfil está en la siguiente figura:

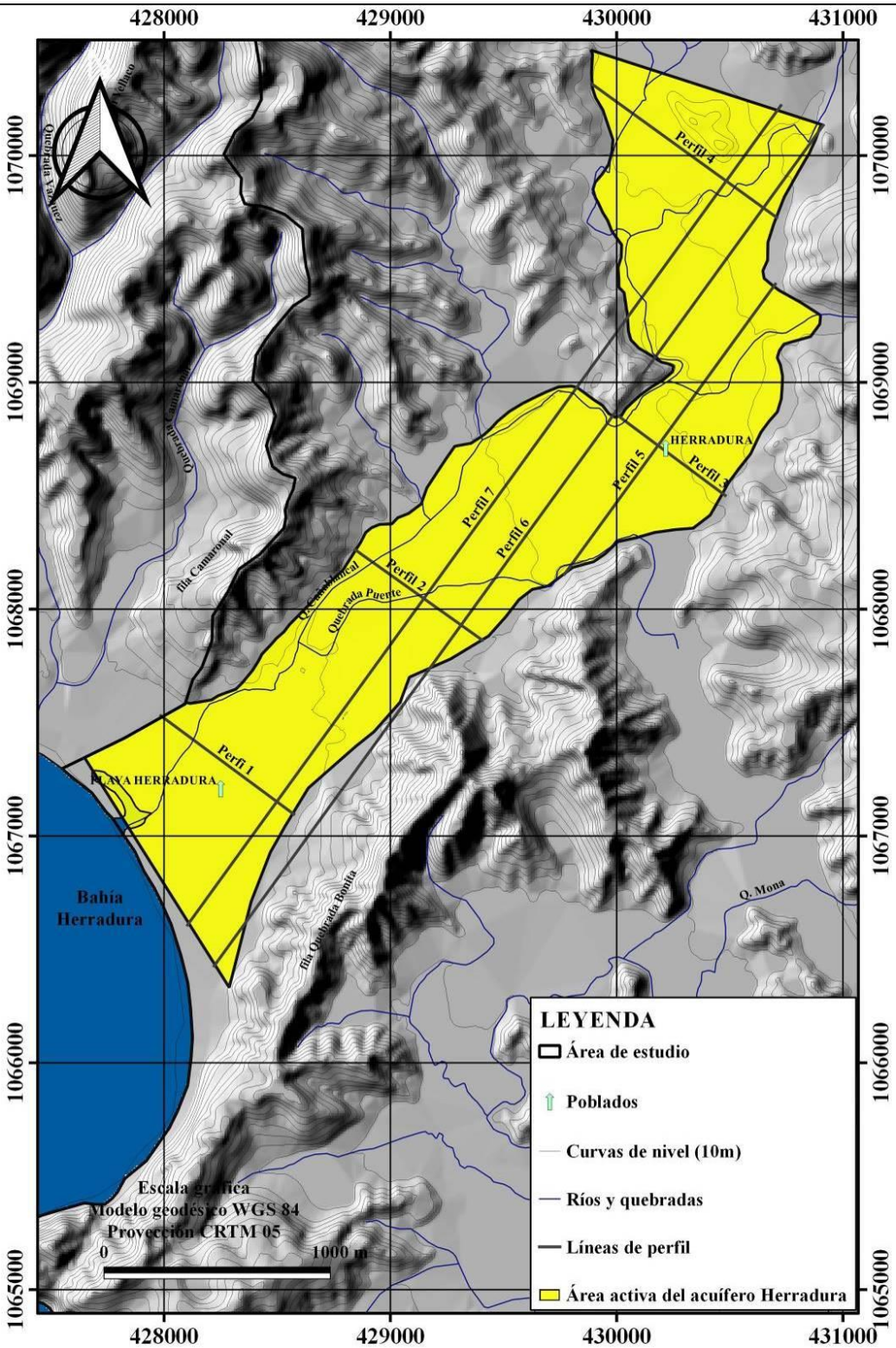
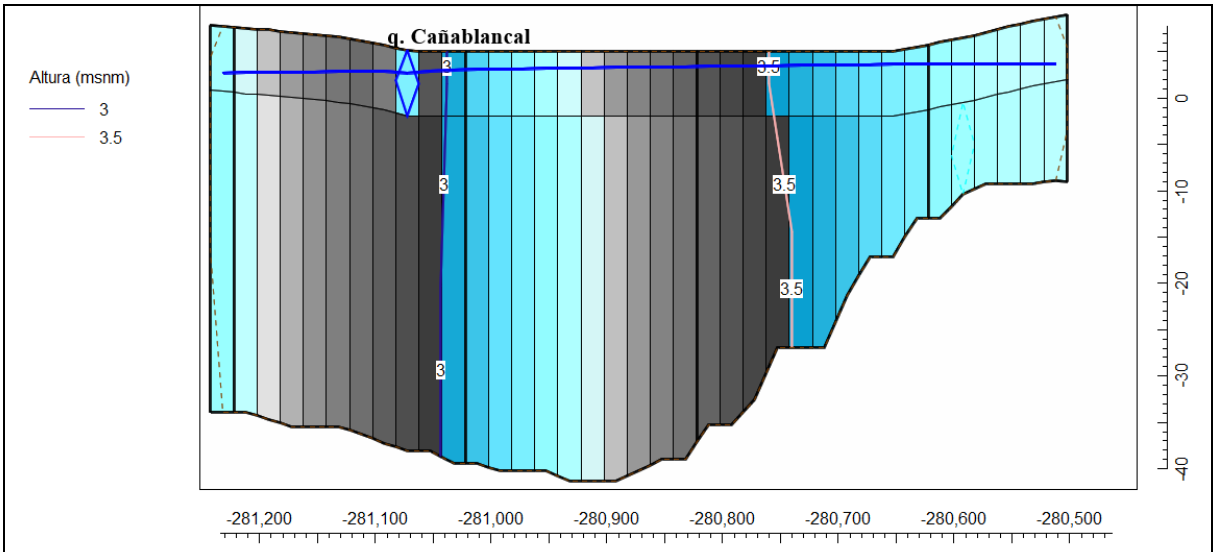
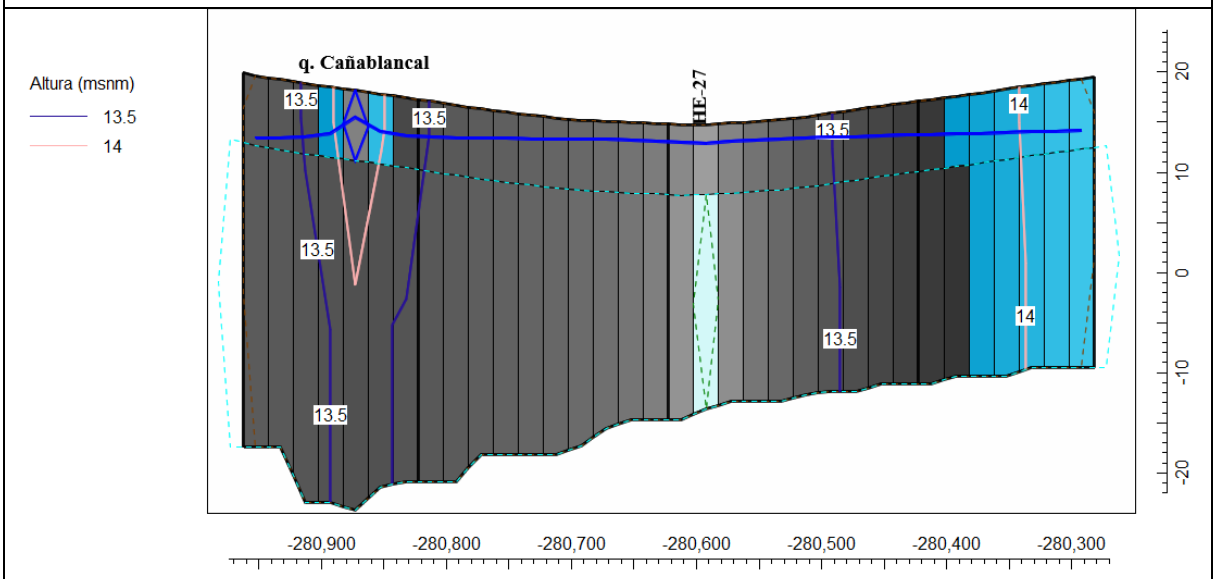


Figura 66 Mapa de ubicación de las líneas de perfil, modelo numérico Herradura
Dibujado y elaborado por: Alonso Alfaro Martínez

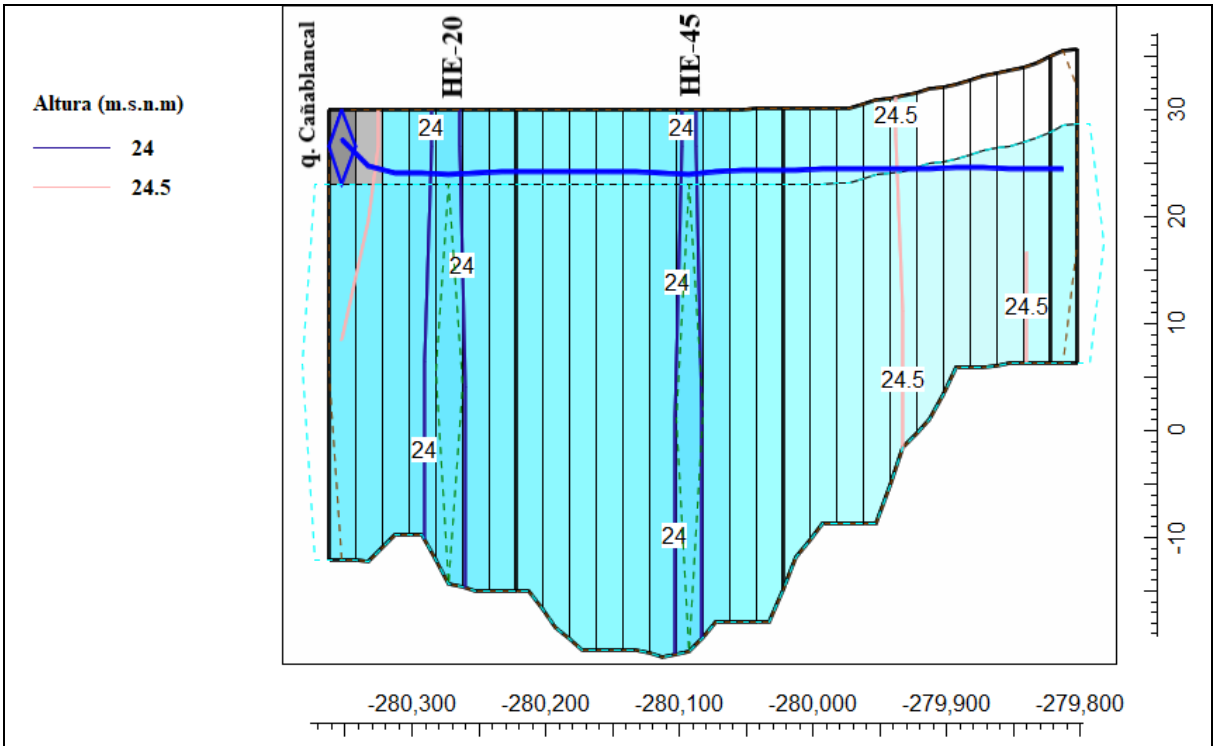
La Figura 67 contiene los siete perfiles obtenidos en el modelo numérico en el acuífero Herradura:



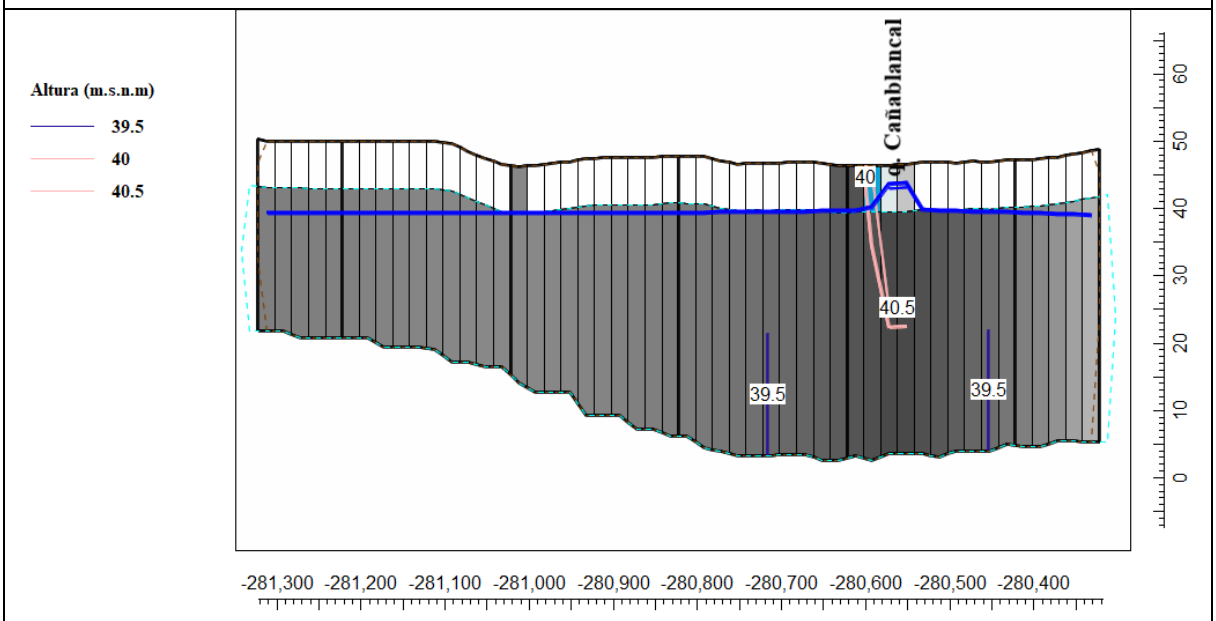
A) Perfil 1



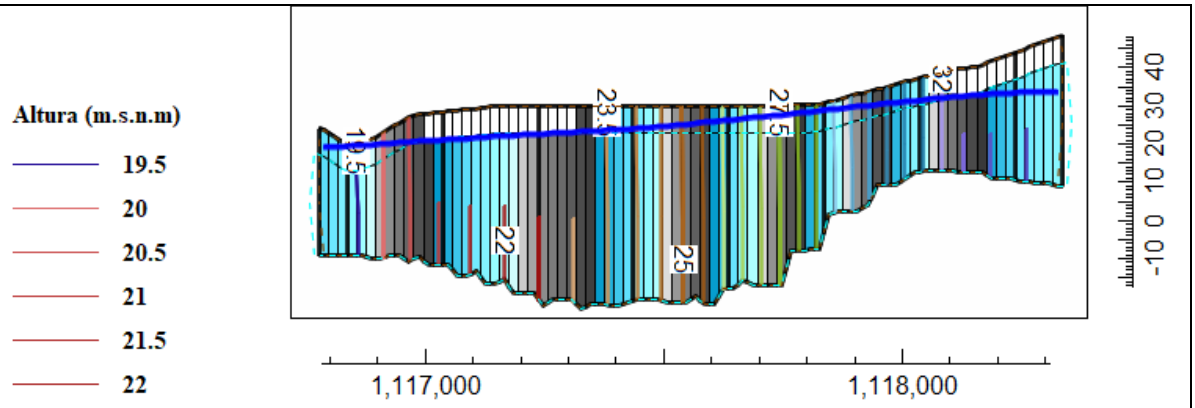
B) Perfil 2



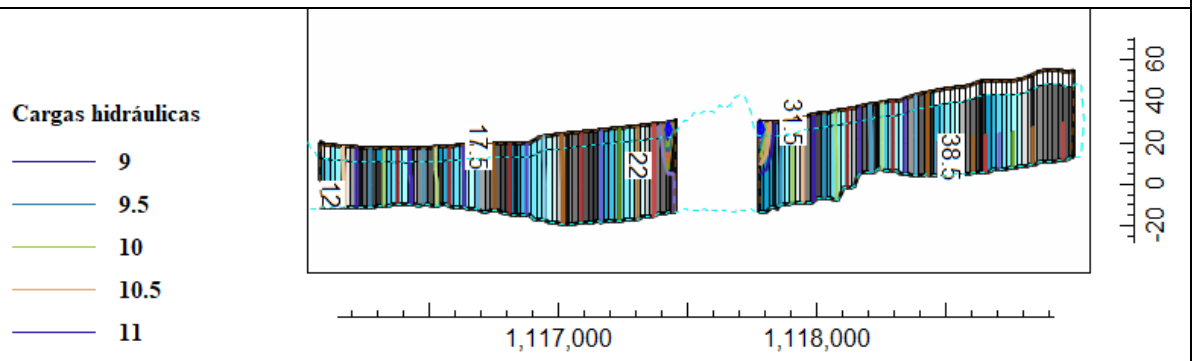
C) Perfil 3



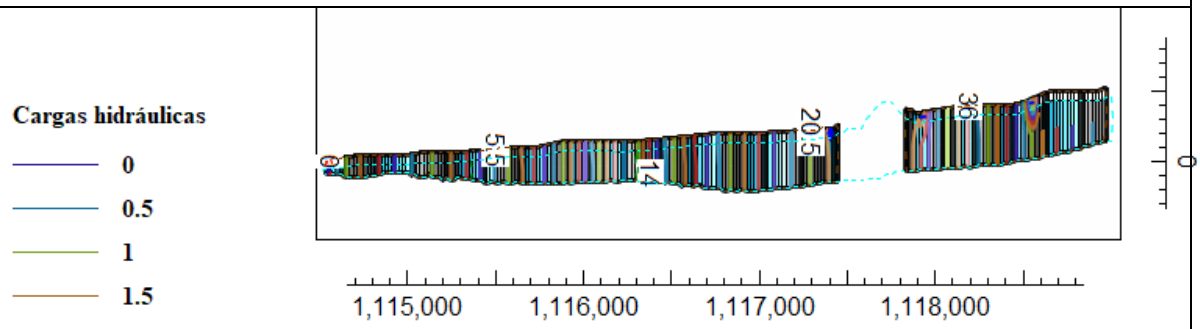
D) Perfil 4



E) Perfil 5



F) Perfil 6



G) Perfil 7

Figura 67 Perfiles hidrogeológicos con las cargas hidráulicas en metros sobre el nivel del mar en el acuífero Herradura (Perfiles A), B), C) y D) con una exageración vertical seis veces la escala horizontal. (Perfiles E), F) y G) con una exageración vertical ocho veces la escala horizontal)

Para la zona cercana a la playa de Herradura el gradiente del agua subterránea es muy bajo, con valores entre 0,0003 a 0,0005 esto por ser la zona más plana cercana a la zona de descarga al océano y la influencia de la dinámica con las mareas, la profundidad del agua subterránea oscila entre 1,50 y 2,50 metros bajo el nivel del suelo, como se puede observar en los perfiles 1, 2, 3 y 7 de la Figura 67, esto se ha corroborado con el trabajo de campo en la red de monitoreo con el pozo HE-168 (Tabla 11 y Figura 36).

En el sector norte y noreste de Herradura el gradiente del agua subterránea oscila entre 0,01 y 0,02 y la profundidad del agua subterránea es de unos 6 a 7 metros bajo el nivel del suelo ya que estos sectores tienen una elevación mayor de 40 a 50 m.s.n.m, como se aprecia en los perfiles 4,5 y 6 de la Figura 67.

La distribución espacial de las cargas hidráulicas, la zonificación de los sectores con efluencia e influencia de la quebrada Cañablancal, la ubicación de los pozos perforados, la dirección del flujo y la geometría de la carga de 0 m cercana a la playa se muestra de una forma esquemática en el bloque diagrama de la Figura 68.

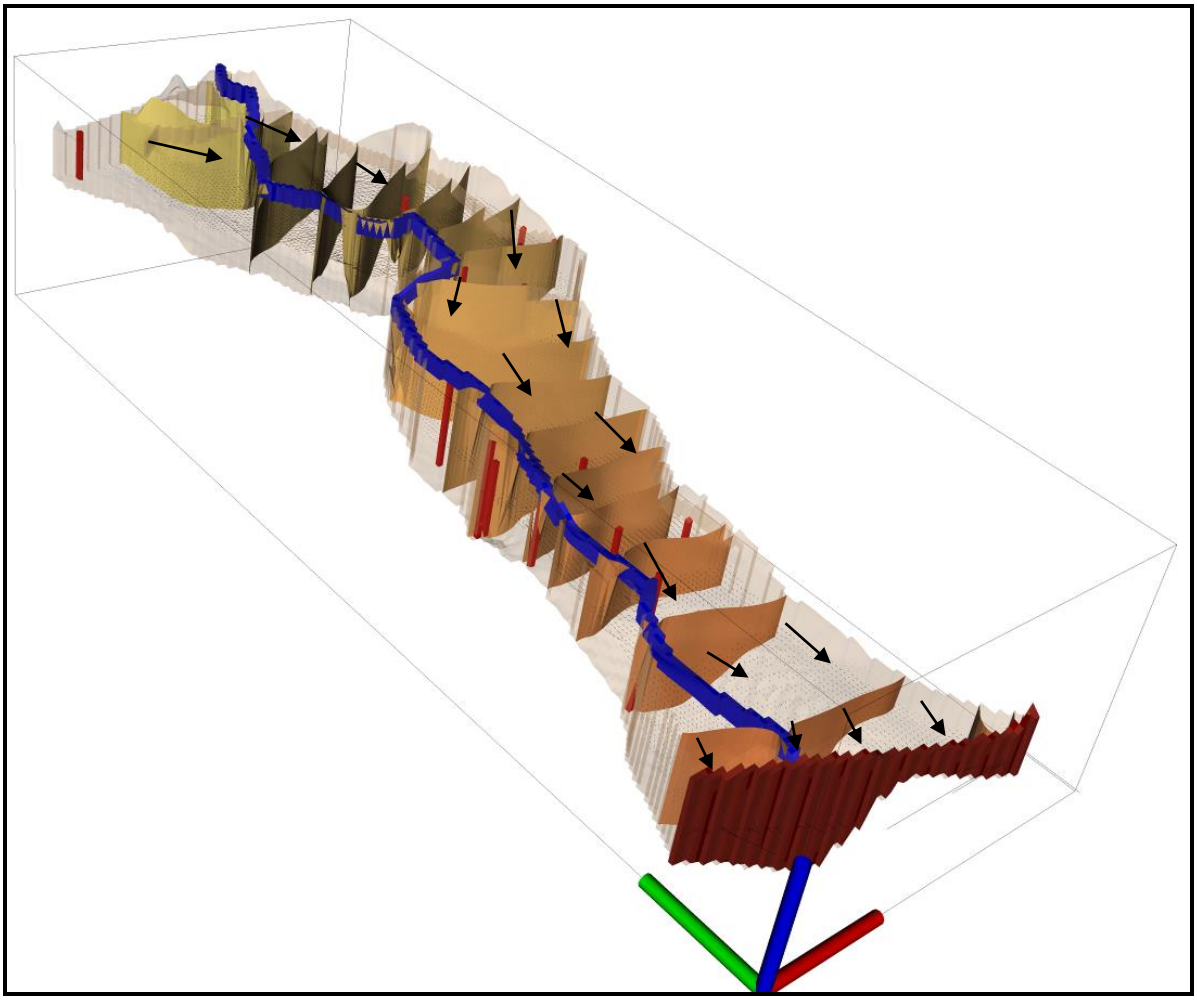


Figura 68 Bloque diagrama esquemático que muestra la distribución espacial de las cargas hidráulicas y la dirección de flujo en el acuífero Herradura

Elaborado y dibujado por : Alonso Alfaro Martínez

Análisis de los valores de las cargas hidráulicas obtenidas en el modelo numérico y los valores observados en la red de monitoreo

En la siguiente tabla se tienen los valores de las cargas hidráulicas observadas en el mes de noviembre del 2020 y las simuladas por el modelo numérico en metros sobre el nivel del mar para los ocho pozos definidos de la red de monitoreo en el acuífero Herradura:

Tabla 24 Datos de las cargas hidráulicas observadas y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico, acuífero Herradura

CÓDIGO	CARGA HIDRÁULICA OBSERVADA (msnm)	CARGA HIDRÁULICA SIMULADA (msnm)	VALOR RESIDUAL
HE-168	13,64	12,59	1,05
HE-183	25,09	24,73	0,36
HE-020	24,28	24,58	-0,30
HE-184	24,18	24,52	-0,34
TS-170	32,98	37,76	-4,78
TS-127	26,80	31,25	-4,45
HE-131	19,29	20,29	-1,00
Pozo excavado	44,20	39,41	4,79

Con respecto los valores de las cargas hidráulicas simuladas, el pozo HE-168, el pozo TS-170 y el Pozo excavado, los cuales se localizan cercanos a los bordes del modelo; están fuera del intervalo de confianza del 95% (19,43 – 34,35msnm), esto con base en el análisis para la media de población con distribución T de Student de los ocho pozos analizados; sin embargo los valores residuales son relativamente bajos, esto coincide con la altura sobre el nivel del mar más baja en y la más alta respectivamente de la zona de estudio en Herradura, por lo que se esta situación puede ser consecuencia de tener la limitante que para la construcción del modelo de elevación digital que se tienen pocos datos de curvas de nivel, puntos de elevación en las zonas más planas en los sectores cercanos a la costa, en donde la primera curva de nivel es la de 5 metros, lo que podría provocar una diferencia en la interpolación de los datos en el modelo de elevación digital.

El valor de la raíz del error cuadrático medio (*RMSE* por sus siglas en inglés) es de 2,92 lo que indica un ajuste muy bueno de la predicción del modelo numérico con respecto a los valores de las cargas hidráulicas simuladas, así mismo el coeficiente de correlación de Pearson *r* tiene un valor de 0,94 por lo que se concluye que una muy buena correlación en la regresión lineal obtenida entre los valores observados y los valores simulados (r^2 = 0,89) como se observa en el gráfico de la Figura 69.

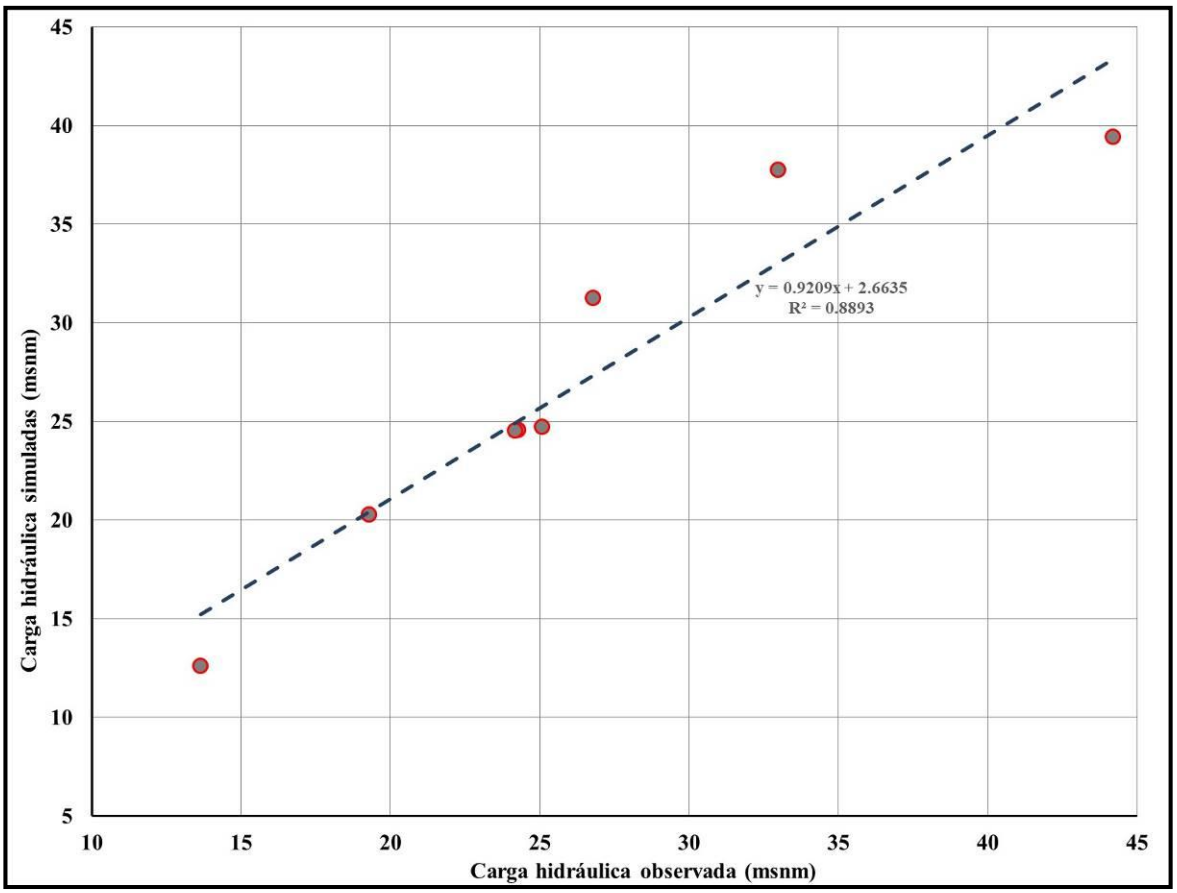


Figura 69 Gráfico de las cargas hidráulicas observadas en los pozos y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico en el acuífero Herradura

Balance del agua subterránea en el acuífero Herradura

Utilizando el paquete ZONEBUDGET (Harbaugh, 1990) que es un posprocesador a utilizar en el MODFLOW 2005 luego de que se corrió el modelo; se calculó el balance de agua para los dos capas modeladas; en la tabla 25 y en la Figura 71 se muestra el balance volumétrico para la capa de *Arenas finas* y la capa de *Aluvión*, esto para las condiciones actuales en los cuales se ha corrido el modelo numérico en el acuífero Herradura, los valores negativos indican las salidas de agua del sistema que se ha desarrollado para cada capa.

Bajo las condiciones actuales el acuífero Herradura cuenta con una entrada total de agua de unos 516 litros por segundo anualmente. Con respecto al balance volumétrico por capa se concluye que la recarga del agua de lluvia ocurre en las *Arenas finas* con 84 l/s y en menor grado por la capa de *Aluvión* con 22 l/s, esto se debe a las zonas en donde las *Arenas finas* no están presentes o tienen una fase más arenosas, o inclusive se podría presentar que la capa de *Aluvión* que tiene una conductividad hidráulica mayor en la zona no saturada con respecto a la capa de superior de *Arenas finas* (Figura 70).

Tabla 25 Presupuesto volumétrico de agua para el modelo numérico del acuífero Herradura

Capa	**Arenas finas**	**Aluvión**	**Total**
Entradas	**Caudal (l/s)**	**Caudal (l/s)**	**Caudal (l/s)**
Infiltración de agua por la quebrada	284,07	0,00	284,07
Recarga de lluvia	83,59	22,03	105,62
Carga constante	1,78	124,21	125,91
Total de entradas	369,44	146,24	515,68
Salidas			
Descarga de agua hacia el océano	-4,24	-191,17	-195,41
Extracción de los pozos perforados	0,00	-196,67	-196,67
Drenaje del agua por los ríos	-123,60	0,00	-123,60
Total de salidas	-127,84	-387,84	-515,68
Entradas-Salidas			0,00
Porcentaje de discrepancia (%)			0,00

Se observa que existe un aporte muy significativo por la infiltración de agua por medio de las zonas influentes de la quebrada Cañablancal que le mete al sistema unos 284 litros por segundo, el caudal de infiltración que representa un 55 % se debe a que el modelo numérico se planteó sin el aporte de la recarga lateral de las rocas del Complejo de Nicoya y las rocas de la formación Punta Carballo.

Esto revela que es muy importante el manejo del uso de suelo en dichos sectores, principalmente en las zonas riparias y las zonas de protección establecidas en la Ley Forestal; así como la calidad del agua superficial que discurre por esta quebrada la cual tiene una conexión hidráulica directa con el acuífero Herradura (Figura 71).

La principal salida del sistema se realiza por medio de la descarga de agua hacia el mar en la capa de *Aluviones* con 191 l/s y en menor grado por medio de la capa de los *Arenas finas* que descargan 4 l/s para un total de unos 195 litros por segundo; el dato mayor en los Aluviones es por el efecto del espesor de la capa en la zona de descarga cercana a la playa.

Por otra parte la extracción de agua por medio de los pozos perforados es de 197 litros por segundo, sin embargo hay que destacar que esta extracción se hizo de una manera teórica asumiendo que los pozos están bombeando los caudales reportados en los informes finales de perforación y las concesiones otorgadas por la DA del MINAE (Figura 70), lo cual puede ser mejorado con un levantamiento en el campo de los pozos y el control de las concesiones por parte de la DA del MINAE.

En menor grado se tiene la salida de agua del sistema por medio de la quebrada Cañablancal con 124 litros por segundo hacia la playa Herradura, cumpliendo una función esencial en los humedales (ecosistemas) y el control de las mareas en la zona de confluencia e interacción de la quebrada y el mar.

De esta manera se concluye que tanto la salidas de agua como las entradas en la quebrada Cañablancal del agua del acuífero es muy importante ya que se podría aprovechar en el futuro cercano por medio de más pozos perforados y desarrollando una gestión sostenible del recurso para diferentes actividades económicas, considerando siempre el almacenamiento del acuífero con un seguimiento de la recarga y la extracción. Para esto es fundamental la medición de los niveles de agua en los pozos en el tiempo (Figura 71).

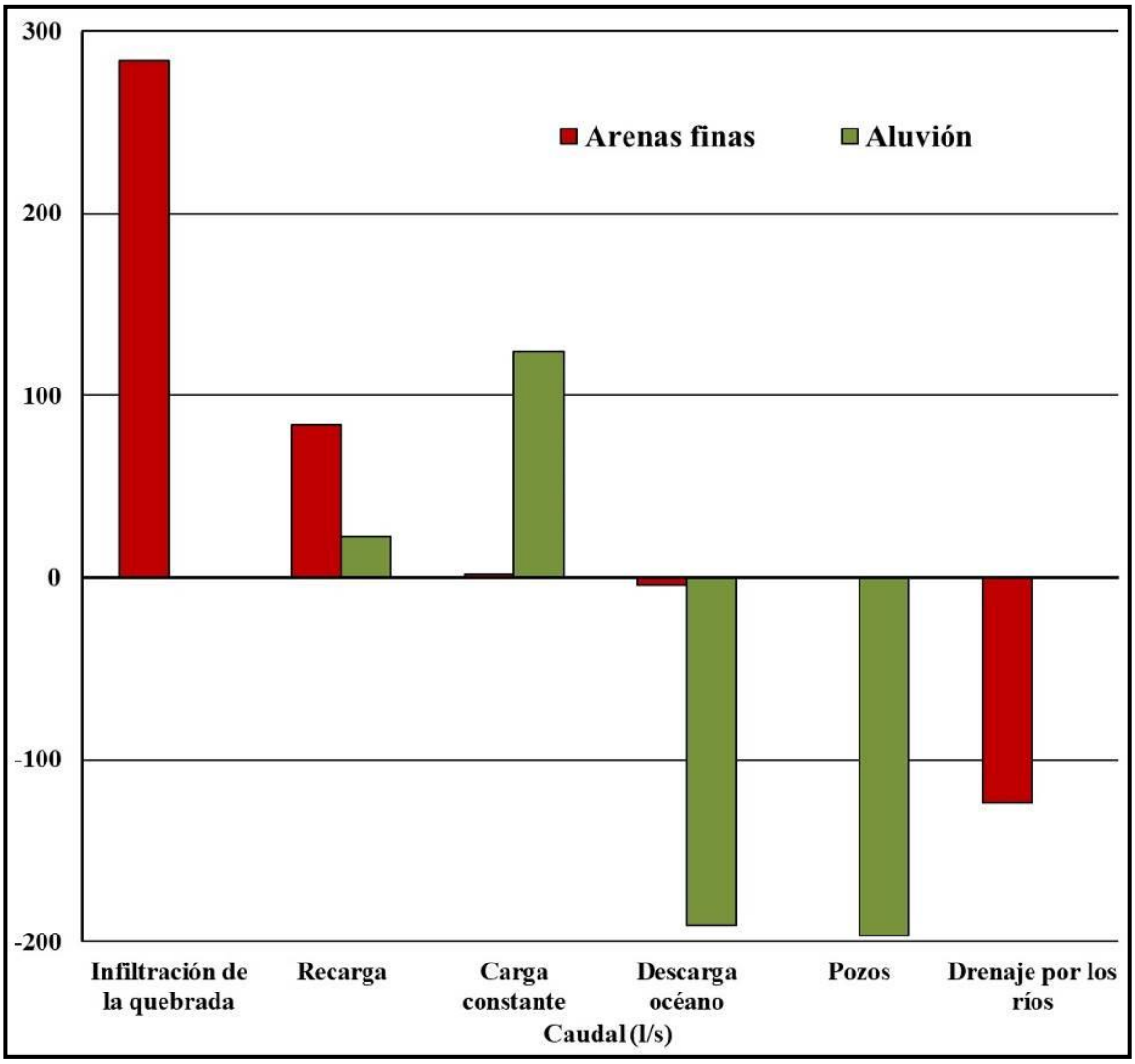


Figura 70 Gráfico del balance volumétrico de agua para cada capa en el Acuífero Herradura

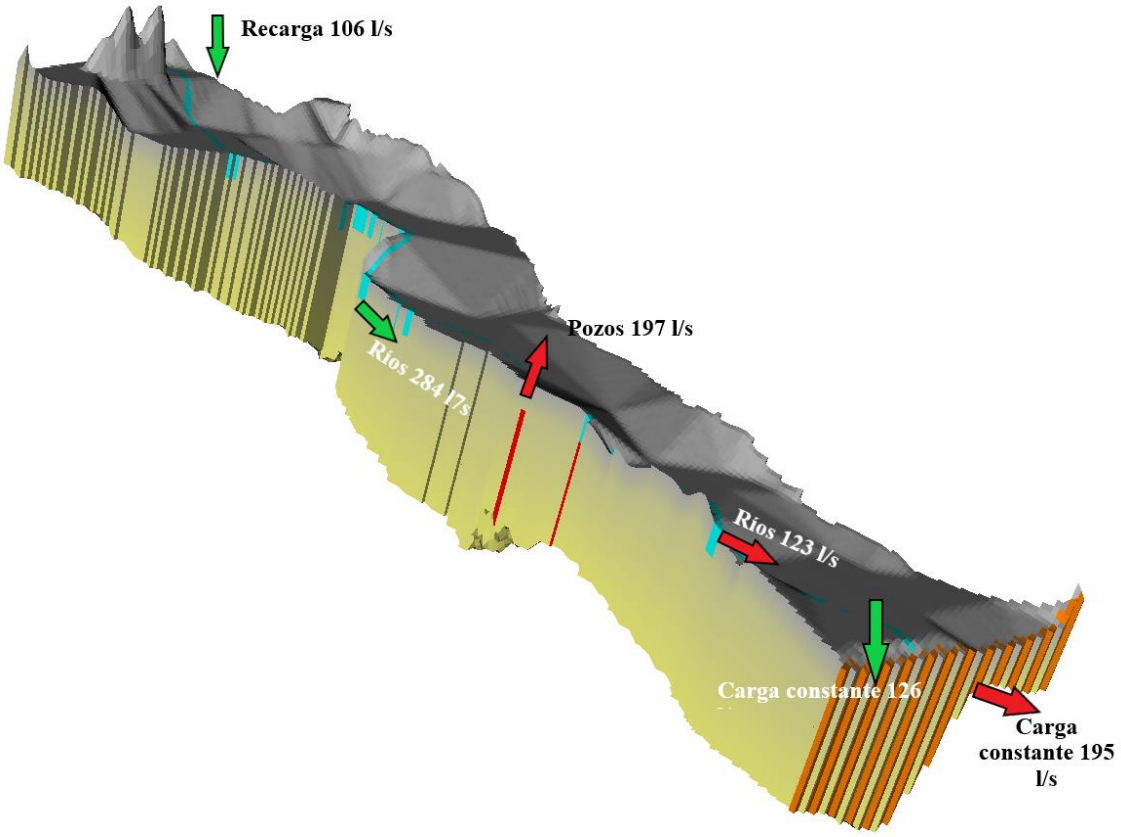


Figura 71 Bloque esquemático de balance volumétrico de agua en el acuífero Herradura, las flechas verdes indican ingresos y las flechas rojas salidas del sistema

8.2 Acuífero Jacó

8.2.1 Dominio del modelo numérico y discretización

El área de delimitada como el dominio en el sector de Jacó tiene una extensión de 10 km^2, para el modelo numérico a desarrollar en el acuífero Jacó la extensión del dominio está enmarcada entre las coordenadas referidas a la cuadrícula CRTM05 como se indica en la Tabla 26. La geometría de la zona activa del acuífero Jacó tiene un área de 6,26 km^2 y se ha simplificado en el sector Este y Sur-este debido a que en los bordes de esos sectores no se cuenta con suficiente información de pozos o SEVs para mejorar y definir los espesores del aluvión y el contacto del pie de monte con el Complejo de Nicoya (Figura 72), por otra parte en el sector oeste cercano a la costa no se tiene suficientes datos de elevación cercanos a la zona de la playa Jacó, es por esta razón que la zona activa está a unos 50 metros de la línea de la costa.

Tabla 26 Coordenadas de los vértices del dominio en la zona del acuífero Jacó

VÉRTICE	COORDENADAS (CRTM 05)
Norte	431120 – 1065940
Este	433795 – 1062750
Sur	431915 – 1061180
Oeste	429240 – 1064365

Para la zona activa del modelo en el acuífero Jacó se definen los siguientes límites:

i. La superficie del terreno se importó del modelo de elevación digital (celdas de 10 x 10m) del archivo en formato raster creado en el programa QGis 3.10.
ii. El sector de la playa Jacó-océano Pacífico al oeste y el SW (Figura 72).
iii. Los basaltos del Complejo de Nicoya en la zona norte, sur y el este (Figura 72).
iv. En la zona Este se tiene también los aluviones que no formarán parte del modelo numérico como sectores inactivos (Figura 72).

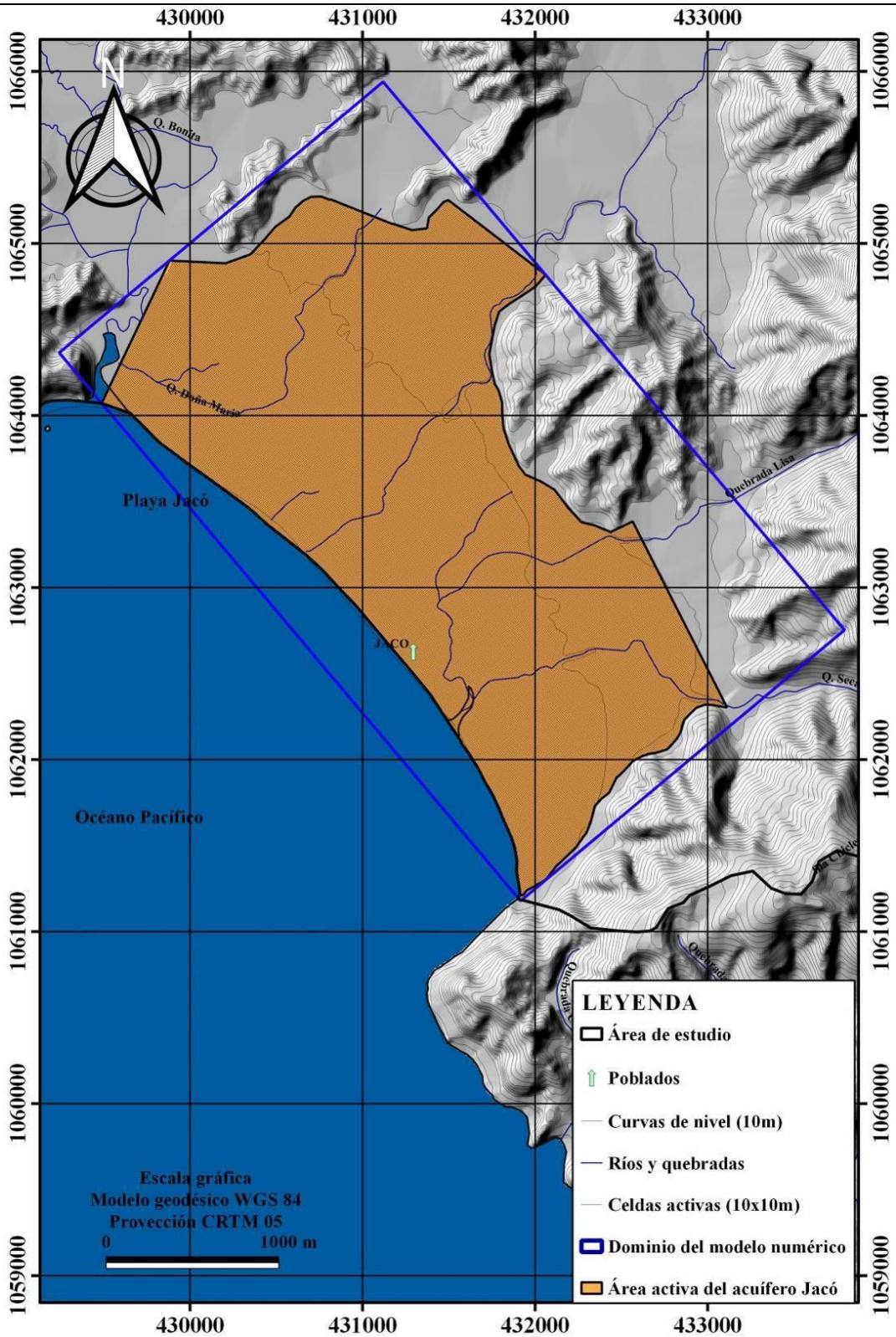


Figura 72 Mapa del dominio y la zona activa a modelar en el acuífero Jacó
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

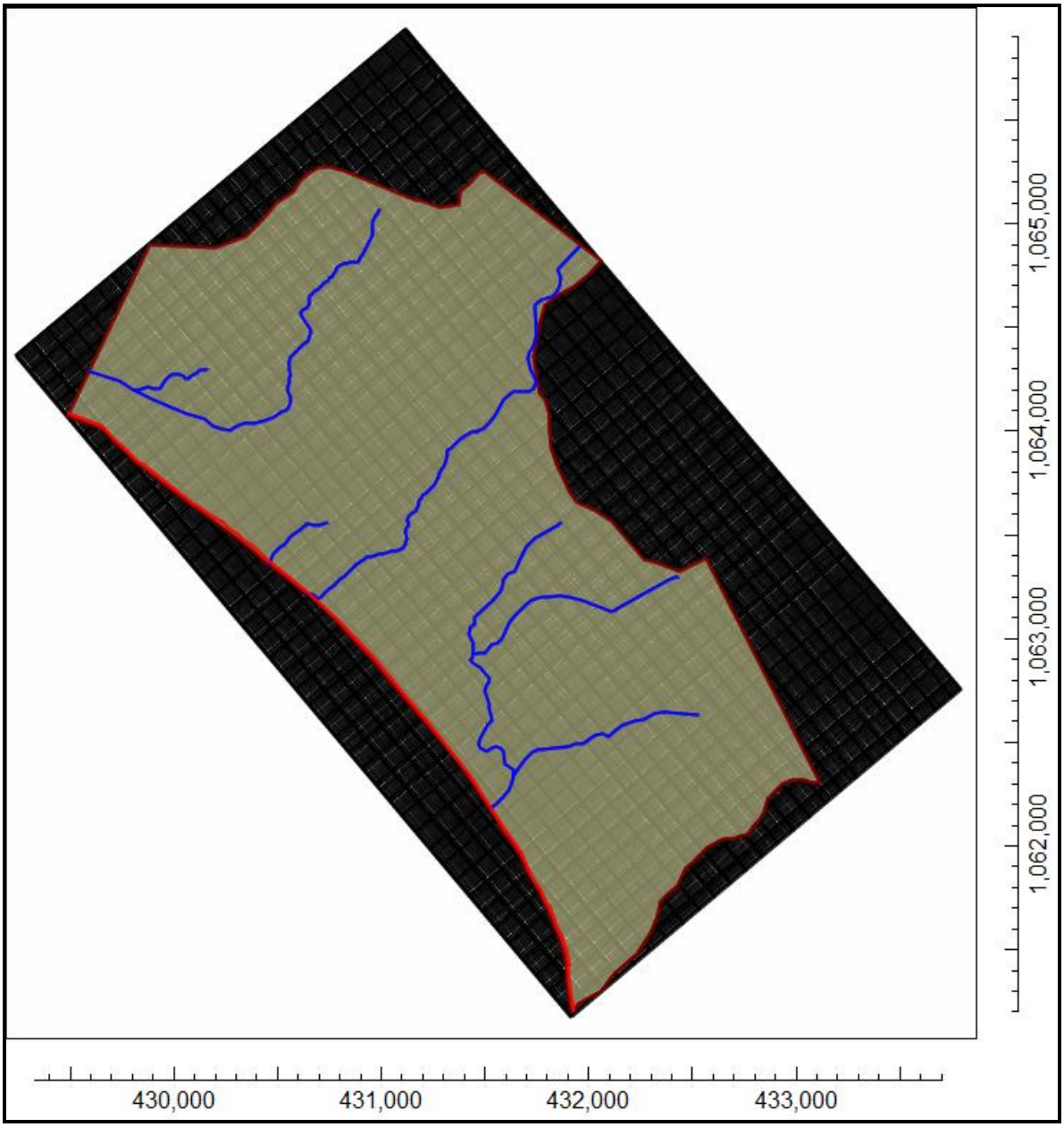


Figura 73 Mapa local del dominio, las celdas inactivas (color gris) y activas (color amarillo) dentro del contorno café en el área activa del acuífero Jacó

Se ha especificado un tamaño de celda uniforme con un ancho y largo (Δ_x, Δ_y) de 20 metros con un área de 400 m^2 para cada celda; dentro del dominio se tienen 245 columnas orientadas NW-SE y 416 filas orientadas NE-SW para un total de 25480 celdas, para mejorar la ubicación en los ejes del modelo simplificado, se hizo una rotación de 40° al NW (rumbo 320°), esto con el objetivo de que el eje *x* esté a lineado de forma paralela a

la dirección de flujo del agua subterránea. La zona activa tiene un área de 6263273,54 m^2 (6,26 km^2) y por lo tanto contiene un total de 15568 celdas (Figura 73).

8.2.2 Capas del modelo

La discretización vertical será en dos capas que se describen a continuación:

1. La capa superior denominada ***Arenas finas*** con un espesor constante de cinco metros por debajo de la superficie del terreno y se definió un modo *convertible*, lo que significa que el código Modflow define el tipo análisis y la clase de acuífero (libre o confinado) que ejecuta en la capa con base en las características geométricas e hidráulicas que se le definan a la capa.

2. La capa inferior denominada ***Aluvión*** que consiste propiamente de la zona saturada del acuífero Jacó y está conformado por las intercalaciones de gravas, arenas y sedimentos finos, cuyo espesor promedio con base en el modelo hidrogeológico conceptual es entre los 23 y 25 metros, sin embargo para el modelo numérico el espesor es variable con base en los análisis de los afloramientos, los pozos perforados y los perfiles hidrogeológicos en donde se obtuvo el valor de la elevación sobre el nivel del mar del piso del acuífero en el contacto del aluvión con el basamento (areniscas y basaltos) y luego se hizo un modelo de interpolación para definir la geometría del piso de los aluviones (Figura 74), por lo que el espesor es variable, a esta capa se le asigna una característica confinada.

En la Figura 75 se muestra de manera esquemática un corte transversal del dominio activo del modelo numérico, con el espesor de la capa de *Arenas finas* y de la capa de *Aluvión*, esto para la zona activa definida en el acuífero.

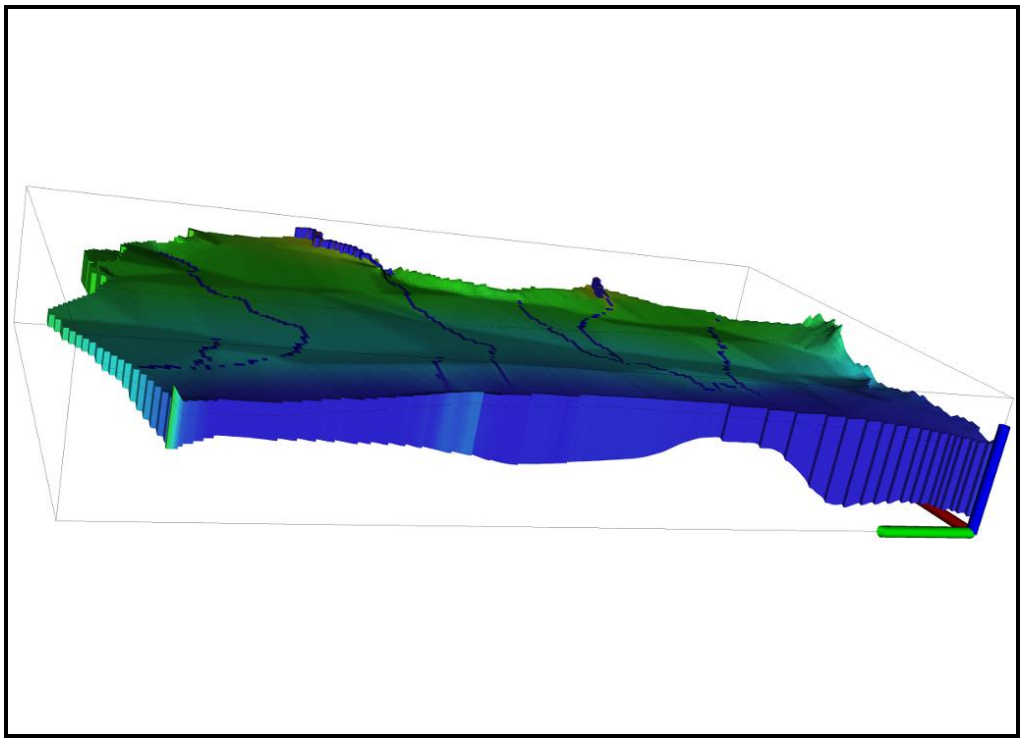


Figura 74 Corte esquemático donde se observa el piso de la capa de aluvión en el acuífero Jacó, nótese el espesor variable y la distribución espacial del piso del acuífero

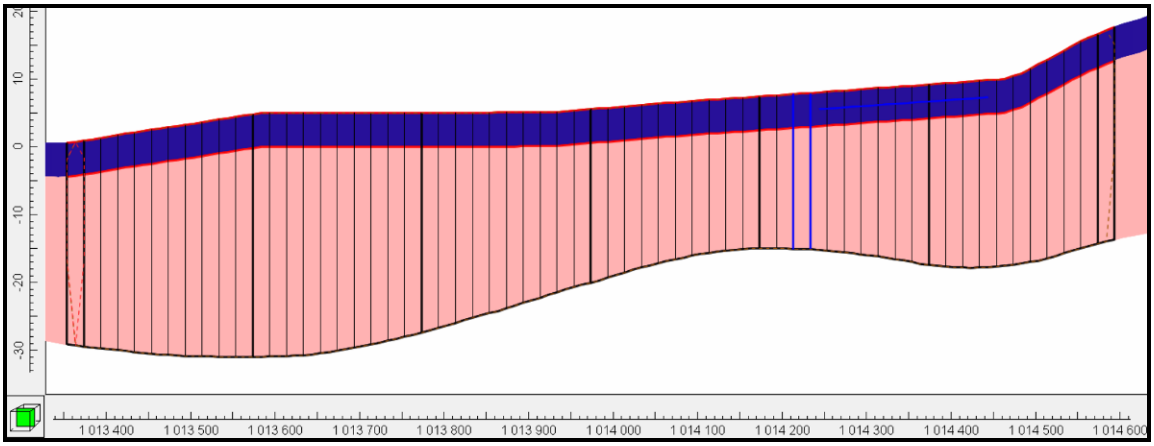


Figura 75 Perfil esquemático donde se muestra el espesor de las dos capas (Arenas finas en la parte superior y Aluvión en la parte inferior) del modelo numérico dentro de la zona activa (líneas verticales) en el acuífero Jacó

8.2.3 Asignación de propiedades para las capas del modelo

Conductividad hidráulica

Los parámetros asignados para las dos capas del modelo son los siguientes:

Tabla 27 Valores de la conductividad hidráulica para las capas del modelo

CAPA	NOMBRE	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)
Superior	Arena finas	$1{,}00\times10^{-4}$	$1{,}00\times10^{-4}$	$1{,}00\times10^{-5}$
Inferior	Aluvión	$9{,}19\times10^{-4}$	$9{,}19\times10^{-4}$	$9{,}19\times10^{-5}$

Para la capa superior *Arenas finas* el valor de 1×10^{-4} m/s se ha asignado con base en el valor medio de conductividad hidráulica para arenas finas limpias y limos arenosos según Freeze y Cherry (1979). El valor de $9{,}19\times10^{-4}$ m/s para la capa inferior de *Aluvión* se definió con base en el modelo hidrogeológico conceptual para las intercalaciones de gravas, arenas y sedimentos finos de los aluviones. Para ambas capas la conductividad hidráulica horizontal en los ejes *x* y *y* se asumen iguales y la conductividad vertical en el eje *z* se asume diez veces menor.

Coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico y porosidad

Los parámetros asignados para ambas capas se indican en la siguiente tabla son los siguientes:

Tabla 28 Valores del coeficiente de almacenamiento y porosidad para las capas del modelo

CAPA	NOMBRE	S	n
Superior	Arenas finas	NA	0,33
Inferior	Aluvión	$1{,}00\times10^{-4}$	0,25

Sin embargo, se destaca que debido a que el modelo se correrá en modelo estacionario los valores de porosidad y coeficiente de almacenamiento no serán utilizados por el código MODFLOW para calcular las cargas hidráulicas en el acuífero Jacó.

8.2.4 Condiciones de frontera

Se han definido las siguientes condiciones de frontera dentro del domino del modelo en el sector de Jacó:

Sectores inactivos sin flujo

Las rocas del Complejo de Nicoya y parte de los Depósitos Aluviales en las zonas planas en la zona Este del dominio se han determinado como unidades de no flujo y por lo tanto corresponden a las zonas no activas del modelo, por otra parte se asume, en esta investigación que las basaltos no están haciendo un aporte de recarga lateral hacia los aluviones (Figura 72 y Figura 73).

Recarga potencial

Para al acuífero Jacó se ha definido una recarga potencial de 1078,67 mm/año con base en metodología de Schosinsky (2006) que equivale a $3{,}42\times10^{-8}$ m/s, este valor se introduce por medio de la asignación del valor a un polígono en la parte superior de las celdas activas del dominio en el acuífero.

Ríos y quebradas

Para los ríos y quebradas que drenan hacia la playa de Jacó, se les ha asignado una conductancia de $9{,}19\times10^{-3}$ m^2/s; la configuración es de la superficie del espejo de agua es a 1 metro de profundidad con respecto a la superficie del terreno y el fondo del cauce a 2 metros de profundidad, para una columna de agua constante en la quebrada de 1 metro. Al igual que en el acuífero Herradura en el desarrollo del modelo numérico se planteó utilizar los ríos y quebradas como una *carga general* o como un *drenaje* del sistema, sin embargo los mejores resultados en la convergencia se obtuvieron como un *río* en la configuración del MODFLOW para las cauces de agua superficial en el sector del acuífero Jacó.

Carga constante con valor cercano a 0 m.s.n.m en el sector costero de la playa Jacó

La carga hidráulica del modelo cercana al mar se definió con base en la información de campo, con mediciones y observaciones en los sitios de las diferencias de niveles existentes entre el terreno y el nivel del agua, de esta manera se configuró a una profundidad de 0,50 metros por debajo de la superficie del terreno llegando casi a una carga constante cercana a los 0 metros sobre el nivel del mar en la playa Jacó, esto se ilustra de manera esquemática en la siguiente figura:

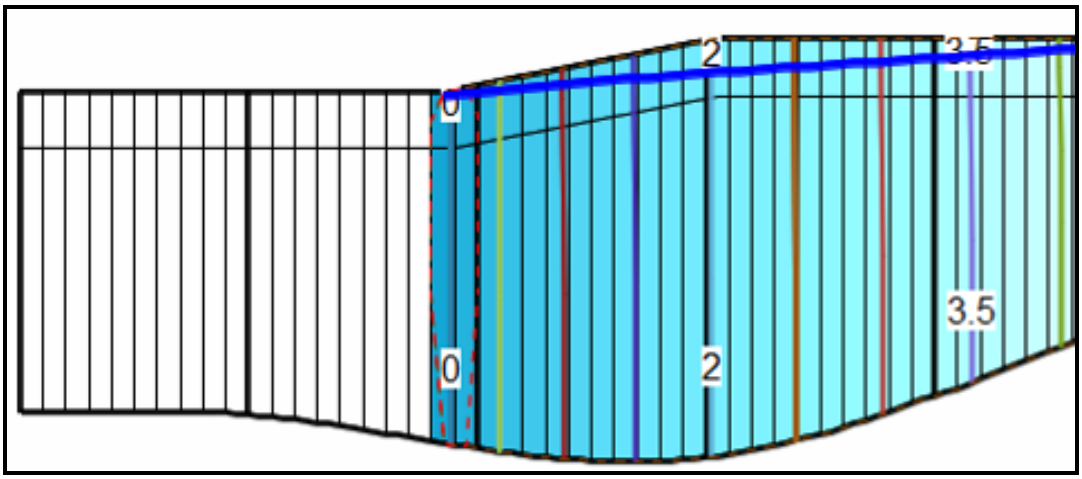


Figura 76 Esquema de la configuración de la carga constante cercana 0 metros sobre el nivel del mar (línea punteada de color rojo en la franja vertical de color azul) en el sector cercano a la costa en la playa Jacó

Pozos de extracción

De acuerdo con la información de la base de datos del SENARA y las concesiones otorgadas por el MINAE, se procedió a incluir en el modelo numérico la extracción de agua subterránea del acuífero Jacó, la cual se realiza por medio de 13 pozos perforados que están en la Tabla 29, el dato de caudal negativo significa por convención en modelación numérica una extracción de agua del sistema acuífero.

Tabla 29 Pozos de extracción en el sector activo de la modelación numérica en el acuífero Jacó

POZO	PROPIETARIO	X (LONG)	Y (LAT)	Q (l/s)
HE-002	DIDIER SMIDERLE	431450	1063558	-0,0008
HE-003	HOTELES RECREATIVOS SA	430529	1064181	-0,002
HE-004	ASOC EMPL GRUPO ARH	432238	1063030	-0,0024
HE-016	MARIO DIVARI	432788	1062679	-0,0005
HE-019	AyA	431865	1064930	-0,015
HE-047	REDES SUBTERRANEAS MATELEC SA	431790	1064780	-0,003
HE-068	AyA	431792	1064722	-0,025
HE-069	AyA	431770	1064762	-0,029
HE-077	VALLE OCCIDENTAL VA OC SA	431239	1064431	-0,014
HE-106	SOCIEDAD COMERCIAL Y GANADERA EL RECREO SA	431571	1063472	-0,002
HE-120	JAEA SA #1	432059	1063333	-0,0115
HE-121	JAEA SA #2	432150	1063345	-0,005
HE-134	AyA	430995	1065104	-0,043
TOTAL				**-0,153**

Las condiciones de frontera establecidas para el modelo numérico en el acuífero de Jacó se exponen en la Figura 77, en donde se ilustra la carga constante cercana al mar, los cauces de los ríos y las quebradas, la recarga en y los pozos de extracción.

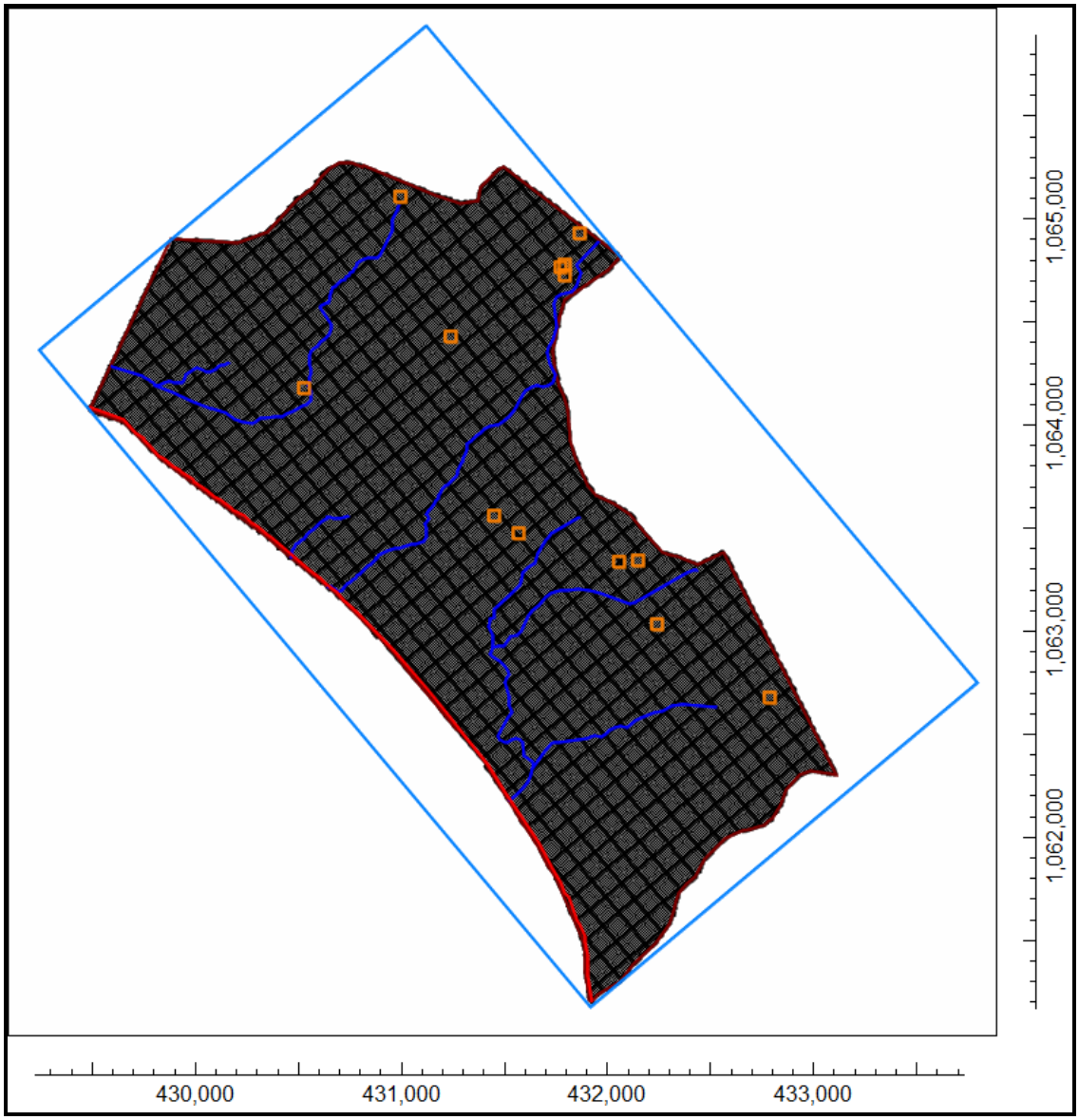


Figura 77 Configuración de la carga constante cercana al mar (color rojo), los ríos y quebradas (color azul), la recarga en rectángulo con color celeste en el borde y los pozos de extracción que son los puntos en color anaranjado

8.2.5 Modelo numérico del acuífero Jacó en el escenario climático al año 2019

Se presentan a continuación la discusión de los resultados obtenidos para el modelo numérico del acuífero Jacó en el marco del escenario climático al año 2019 y las condiciones de frontera definidas.

Dirección de flujo y cargas hidráulicas

En la capa superior del modelo denominada como *Arenas finas* las líneas isopotenciales muestran para el pico de la época lluviosa y la recarga total de $3{,}27\times10^{-8}$ m/s las zonas de influencia-efluencia de los ríos y las quebradas como se puede observar en la Figura 78, así mismo se muestran sectores en el NE y el SE en donde el modelo numérico revela las celdas en las *Arenas finas* que estén secas, con base en las propiedades hidráulicas de dicha capa y la configuración establecida como convertible.

Destacan los sectores de las desembocaduras de los ríos y quebradas en la playa Jacó en donde se tienen pequeños humedales y la interacción del sistema del agua superficial con las mareas.

En la capa inferior de *Aluvión* las celdas todas están saturadas, para la configuración actual de los parámetros definidos, el modelo numérico para las cargas hidráulicas del agua subterránea muestra un resultado de un gradiente de muy bajo con un rango entre 0,004 - 0,008 con dirección suroeste para descargar el agua subterránea en la playa Jacó (Figura 79).

Se definieron seis líneas de perfiles para la zona activa del modelo en el acuífero Jacó, cuatro líneas son paralelas a la dirección del flujo con orientación SW-NE y dos perfiles perpendiculares a la dirección del flujo del acuífero con rumbo NW-SE; la ubicación de las líneas de perfil está en la Figura 80.

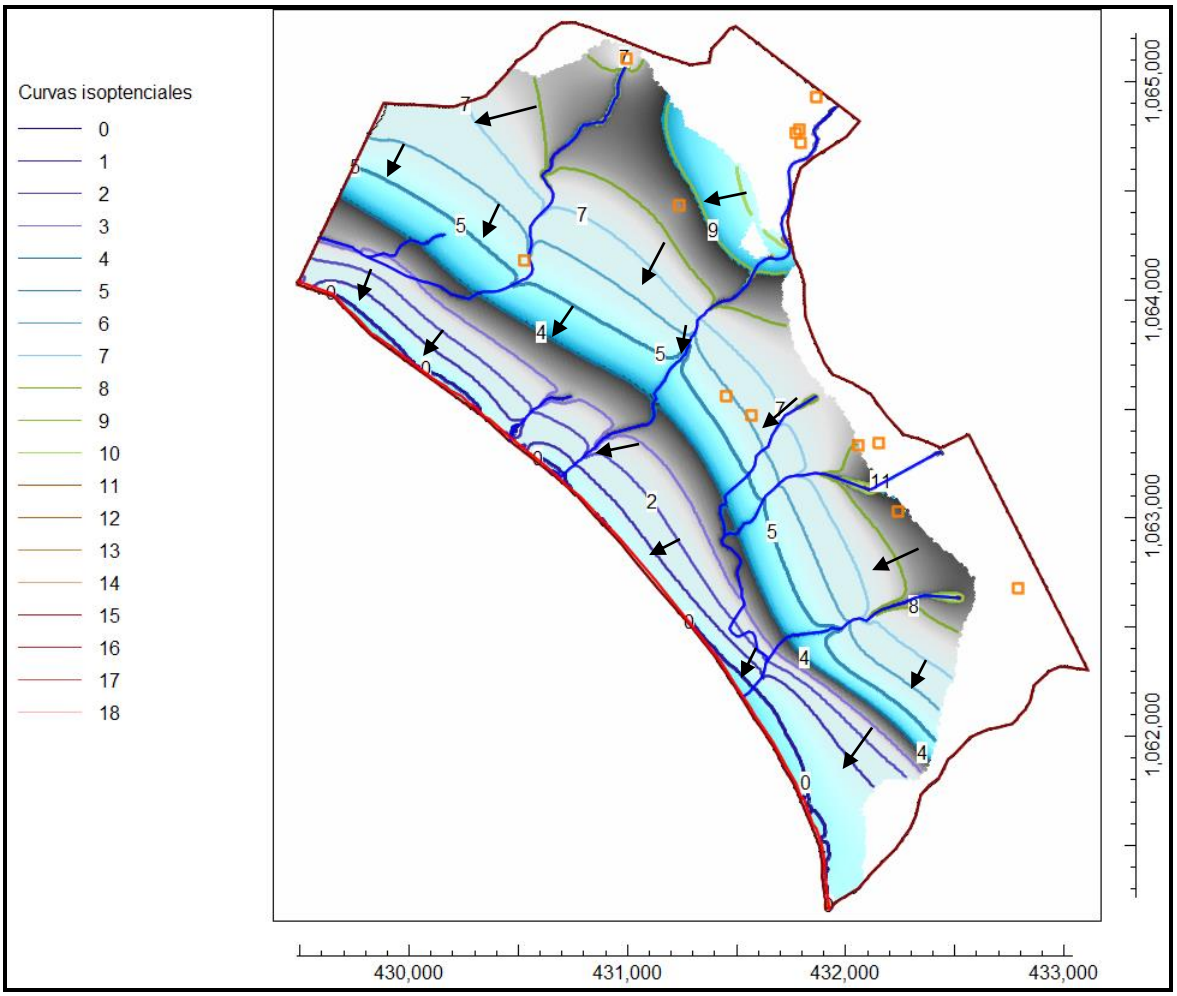


Figura 78 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección de flujo en la capa superior de Arenas finas en el acuífero Jacó

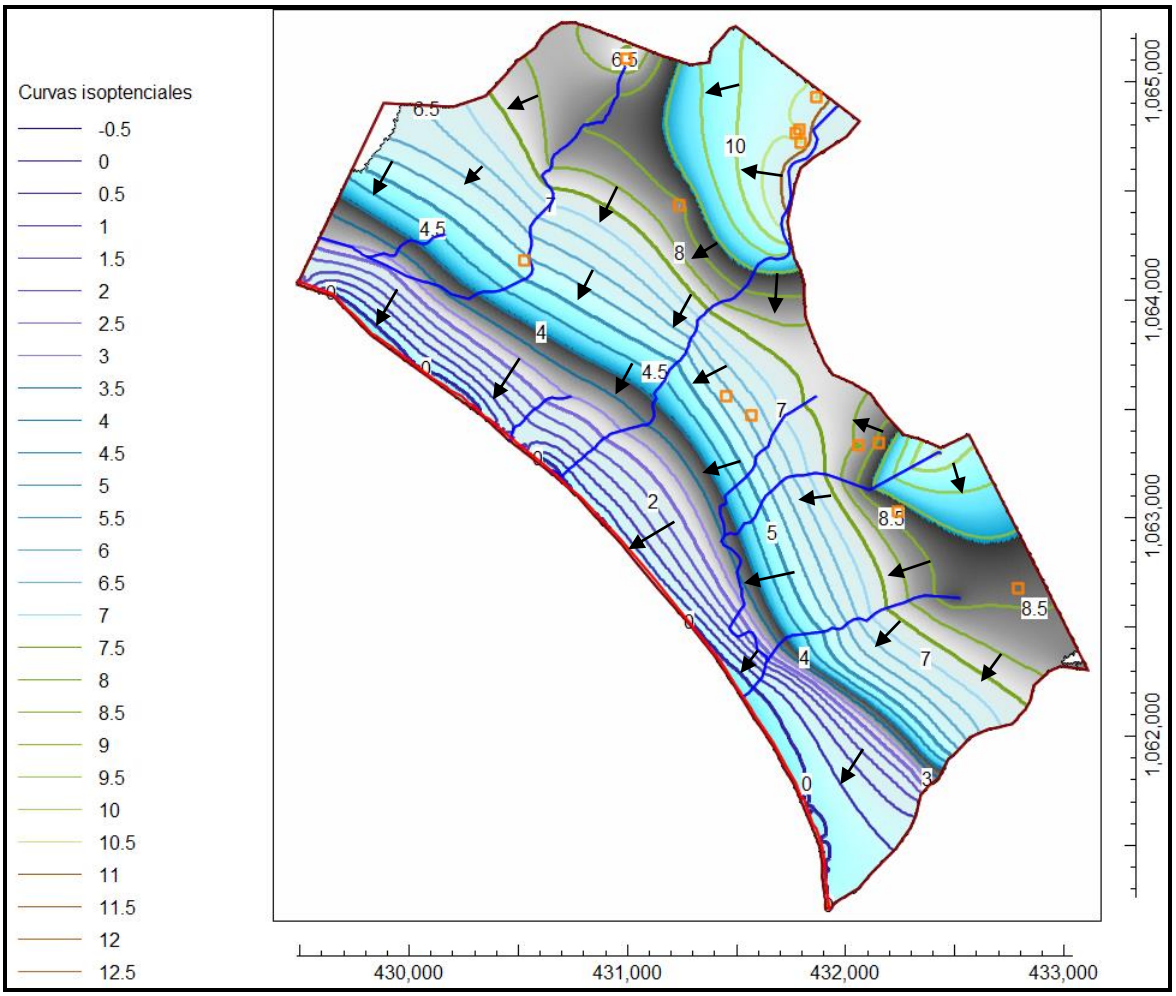


Figura 79 Mapa de las curvas equipotenciales y la dirección deflujo en la capa inferior de Aluvión en el acuífero Jacó

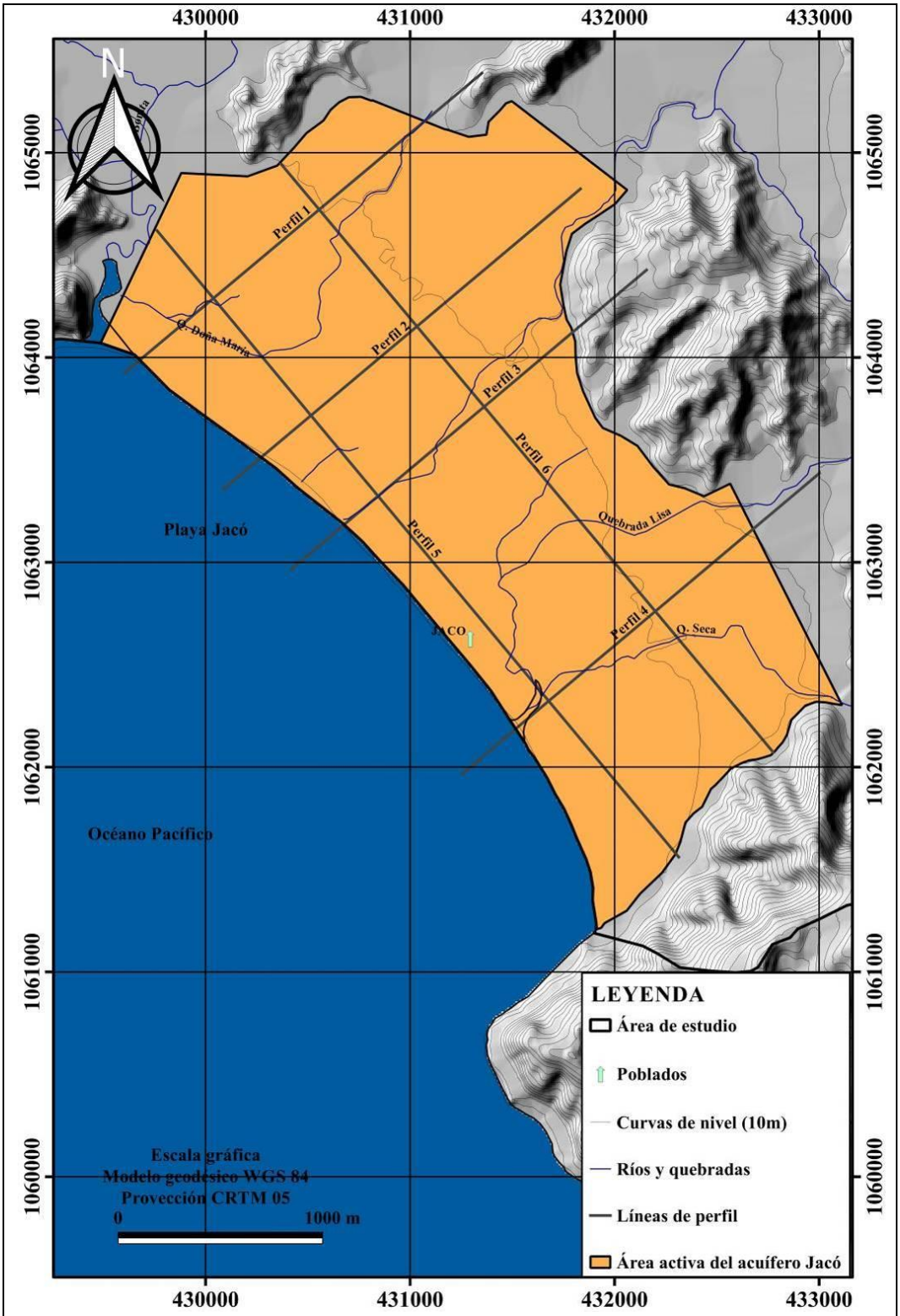
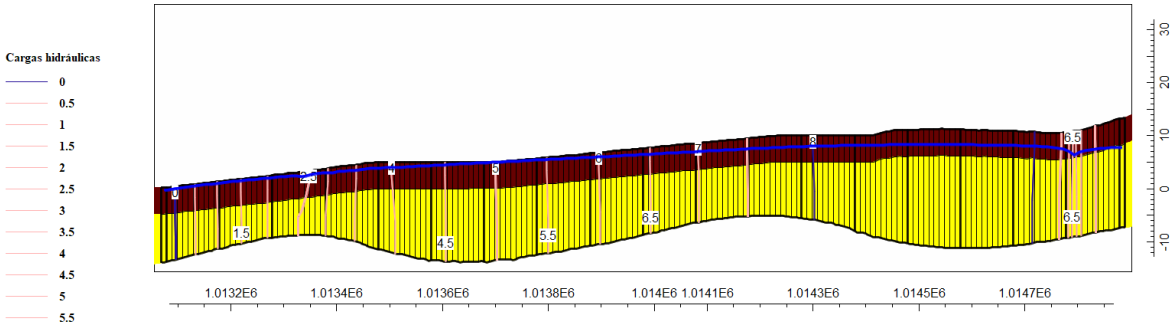
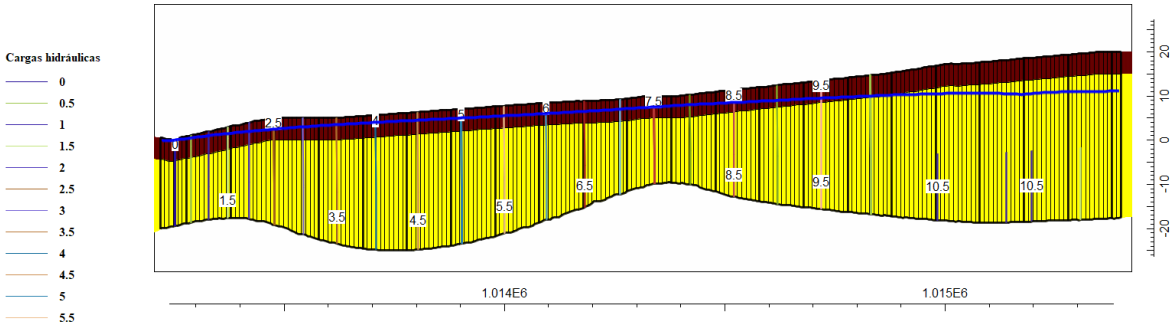


Figura 80 Mapa de ubicación de las líneas del perfil en el modelo numérico Jacó
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

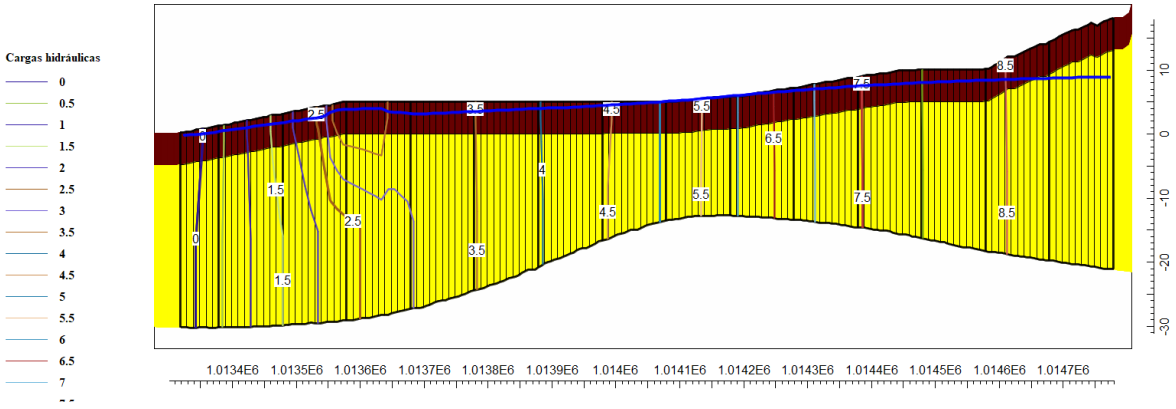
La Figura 81 contiene los seis perfiles obtenidos en el modelo numérico en el acuífero Jacó:



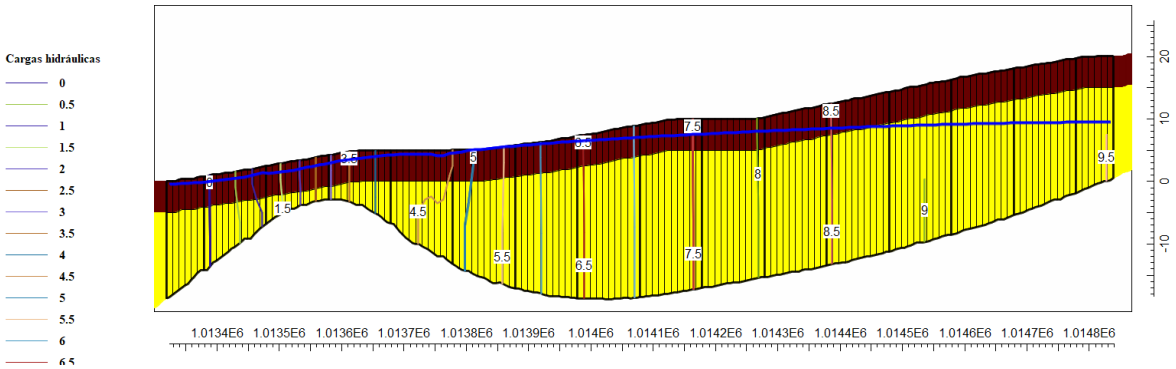
A) Perfil 1



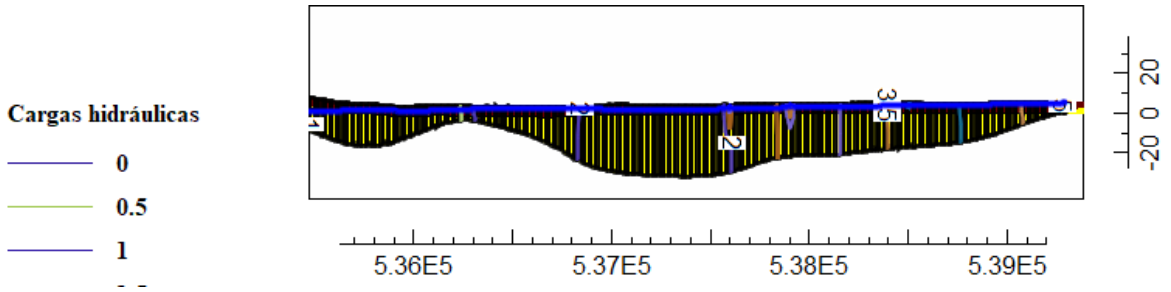
B) Perfil 2



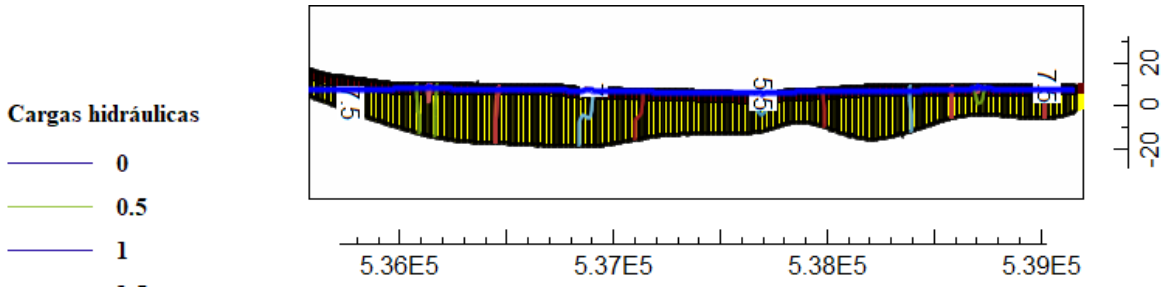
C) Perfil 3



D) Perfil 4



E) Perfil 5



F) Perfil 6

Figura 81 Perfiles hidrogeológicos con las cargas hidráulicas en el acuífero Jacó; exageración vertical diez veces la escala horizontal

Con base en los perfiles A, B, C y D de la figura anterior el gradiente hidráulico del agua subterránea oscila entre 0,004 en la zona norte y 0,008 para el sector sur en el acuífero Jacó y se considera que es muy bajo en las zonas cercana a la playa, en los perfiles creados en el modelo numérico se muestra la relación directa de la relación del acuífero con los ríos

y las quebradas ya que las cargas hidráulicas muestran los sectores efluentes cercanos a la descarga al océano Pacífico.

La profundidad del agua subterránea oscila entre los 0 y los 4,50 metros bajo el nivel del suelo en donde se comprueba el confinamiento de las gravas y arenas de los aluviones que conforman el acuífero en la zona de Jacó, como se aprecia principalmente en los perfiles E y F de la Figura 81.

La distribución espacial de las cargas hidráulicas con el gradiente hidráulico bajo, la zonificación de los sectores con efluencia e influencia de los ríos y las quebradas, la ubicación de los pozos perforados y la geometría de la carga de 0 m cercana a la playa de Jacó se muestra de una forma esquemática en el bloque diagrama de la Figura 82.

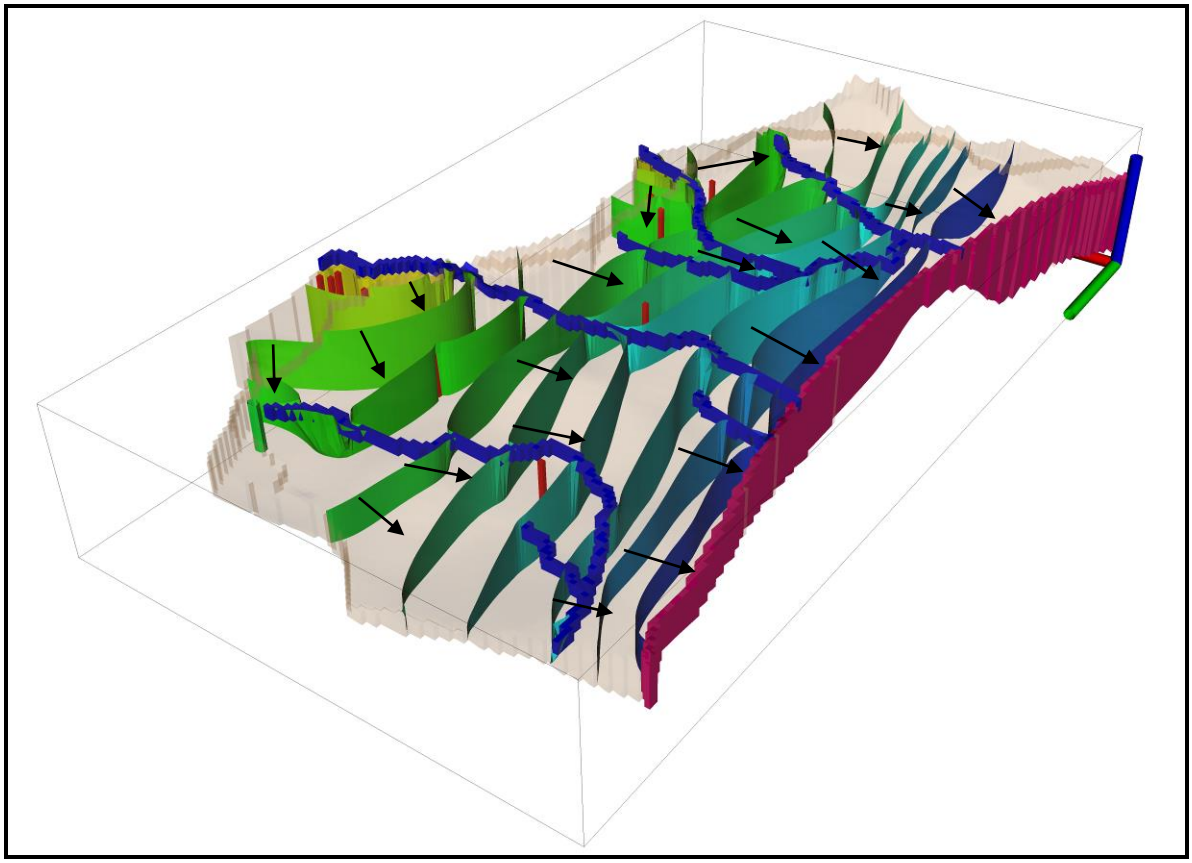


Figura 82 Bloque diagrama que muestra la distribución espacial de las cargas hidráulicas, la dirección de flujo, los ríos y los pozos en el acuífero Jacó

Análisis de los valores de las cargas hidráulicas obtenidas en el modelo numérico y los valores observados en la red de monitoreo de niveles del acuífero Jacó

En la siguiente tabla se tienen los valores de las cargas hidráulicas observadas en el mes de octubre del 2019 y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico en metros sobre el nivel del mar para los cuatro pozos definidos de la red de monitoreo en el acuífero Jacó; la información de los niveles de agua fue suministrada por el Área Funcional de Hidrogeología de la UEN Gestión Ambiental del AyA.

Tabla 30 Datos de las cargas hidráulicas observadas en los pozos y las cargas hidráulicas simuladas por el modelo numérico, acuífero Jacó

CÓDIGO	CARGA HIDRÁULICA OBSERVADA (msnm)	CARGA HIDRÁULICA SIMULADA (msnm)	VALOR RESIDUAL
HE-068	11,56	10,38	1,18
HE-069	14,87	10,23	4,64
HE-019	13,30	10,61	2,69
HE-134	13,00	6,63	6,37

Se hace la aclaración de que la información disponible de pozos con los datos de nivel de agua subterránea es escaza y la que existe está concentrada en la zona del campo de pozos del AyA; sin embargo se puede analizar que para los valores obtenidos de las cargas simuladas en los pozos de observación se tiene que los cuatro pozos están en el intervalo de confianza del 95 % de (6,99 – 14,11 msnm), esto con base en el análisis para la media de población con distribución T de Student de los cuatro pozos analizados.

El valor residual del pozo HE-134 (pozo AyA Jacó 5) es el más alto ya que para este pozo durante el proceso de perforación y la prueba de bombeo se reportó surgencia del agua subterránea e inclusive en el registro de los niveles por parte del AyA, hay datos por encima del nivel del suelo, por esta razón se puede explicar la diferencia entre el valor de la carga simulada y la carga observada, aspecto que tiene ser más investigado a nivel del acuífero en este sector.

Así mismo al igual que en el acuífero Herradura en el sector de Jacó se puede tener la limitante de que el modelo de elevación digital se tienen pocos datos en las zonas más planas lo que podría provocar una diferencia en la interpolación de los datos en el modelo numérico, la profundidad de los niveles de agua medidos y el modelo de elevación digital del terreno.

El valor de la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) es de 4,21 lo que indica un ajuste bueno de la predicción del modelo numérico con respecto a los valores de las cargas hidráulicas simuladas, así mismo el coeficiente de correlación de Pearson *r* tiene un valor de 0,058 por lo que se concluye que no hay una buena correlación en la regresión lineal obtenida entre los valores observados y los valores simulados (r^2 = 0,0034); ahora existe un sesgo por el valor residual del pozo HE-134 (Figura 83), ya que el valor residual es de 6,63 m.

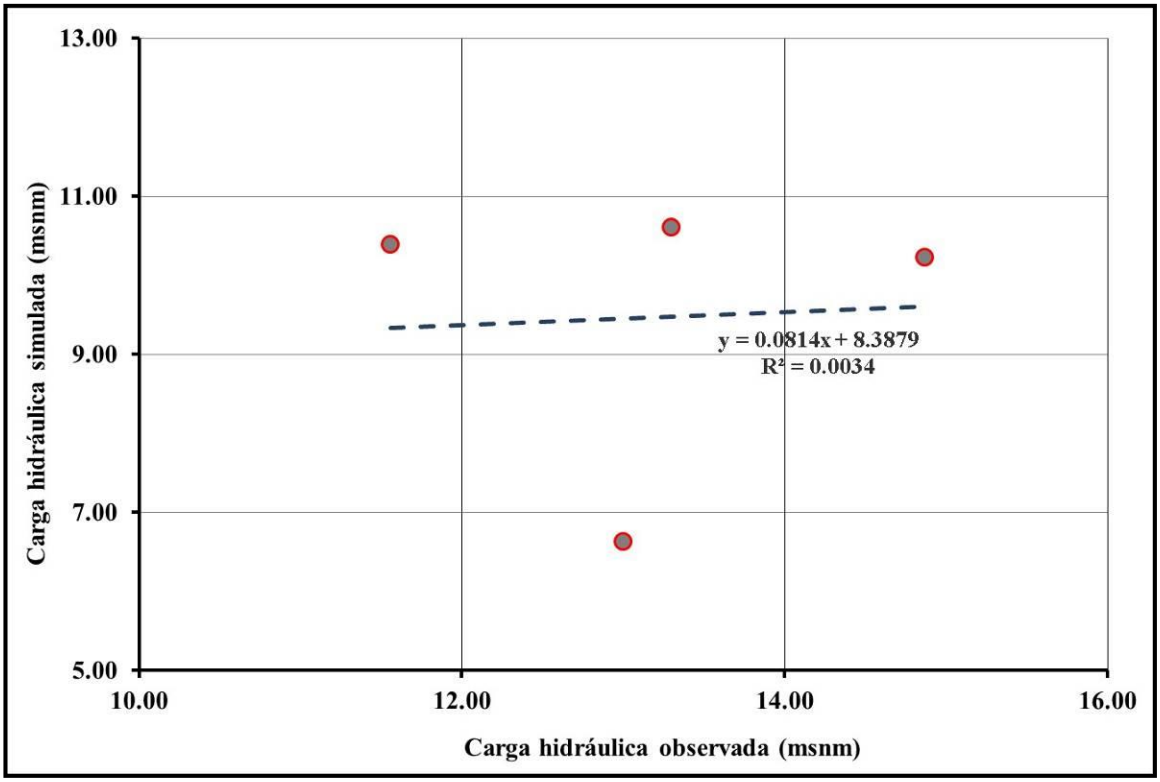


Figura 83 Grafico de las cargas hidráulicas observadas en los pozos y las cargas hidráulicas simuladas para el modelo numérico en el acuífero Jacó

Balance del agua subterránea en el acuífero Jacó

En la siguiente tabla y en la Figura 84 se muestra el balance volumétrico del agua subterránea para las capas de *Arenas finas* y de *Aluvión*, esto para las condiciones actuales en los cuales se ha corrido el modelo numérico en el acuífero Jacó, los valores negativos indican las salidas de agua del sistema.

Bajo las condiciones actuales el acuífero Jacó cuenta con un balance de entradas y salidas de 1128 l/s anualmente; con respecto al balance volumétrico en las entradas por capa se concluye que la recarga del agua de lluvia ocurre en la capa de *Arenas finas* con 169 l/s y en menor grado por la capa de *Aluvión* con 43 l/s, esto como consecuencia de que en algunos sectores no está presente la capa de Arenas finas o su espesor es muy bajo favoreciendo la recarga directa.

Tabla 31 Presupuesto volumétrico para el modelo numérico del acuífero Jacó

CAPA	ARENAS FINAS	ALUVIÓN	TOTAL
Entradas	***Caudal (l/s)***	***Caudal (l/s)***	***Caudal (l/s)***
Infiltración por los ríos	562,24	0,00	562,24
Recarga	169,18	43,33	212,51
Carga constante	10,62	342,43	353,05
Total de entradas	**742,04**	**385,76**	**1127,80**
Salidas	***Caudal (l/s)***	***Caudal (l/s)***	***Caudal (l/s)***
Descarga océano	-22,38	-858,13	-880,51
Pozos	0,00	-153,20	-153,20
Drenaje por los ríos	-94,08	0,00	-94,08
Total de salidas	**-116,46**	**-1011,33**	**-1127,79**
Entradas-Salidas			0,01
Porcentaje de discrepancia (%)			0,00

También se observa que existe un aporte muy significativo por la infiltración de agua por medio de las zonas influentes de los ríos y las quebradas que le introduce al sistema unos 562 litros por segundo, por lo que denota que es muy importante el manejo del uso de suelo en dichos sectores así como la calidad del agua superficial que discurre por estos cauces especialmente en las zona influentes y en donde existe infraestructura en la

zona NE de Jacó, que descargan aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento; ya que los ríos y quebradas tienen una conexión hidráulica directa con el acuífero Jacó.

La principal salida del sistema se realiza por medio de la descarga de agua hacia el mar por la capa de *Aluvión* con 858 l/s y en menor grado por las *Arenas finas* descargan 22 l/s para un total de unos 880 litros por segundo; sin embargo, se considera que esta salida de agua del acuífero es muy importante ya que se podría aprovechar por medio de pozos perforados conforme se justifique su necesidad y desarrollando una gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo.

Por otra parte la extracción de agua por medio de los pozos perforados es de 153 litros por segundo en la capa de *Aluvión*, sin embargo hay que destacar que esta extracción se hizo de una manera teórica asumiendo que los pozos están bombeando los caudales reportados y con base en la información de las bases de datos institucionales y las concesiones otorgadas por la DA del MINAE.

El drenaje hacia el mar en la playa de Jacó por medio de los ríos y las quebradas equivale a 94 litros por segundo por medio de la capa de *Arenas finas*, y se supone que ese aporte de agua subterránea es muy importante ya que forma parte de la dinámica de los ecosistemas que se forman en las desembocaduras de los ríos y quebradas con la dinámica de las mareas, principalmente la quebrada Doña María, el río Copey y la quebrada Seca.

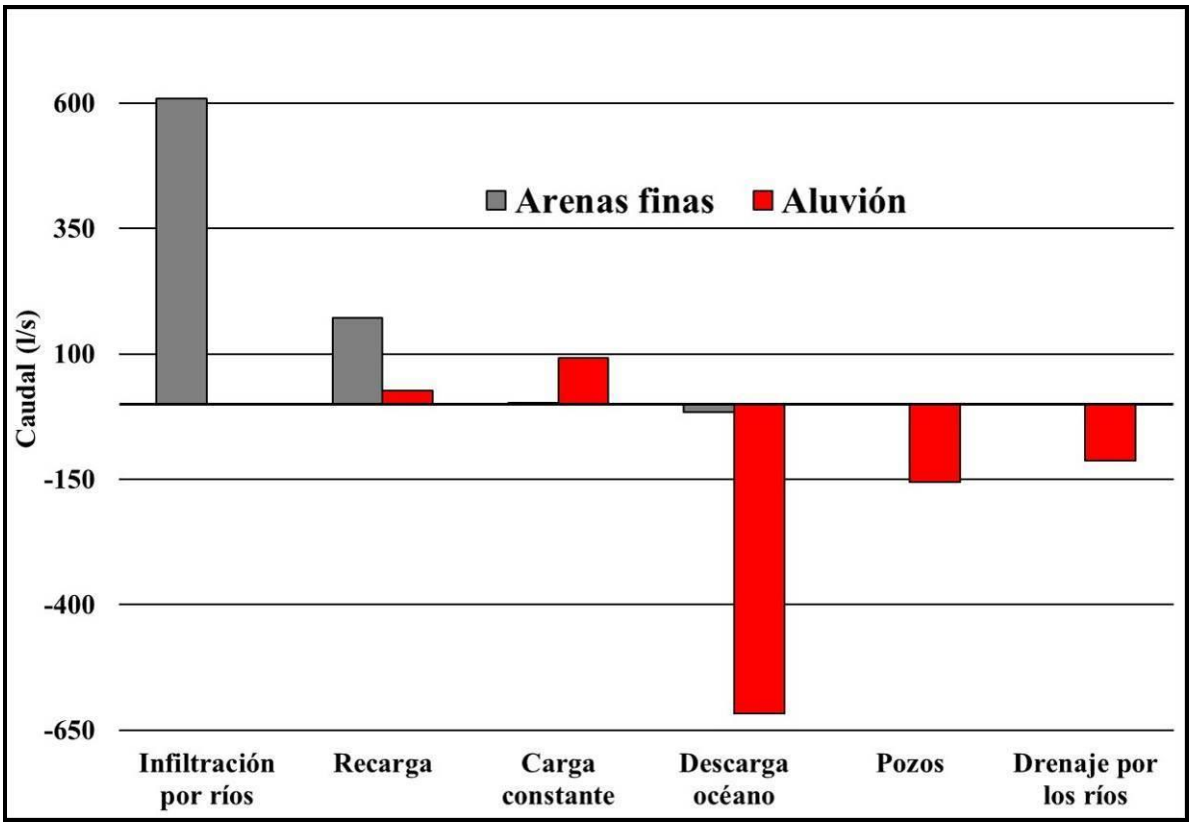


Figura 84 Gráfico del balance volumétrico de agua por capa del modelo numérico en el Acuífero Jacó

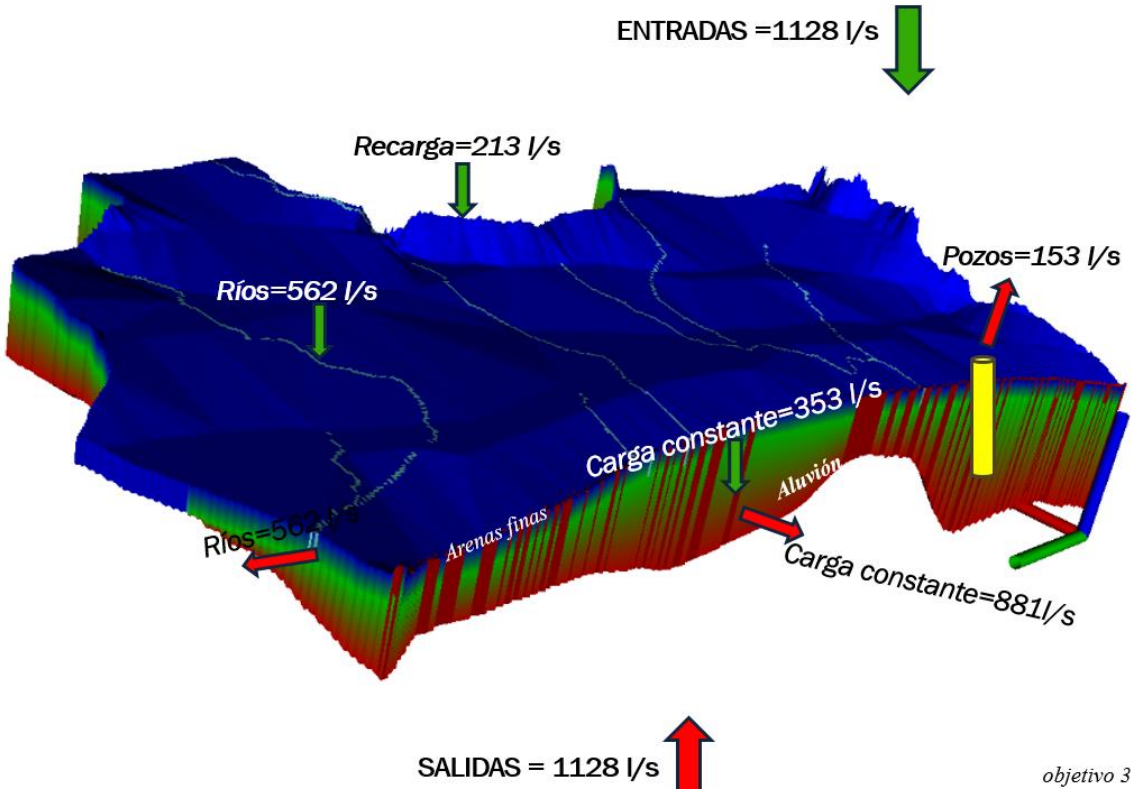


Figura 85 Bloque esquemático del Balance Volumétrico de Agua para el Acuífero Jacó, las flechas verdes indican ingresos y las flechas rojas revelan salidas del sistema

9 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL AÑO 2080 Y EL AÑO 2100

Aslam et al. (2018) plantean que la vulnerabilidad de las aguas subterráneas al cambio climático se refiere a su sensibilidad a las amenazas actuales y potenciales de los factores de estrés climático. Es una función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa que representa el nivel hasta el cual un sistema no puede soportar el impacto potencialmente dañino del cambio climático. La sensibilidad es uno de los tres elementos de vulnerabilidad y está vinculado a las propiedades innatas del acuífero. La vulnerabilidad del sistema es el efecto acumulativo de factores climáticos e indicadores no climáticos (factores); la medida en que los recursos de agua subterránea pueden ser vulnerables depende sobre la naturaleza del cambio climático y el grado de sensibilidad de un determinado sistema acuífero (Aslam et al., 2018).

El cambio climático afecta directamente la totalidad del sistema de agua subterránea (da Costa et al., 2019; Jayakumar and Lee, 2017 en Amanambu et al., 2020) principalmente en los siguientes aspectos:

i. *La interacción agua superficial - agua subterránea* (Scibek et al., 2007; Tague et al., 2008 en Amanambu et al., 2020).
ii. *Los flujos del agua subterránea, la recarga y el almacenamiento de agua subterránea* (Asoka et al., 2017; Tillman et al., 2016; Tillman et al., 2017 en Amanambu et al., 2020).

En Costa Rica existe la Dirección de Cambio Climático (DCC), como parte del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), que es la dependencia encargada de coordinar y gestionar la política pública de cambio climático en Costa Rica. La misión dela DCC es construir un país justo, resiliente y descarbonizado, centrado en el bienestar de las personas y de la naturaleza. Para lograr el objetivo general la DCC ha dividido el trabajo en cinco grandes temas, cada uno con su propio objetivo y estos son: a) Tomar mejores decisiones,

b) Implementación, c) Transparencia institucional, d) Amplificar y e) Acción para el Empoderamiento Climático (recuperado de: https://cambioclimatico.go.cr/sobre-la-dcc/).

La Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático establece en el eje instrumental 1 que se debe realizar una gestión del conocimiento sobre efectos del cambio climático, servicios climáticos y desarrollo de capacidades locales e institucionales por medio de la promoción de la investigación científica, la recolección sistemática de datos y el análisis actual y prospectivo de información sobre impactos, pérdidas y daños por amenazas hidrometeorológicas, así como cuantificación y análisis de costes, oportunidades y beneficios sociales asociados a las medidas de adaptación al cambio climático en distintos sectores(recuperado de:https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/01/Politica-Nacional-de-Adaptacion-al-Cambio-Climatico-Costa-Rica-2018-2030.pdf?x98695).

De esta manera los escenarios a futuro de los modelos numéricos para los acuíferos Jacó y Herradura serán proyectados ante la exposición de los sistemas a los cambios o factores estresantes como consecuencias de los cambios en la precipitación media mensual y la temperatura media mensual, la cual varía la evapotranspiración potencial. Los escenarios pretenden visualizar los efectos de los potenciales cambios en la recarga y el flujo del agua subterránea en ambos acuíferos. Los resultados de estos escenarios servirán como un inicio para continuar con la acción del Empoderamiento de Cambio Climático en la zona con base en el conocimiento de la potencial afectación de la recarga potencial y la dirección del flujo en los acuíferos Herradura y Jacó.

9.1 Variación en la precipitación para los años 2080 y 2099

La Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático, plantea escenarios climáticos para Costa Rica y describe los posibles cambios futuros que se presentarían en los parámetros climatológicos más importantes, la temperatura del aire, la precipitación y la nubosidad (IMN, 2000). Específicamente para la región en donde se localiza el sector de Herradura y Jacó se procedió a desarrollar el escenario climático a futuro, para lo cual se utilizaron tres escenarios de incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, estos

escenarios se conocen como IS-92a, IS-92c, e IS-92d en la nomenclatura del IPCC, los cuales, en forma general, se consideran como optimista, pesimista y moderado respectivamente, el escenario pesimista para la zona de estudio es de una disminución de la precipitación promedio mensual entre un 0,40 % a un 25 % (IMN, 2000).

Alvarado et al. (2012) desarrollaron un escenario para la climatología de 1 km de resolución de la precipitación media anual en mm para el período 2071-2100 en la cuenca Tusubres en la vertiente pacífica de Costa Rica, simulado por el modelo PRECIS con el escenario de emisiones A2 en donde para el sector de Herradura y Jacó la precipitación promedio anual sería de unos 2250 mm, lo que significa una disminución de un 14,27 % menos con respecto al precipitación promedio anual de 2624,54 mm con los datos procesados hasta el año 2019, esto para las cuatro estaciones climáticas utilizadas para caracterizar la lluvia promedio mensual en la zona de estudio (sección 5.2, Tabla 3).

Almazroui et al. (2021) elaboraron un modelo en cual plantean un escenario de un cambio en la precipitación basado en el Proyecto del Modelo de Intercomparación Acoplado en la Fase 6 *Coupled Model Intercomparison Project* (*CMIP6* por sus siglas en inglés) de un escenario alto forzado para una Ruta Socioeconómica Compartida / Ruta Representativa de Concentración (*SSP/RCP* por sus siglas en inglés), con el objetivo de examinar cambios proyectados en temperatura y precipitación en la región de América Central para el periodo del año 2021 al año 2099.

Para el año 2080 Almazroui et al (2021) definen para el Sector Sur de América Central, el cual incluye a Costa Rica; una potencial disminución entre un 7 a un 19 % para los meses de enero, febrero, marzo abril, julio, agosto, setiembre y diciembre. El escenario propone un aumento de un 1 % para los meses de mayo y junio y un aumento de un 2 a 4 % de aumento entre los meses de octubre y noviembre respectivamente. Para el año 2099 Almazroui et al. (2021) definen para la misma zona una disminución entre un 15 a un 26 % entre los meses de enero y setiembre y modelaron un aumento de un 16% para los meses de octubre, noviembre y un aumento de 1 % para el mes de diciembre.

De esta manera se propone desarrollar el cálculo de la variación de la precipitación promedio mensual para los escenarios que proponen Almazroui et al (2021) para los años 2080 y 2099; tomando como base la precipitación promedio anual al año 2019 en el sector de Herradura y Jacó, para las cuatro estaciones climáticas utilizadas en la sección 5.2; los datos y el análisis de la variación en la precipitación promedio mensual están en la siguiente tabla:

Tabla 32 Variación de la precipitación promedio mensual para los años 2080 y 2099, con base en la precipitación promedio mensual al año 2019 en el sector Herradura-Jacó

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Punta Leona	35,62	25,25	12,13	80,82	260,70	273,04	278,39	302,30	326,61	444,71	214,47	65,25
Jacó	28,16	28,05	28,22	86,09	350,42	370,42	341,87	373,30	456,90	609,36	246,86	88,72
Piedra Bruja	29,38	2,00	14,95	120,23	322,60	285,20	281,36	318,25	348,62	582,80	273,26	95,86
Muelle Herradura	40,40	0,05	5,35	70,85	232,45	248,20	301,28	400,50	441,05	630,85	224,00	72,08
Prom. Pond. precipitación (mm)	32,71	23,13	17,94	84,74	296,73	307,58	303,61	336,56	384,10	528,93	231,72	76,79
Cambio Escenario año 2080 (%)	-0,17	-0,17	-0,19	0,01	0,01	-0,15	-0,17	-0,19	-0.,7	0,02	0,04	-0,07
Cambio año 2080(mm)	-5,56	-3,93	-3,41	0,85	2,97	-46,14	-51,61	-63,95	-65,30	10,58	9,27	-5,38
Precipitación promedio 2080 (mm)	27,15	19,20	14,53	85,59	299,70	261,45	252,00	272,61	318,80	539,51	240,98	71,41
Cambio Escenario 2099 (%)	-0,20	-0,25	-0,26	-0,23	-0,22	-0,22	-0,26	-0,24	-0,15	0,16	0,16	0,01
Cambio Año 2099 (mm)	-6,54	-5,78	-4,66	-19,49	-65,28	-67,67	-78,94	-80,77	-57,62	84,63	37,07	0,77
Precipitación promedio 2099 (mm)	26,17	17,35	13,28	65,25	231,45	239,91	224,68	255,78	326,49	613,56	268,79	77,55

De este modo tenemos una precipitación de 2402,93 y 2360,26 milímetros promedio anual para los años 2080 y 2099, lo que significa una disminución de un 8 y 10 % respectivamente en relación la precipitación promedio anual de 2624,54 milímetros anuales al año 2019.

9.2 Variación en la temperatura y evapotranspiración potencial (ETP) para los años 2080 y 2099

La Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático, plantea escenarios climáticos para Costa Rica y describe los posibles cambios futuros que se presentarían en los parámetros climatológicos más importantes, la temperatura del aire, la precipitación y la nubosidad (IMN, 2000).

Específicamente para la región en donde se localiza el sector de Herradura y Jacó se procedió a desarrollar el escenario climático a futuro, para lo cual se utilizaron tres escenarios de incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, estos escenarios se conocen como IS-92a, IS-92c, e IS-92d en la nomenclatura del IPCC, los cuales, en forma general, se consideran como optimista, pesimista y moderado respectivamente, el escenario pesimista para la zona de estudio indica que los mayores incrementos de temperatura se presentan en el mes de mayo, alcanzando valores de hasta +3,5°C (IMN, 2000).

Alvarado et al. (2012) desarrollaron un escenario un para la climatología de 1km de la temperatura media anual (°C) período 2071-2100 en la cuenca Tusubres, simulado por el modelo PRECIS con el escenario de emisiones A2 en donde para el sector de Herradura y Jacó se tiene un valor de 31 °C, lo que significa un aumento de unos 4,30 °C con respecto a la temperatura media anual de 26,70 °C de la estación Damas (90009) al año 2019, como se explicó en la Tabla 4 en la sección 5.2.

Almazroui et al. (2021) construyeron un modelo en cual plantean un escenario de un cambio en la temperatura media mensual basado en el Proyecto del Modelo de Intercomparación Acoplado en la Fase 6 *Coupled Model Intercomparison Project* (*CMIP6* por sus siglas en inglés) de un escenario forzado alto para una Ruta Socioeconómica Compartida / Ruta Representativa de Concentración (*SSP/RCP* por sus siglas en inglés); en donde se daría un aumento en la temperatura media mensual entre 3,25 a 3,75 °C para el año 2080 y de 4,25 a 5,25 °C para el año 2099; en el escenario modelado para el periodo del año 2021 al año 2099 en lo que definen el Sector Sur de América Central, el cual incluye a Costa Rica.

Por consiguiente, se decide desarrollar el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) con las variaciones de la temperatura media mensual de los escenarios que propone Almazroui et al. (2021) para los años 2080 y 2099 utilizando el método de Thornthwaite (sección 5.2), los datos obtenidos están en la Tabla 33.

Considerando los datos a nivel mensual de los escenarios de precipitación y temperatura propuestos por Almazroui et al. (2021) se desarrollarán los escenarios para el año 2080 y otro para el año 2099 en vez de hacerlo para el año 2100 como se propuso en el planteamiento original de la presente investigación ya que se cuenta la información de variación mensual para el año 2099.

Tabla 33 Cálculo de la ETP mensual en milímetros mensuales para los años 2080 y 2099 con base en el cambio en la temperatura media mensual del año 2019 para la estación Damas (90009) de Quepos

ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
TEM.MAX. (°C)	31,30	32,00	32,50	32,30	31,30	30,90	30,70	30,60	30,40	30,10	29,90	30,60
TEM.MIN. (°C)	21,80	22,00	22,70	23,40	23,40	23,20	22,90	22,80	22,70	22,80	22,80	22,50
TEM.MED (°C)	26,55	27,00	27,60	27,85	27,35	27,05	26,80	26,70	26,55	26,45	26,35	26,55
ETP 2019 (mm)	**123,88**	**122,55**	**150,67**	**155,87**	**152,66**	**143,74**	**141,42**	**138,16**	**128,94**	**127,12**	**120,40**	**125,14**
AUMENTO 2080 (°C)	3,25	3,75	3,25	3,75	3,25	3,75	3,75	3,75	3,75	3,25	3,25	3,25
TEM.MED 2080 (°C)	29,80	30,75	30,85	31,60	30,60	30,80	30,55	30,45	30,30	29,70	29,60	29,80
ETP 2080 (mm)	**198,85**	**218,05**	**251,09**	**285,18**	**252,17**	**256,19**	**249,99**	**243,41**	**226,04**	**203,31**	**191,87**	**200,88**
AUMENTO 2099 (°C)	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	5,25	5,25	4,25	4,25	4,25	4,25
TEM.MED 2099 (°C)	30,80	31,25	31,85	32,10	31,60	31,30	32,05	31,95	30,80	30,70	30,60	30,80
ETP 2099 (mm)	**236,86**	**237,52**	**297,35**	**309,93**	**299,03**	**279,02**	**322,30**	**314,07**	**246,53**	**242,31**	**228,82**	**239,28**

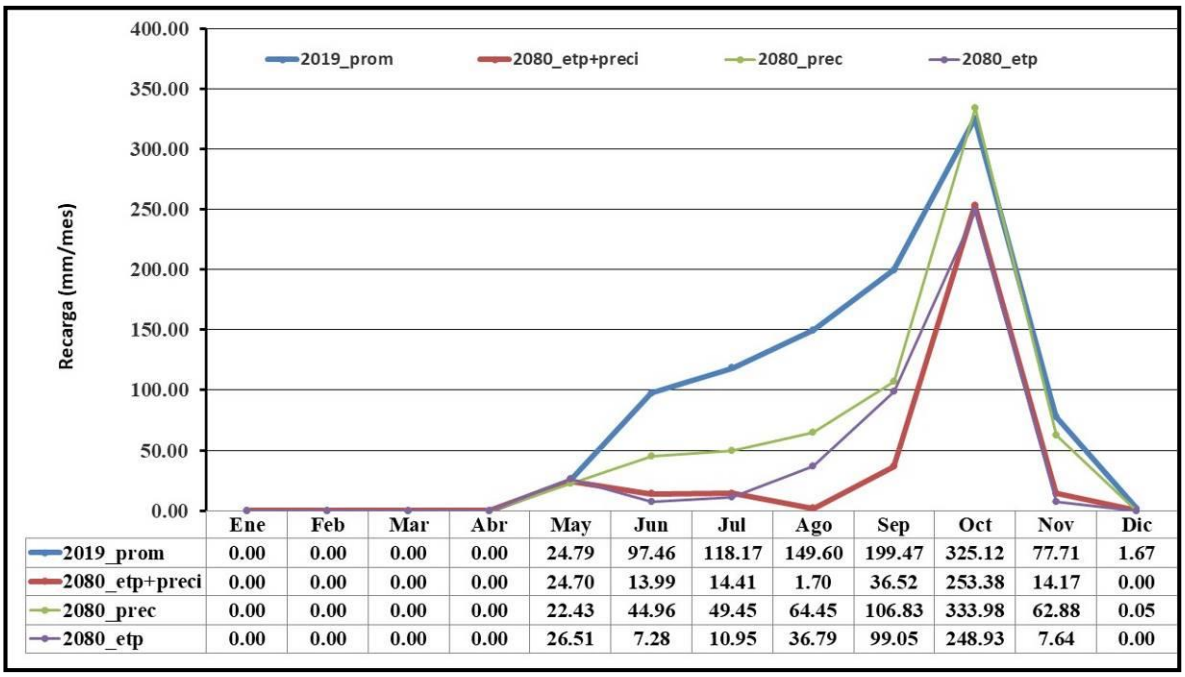
9.3 Recarga potencial

Una vez analizada la información de la variación de la precipitación promedio mensual y la variación de la temperatura media mensual, se hizo el cálculo de la recarga potencial de agua hacia los acuíferos para los escenarios climáticos al año 2080 y también para el año 2099 bajo los siguientes contextos:

a) Con la afectación de la variación de la precipitación promedio mensual y la ETP mensual en los escenarios de los años 2080 y 2099 (*2080_etp+prec y 2099_etp+prec* respectivamente).
b) Alterando la precipitación para el año 2080 y el año 2099 y manteniendo la ETP promedio mensual al año 2019 para la estación Quepos (*2080_prec y 2099_prec* respectivamente).
c) Modificando la ETP para el año 2080 y el año 2099 y manteniendo la precipitación promedio mensual de la zona al año 2019 (*2080_etp y 2099_etp* respectivamente).

Los resultados se revelan en la Figura 86 y la Figura 87, en donde para ambos años se observa una disminución muy drástica de la recarga cuando se hacen los cálculos de la recarga potencial con la afectación de la precipitación promedio mensual y la ETP mensual con respecto al año promedio utilizado que es el 2019; ya que se tiene una disminución de un 64 % de la recarga total para el año 2080 y un 61 % para el año 2099; aunque se esperaría que la recarga sea menor en el año 2099 por el aumento de la temperatura media mensual, el escenario para dicho año propone un aumento de un 16% en la precipitación en los meses de octubre y noviembre lo que compensa en cierto grado la disminución de la recarga en el escenario anual calculado (Tabla 32).

Alterando la precipitación para el año 2080 y el año 2099; y manteniendo la ETP promedio mensual al año 2019 se tiene una disminución de un 31 % de la recarga total para el año 2080 y un 18 % para el año 2099; en donde se refleja nuevamente el efecto del aumento de un 16 % en la precipitación en los meses de octubre y noviembre favoreciendo la recarga potencial acumulada en cada año (Tabla 32).

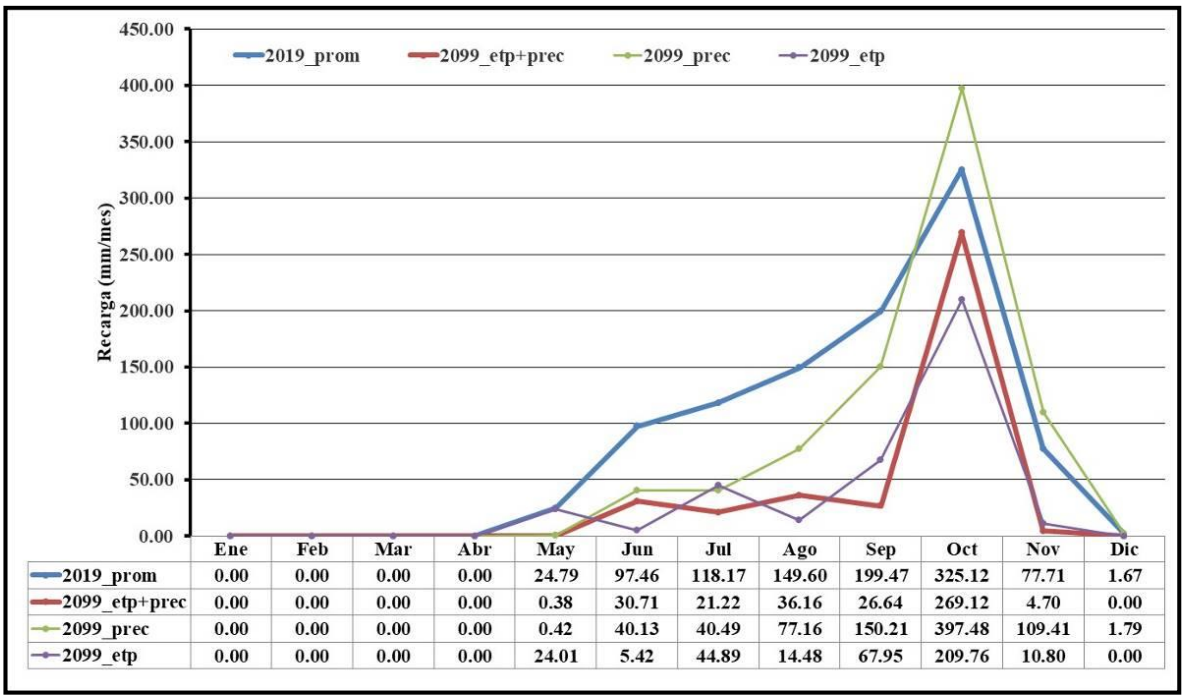


	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2019_prom	0.00	0.00	0.00	0.00	24.79	97.46	118.17	149.60	199.47	325.12	77.71	1.67
2080_etp+preci	0.00	0.00	0.00	0.00	24.70	13.99	14.41	1.70	36.52	253.38	14.17	0.00
2080_prec	0.00	0.00	0.00	0.00	22.43	44.96	49.45	64.45	106.83	333.98	62.88	0.05
2080_etp	0.00	0.00	0.00	0.00	26.51	7.28	10.95	36.79	99.05	248.93	7.64	0.00

Figura 86 Gráfico de la recarga potencial para el escenarios de cambio climáticos al año 2080

Modificando la ETP para el año 2080 y el año 2099 y manteniendo la precipitación promedio mensual de la zona al año se tiene una disminución de un 56 % de la recarga total para el año 2080 y un 62 % para el año 2099, la diferencia se debe a que se tienen menores valores de ETP para el año 2080 con respecto al año 2099 (véase la Tabla 33).

Una vez analizados los datos y los gráficos de la Figura 86 y la Figura 87 se concluye que el factor de mayor peso en la disminución de la recarga potencial promedio, para los escenarios de cambio climático para los años 2080 y 2099 en la zona de estudio, es el aumento de la temperatura media mensual y por ende el aumento en la ETP; así mismo se ha determinado que el escenario más favorable, pero al mismo tiempo conservador es solo alterando la ETP promedio mensual. Así mismo la propuesta de mantener la precipitación promedio mensual al año 2019 es conservador tomando en cuenta que los escenarios se dan aumentos de las precipitaciones promedio mensuales para algunos meses de la época lluviosa.



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2019_prom	0.00	0.00	0.00	0.00	24.79	97.46	118.17	149.60	199.47	325.12	77.71	1.67
2099_etp+prec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	30.71	21.22	36.16	26.64	269.12	4.70	0.00
2099_prec	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	40.13	40.49	77.16	150.21	397.48	109.41	1.79
2099_etp	0.00	0.00	0.00	0.00	24.01	5.42	44.89	14.48	67.95	209.76	10.80	0.00

Figura 87 Gráfico de la recarga potencial para el escenarios de cambio climáticos al año 2099

De esta manera se ha decido crear para toda la zona de estudio, la corrida de la recarga potencial con la metodología balance de humedad de suelos (Schosinsky 2006) utilizando los datos de los escenarios de precipitación promedio mensual al año 2019 y con los datos de los escenarios del aumento de la ETP para el año 2080 y otra para el año 2099, los resultados de la recarga potencial promedio anual en mm para cada unidad de balance (sección 9.3) se pueden observar en la Tabla 34 y en los Anexos 7 y 8; los datos de la recarga potencial promedio mensual para toda la zona de estudio se grafican en la Figura 88.

Tabla 34 Recarga potencial para los escenarios de cambio climático para los años 2080 y 2099 para cada unidad de balance

UNIDAD DE BALANCE	Rp_2019 (mm/año)	Rp_2080 (mm/año)	Rp_2099 (mm/año)
Areniscas	854,92	323,25	231,74
Basaltos2	804,73	531,97	560,81
Basaltos3	1097,65	290,35	185,14
Basaltos4	1103,21	528,52	536,02
Herradura	1031,53	438,50	318,88
Jaco	1071,94	510,30	431,33
Recarga Potencial Promedio	**994,00**	**437,15**	**377,32**

Los escenarios de Cambio Climático para el año 2080 y 2099 plantean una disminución drástica en la recarga potencial de los acuíferos con un 56 % para el año 2080 y un 62 % para el año 2099, esto se debe a la proyección del aumento de la temperatura media mensual lo cual provoca también el aumento en la ETP mensual.

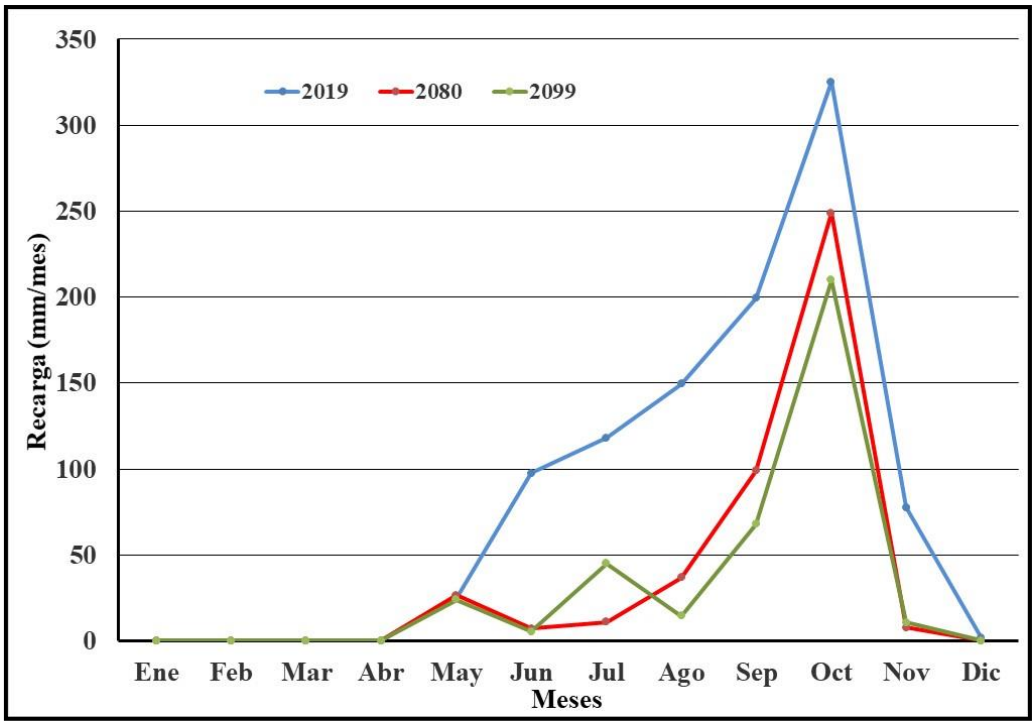


Figura 88 Gráfico de la recarga potencial por unidad de balance para los escenarios climáticos de los años 2080 y 2099 (afectando solo la ETP para los escenarios climáticos)

9.4 Modelos numéricos del acuífero Herradura para los escenarios de cambio climático en los Años 2080 y 2099

Los modelos numéricos en el acuífero Herradura, para los escenarios para cambio climático para el año 2080 y el año 2099 se desarrollarán en estado estacionario, la propuesta del escenario para el año 2080 es variando las siguientes condiciones de frontera:

i. Se mantiene la precipitación promedio mensual al año 2019.
ii. Variación de la recarga con el escenario del cálculo de la ETP por el aumento de la temperatura al año 2080, el valor de la recarga es de 438,50 mm/año ($1{,}39\times10^{-8}$m/s).

iii. Aumento de un 50 % de la extracción de agua subterránea por medio de los pozos perforados, para una extracción proyectada de 295 l/s entre todos los pozos (Tabla 35).

Las demás condiciones de frontera se mantienen igual que para las condiciones actuales del modelo numérico propuesto (sección 8.1.3).

Tabla 35 Aumento del 50 % de extracción de los pozos al año 2080 en el acuífero Herradura

POZO	X (LONG)	Y (LAT)	Q (m^3/s) AÑO 2019	Q (m^3/s) AÑO 2080
HE-005	428642	1067653	-0,0350	-0,0525
HE-017	429443	1068382	-0,0038	-0,0057
HE-020	430082	1068797	-0,0097	-0,0146
HE-024	428893	1068332	-0,0045	-0,0068
HE-027	429143	1068052	-0,0180	-0,0270
HE-028	428813	1067833	-0,0300	-0,0450
HE-035	428330	1067625	-0,0095	-0,0143
HE-043	429343	1068612	-0,0025	-0,0038
HE-045	430236	1068677	-0,0224	-0,0336
HE-048	428742	1067733	-0,0020	-0,0030
HE-059	429843	1068232	-0,0080	-0,0120
HE-071	429032	1068368	-0,0150	-0,0225
HE-076	428942	1067608	-0,0070	-0,0105
HE-080	428762	1068110	-0,0150	-0,0225
HE-088	428483	1067475	-0,0020	-0,0030
HE-098	428602	1067283	-0,0009	-0,0014
HE-101	430452	1068642	-0,0015	-0,0023
HE-112	430448	1068501	-0,0042	-0,0063
HE-168	429035	1068028	-0,0008	-0,0011
HE-131	429806	1068326	-0,0030	-0,0045
TS-091	429991	1070386	-0,0009	-0,0014
TS-127	430455	1069172	-0,0010	-0,0015
TOTAL			**-0,1966**	**-0,2949**

La propuesta del escenario para el año 2099 es variando las siguientes condiciones de frontera:

i. Se mantiene la precipitación promedio mensual al año 2099.
ii. Variación de la recarga, con el escenario del cálculo de la ETP por el aumento de la temperatura al año 2099, el valor de la recarga es de 318,88 mm/año ($1{,}01\times10^{-8}$m/s).
iii. Aumento de un 100 % de la extracción de agua subterránea por medio de los pozos perforados, para una extracción proyectada de 393 l/s entre todos los pozos (Tabla 36.

Las demás condiciones de frontera se mantienen igual que para las condiciones actuales del modelo propuesto (sección 8.1.3).

Tabla 36 Aumento del 100 % de extracción de los pozos al año 2099 en el acuífero Herradura

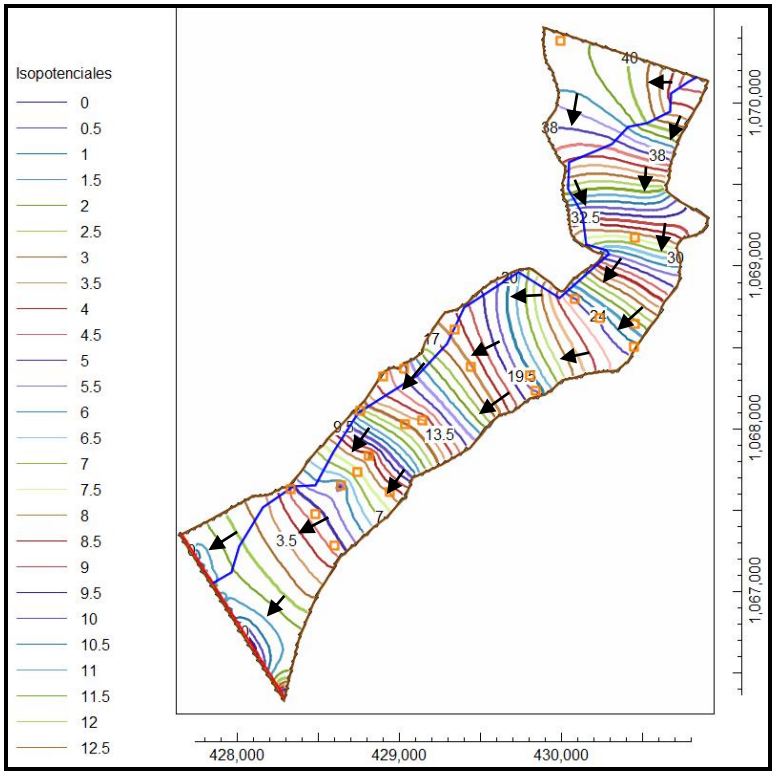
POZO	X (LONG)	Y (LAT)	Q (m^3/s) AÑO 2019	Q (m^3/s) AÑO 2099
HE-005	428642	1067653	-0,0350	-0,0700
HE-017	429443	1068382	-0,0038	-0,0076
HE-020	430082	1068797	-0,0097	-0,0194
HE-024	428893	1068332	-0,0045	-0,0090
HE-027	429143	1068052	-0,0180	-0,0360
HE-028	428813	1067833	-0,0300	-0,0600
HE-035	428330	1067625	-0,0095	-0,0190
HE-043	429343	1068612	-0,0025	-0,0050
HE-045	430236	1068677	-0,0224	-0,0447
HE-048	428742	1067733	-0,0020	-0,0040
HE-059	429843	1068232	-0,0080	-0,0160
HE-071	429032	1068368	-0,0150	-0,0300
HE-076	428942	1067608	-0,0070	-0,0140
HE-080	428762	1068110	-0,0150	-0,0300
HE-088	428483	1067475	-0,0020	-0,0040

HE-098	428602	1067283	-0,0009	-0,0018
HE-101	430452	1068642	-0,0015	-0,0030
HE-112	430448	1068501	-0,0042	-0,0084
HE-168	429035	1068028	-0,0008	-0,0015
HE-131	429806	1068326	-0,0030	-0,0060
TS-091	429991	1070386	-0,0009	-0,0018
TS-127	430455	1069172	-0,0010	-0,0020
TOTAL			**-0,1966**	**-0,3932**

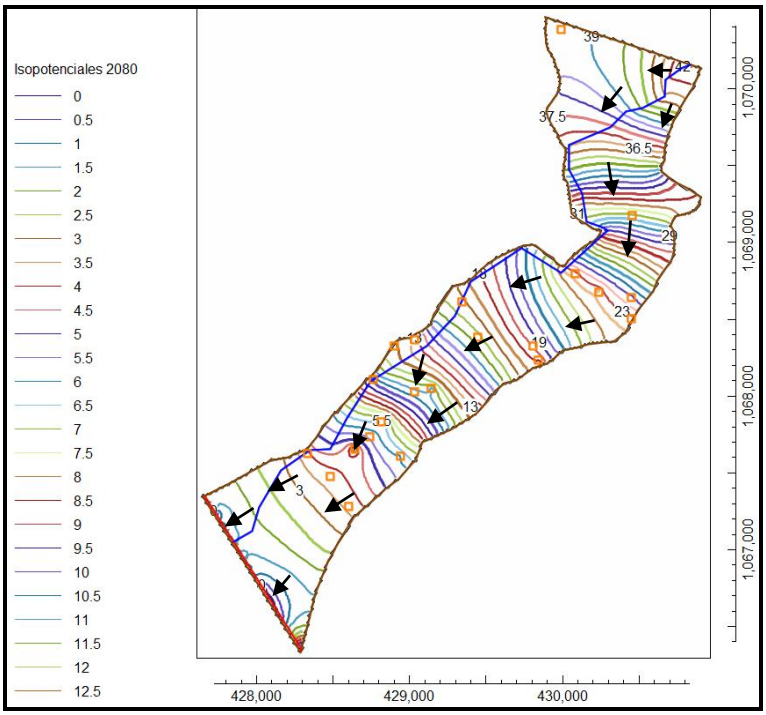
9.4.1 Resultados de los modelos numéricos para el acuífero Herradura en los escenarios de los años 2080 y 2099

Dirección de Flujo y Gradiente Hidráulico

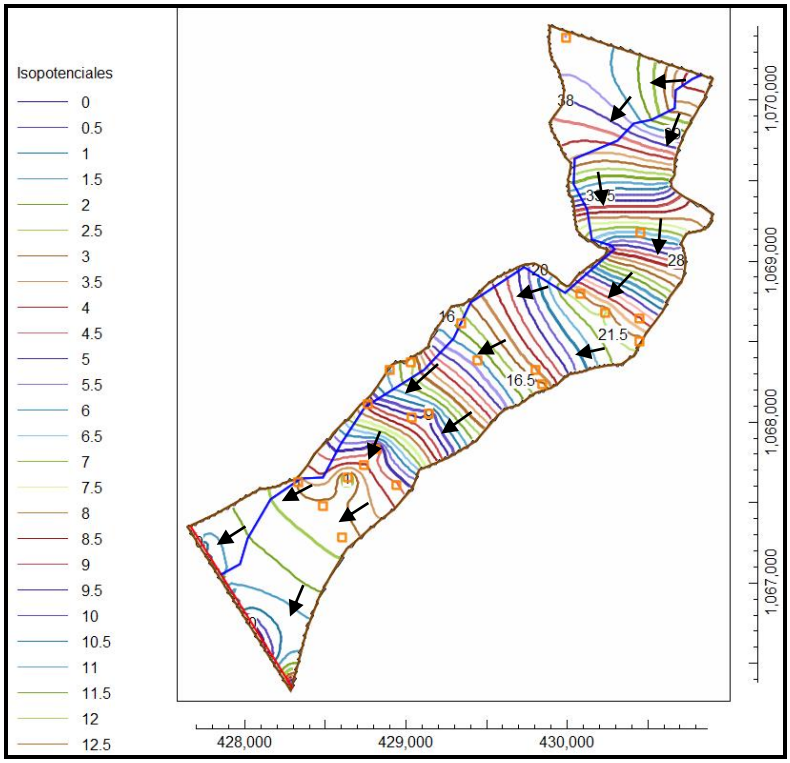
El análisis del flujo del agua subterránea en el acuífero Herradura se mantiene prácticamente sin ninguna variación para los años 2080 y 2099, para la zona cercana a la playa de Herradura el gradiente del agua subterránea es muy bajo, con valores entre 0,0003 a 0,0005 esto por ser la zona más plana cercana a la zona de descarga al océano y en el sector norte y noreste de Herradura el gradiente oscila entre 0,01 y 0,02; como se muestra en los tres mapas de las curvas isopotenciales de la Figura 89.



a) Año 2019



b) Año 2080

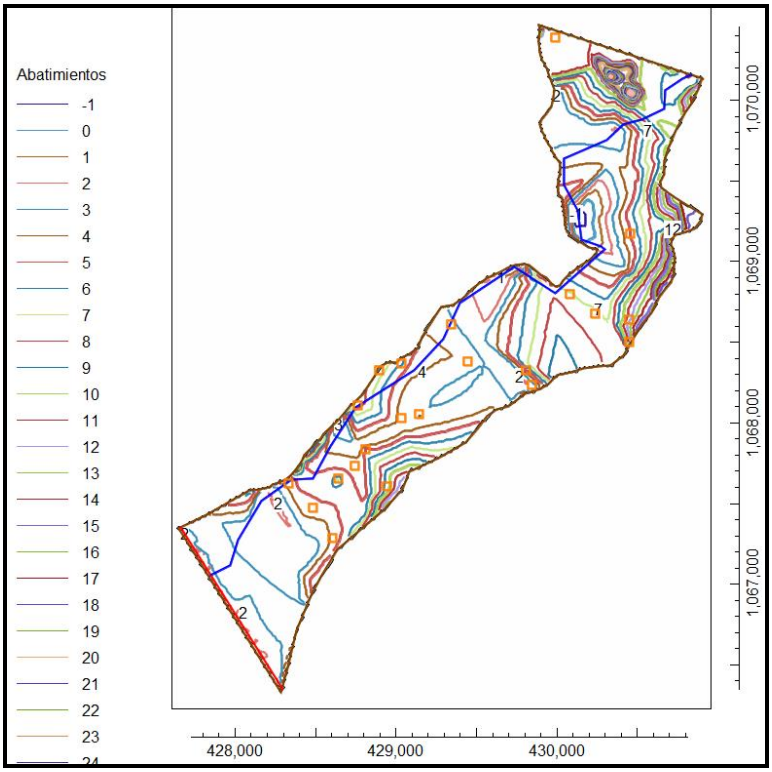


c) Año 2099

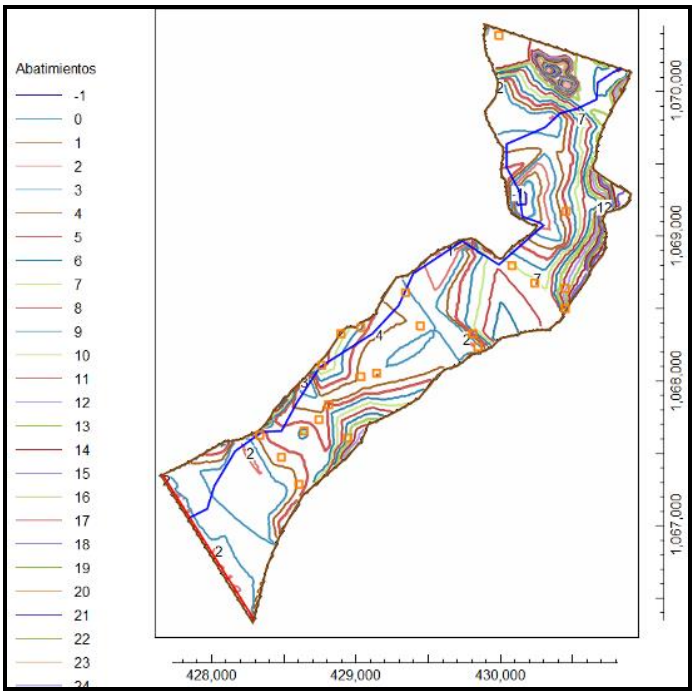
Figura 89 Mapas de las curvas isopotenciales del acuífero Herradura para los años 2019 a), 2080 b) y 2099 c)

Abatimientos proyectados

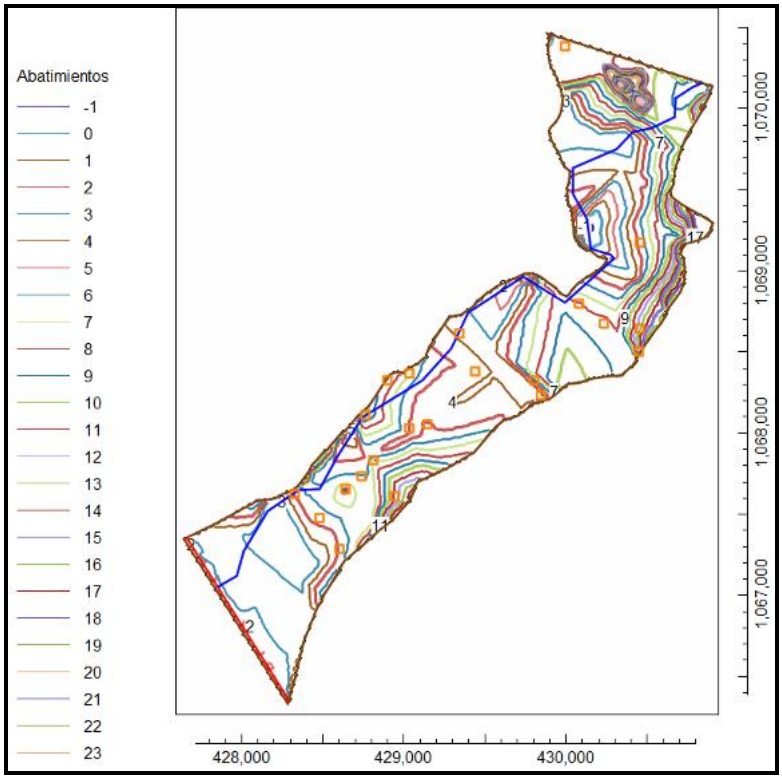
Los abatimientos proyectados para los escenarios al año 2080 y al año 2099, con respecto al abatimiento del año 2019; es de aproximadamente un metro en el acuífero Herradura en el año 2080 y de dos metros para el año 2099, la proyección se observa en la siguiente figura en donde se comparan los abatimientos para el año 2019 (Figura 89a) y los abatimientos proyectados con los escenarios de cambio climático para el año 2080 (Figura 89b) y el año 2099 (Figura 89c).



a) Año 2019



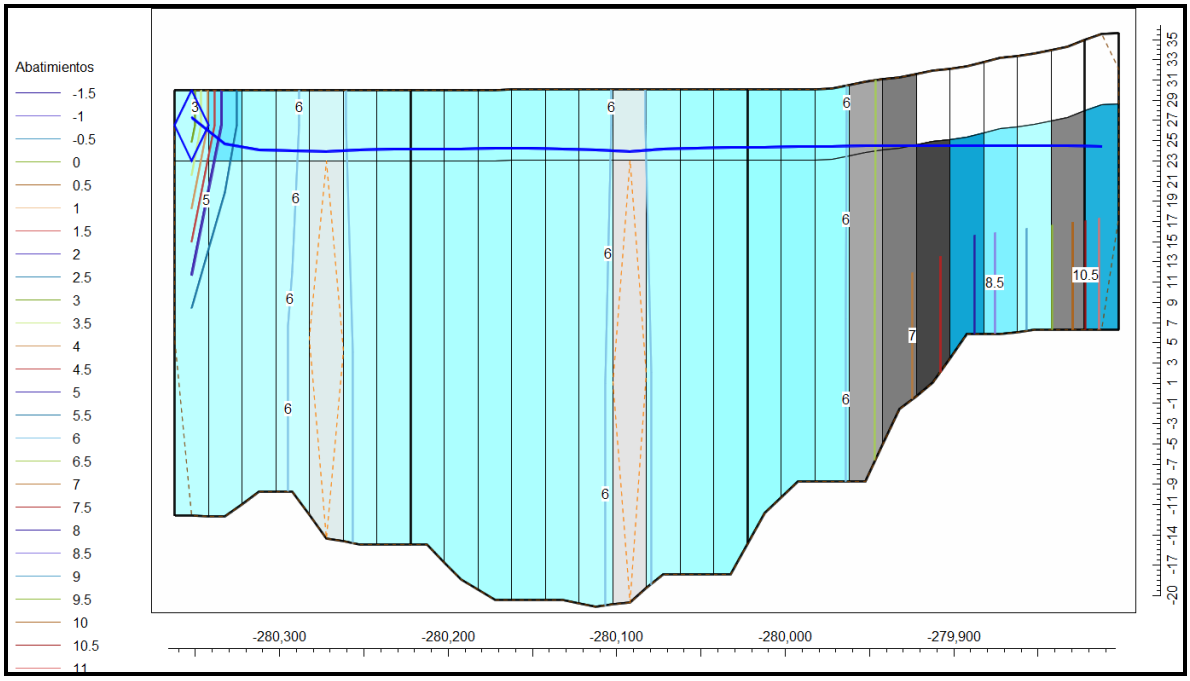
b) Año 2080



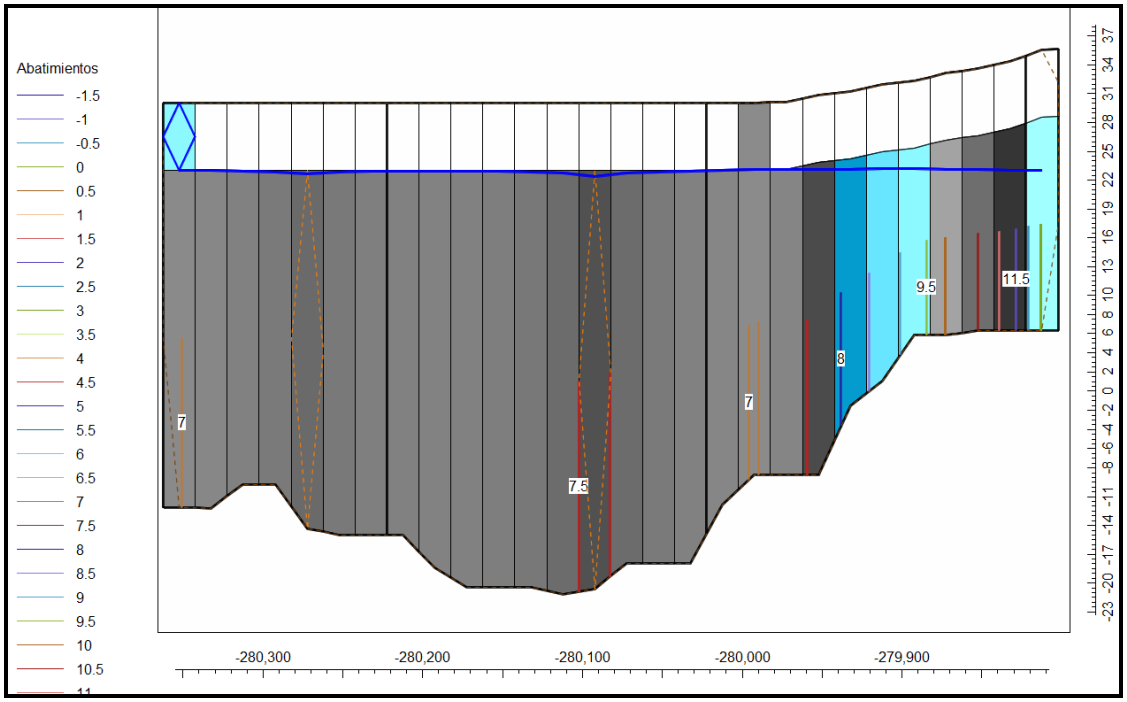
c) Año 2099

Figura 90 Mapas de abatimientos en el acuífero Herradura para el año 2019 a), para el año 2080 b) y para el año 2099 c)

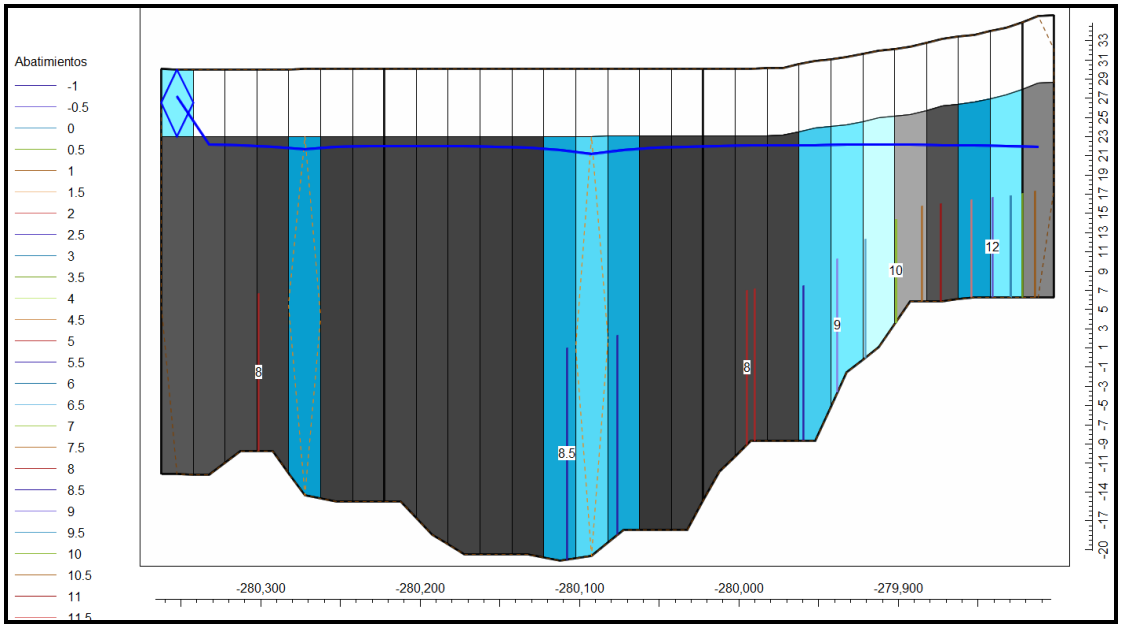
En los tres perfiles de la Figura 91 se muestran los valores de los abatimientos con base en el escenario de cambio climático para el año 2080 y el año 2099, se ilustran en dichos perfiles los dos pozos principales de la ASADA de Herradura (HE-25 y HE-45) en donde se observa el abatimiento proyectado de 1 metro para el año 2080 y de dos metros para el año 2099, ambos con respecto a la referencia del abatimiento para el año 2019 y bajo las condiciones de bombeo actuales, esta línea de perfil corresponde al Perfil 3 de la sección 8.1.6 (Figura 67).



a) Año 2019



d) Año 2080

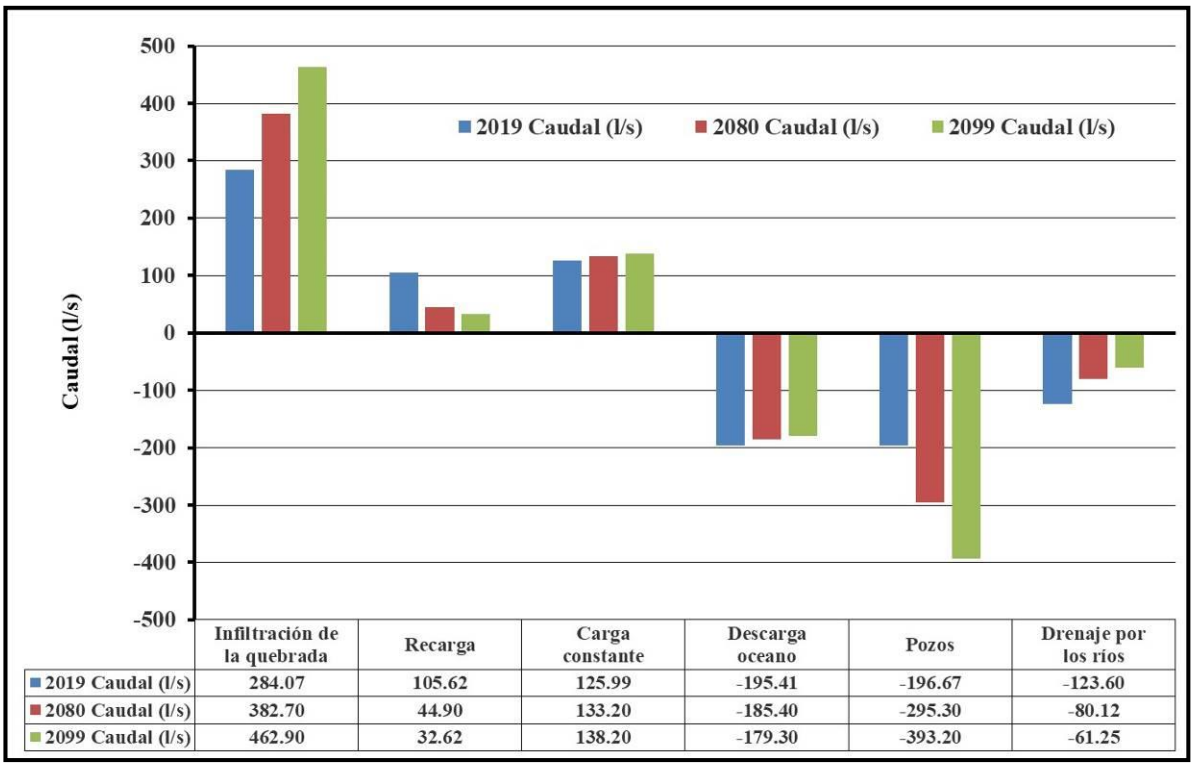


e) Año 2099

Figura 91 Perfiles transversales con los abatimientos en el acuífero Herradura para el año 2019 a), para el año 2080 b) y para el año 2099 c); (exageración vertical seis veces la horizontal)

Balance del agua subterránea en el acuífero Herradura para los años 2080 y 2099

En el gráfico de la Figura 92 se tiene el balance volumétrico total para el acuífero Herradura en las condiciones actuales y en los dos escenarios planteados en el año 2080 y el año 2099; se observa un aumento en el valor de la infiltración de la quebrada, pasando de 284 l/s en el año 2019 a 463 l/s en el año 2099; sin embargo este dato tiene que manejarse con precaución ya que esto puede ser un resultado del modelo numérico en donde el código MODFLOW trata de compensar la disminución tan drástica de la recarga que disminuye de 105 l/s en el año 2019 a 33 l/s en el año 2099 y este mismo comportamiento se tiene para el año 2080, sin embargo se tiene que destacar el rol fundamental de la quebrada Cañablancal con el aporte de agua al acuífero en las zonas influentes, especialmente en la época seca por medio del flujo base que descargan de las rocas del Complejo de Nicoya y de la formación Punta Carballo.



	Infiltración de la quebrada	Recarga	Carga constante	Descarga oceano	Pozos	Drenaje por los ríos
2019 Caudal (l/s)	284.07	105.62	125.99	-195.41	-196.67	-123.60
2080 Caudal (l/s)	382.70	44.90	133.20	-185.40	-295.30	-80.12
2099 Caudal (l/s)	462.90	32.62	138.20	-179.30	-393.20	-61.25

Figura 92 Gráfico del balance volumétrico de agua para los modelos numéricos del Acuífero Herradura (años 2019, 2080 y 2099)

En los datos y el gráfico de la figura anterior también se observa claramente la disminución de la recarga potencial de agua hacia el acuífero que pasa de 106 l/s en el año 2029 a 33 l/s en el año 2099, el drenaje por la quebrada Cañablancal en los sectores efluentes pasa de 124 l/s en el año 2019 a 61 l/s en el año 2099; lo cual es algo que puede impactar de manera negativa lo posibilidad de utilizar más agua subterránea por medio de la extracción de pozos.

También el análisis arroja que la descarga en el océano en el sector de la playa de Herradura disminuye de 195 l/s en el año 2019 a 179 l/s en el año 2099, esto provocaría un impacto negativo a los ecosistemas dependientes del agua subterránea en los humedales de la playa Herradura; misma situación se tiene para el año 2080 pero en una proporción menor, sin embargo siempre con la tendencia a la disminución de esta descarga natural del sistema acuífero.

9.5 Modelos numéricos del acuífero Jacó para los escenarios de Cambio Climático en los Años 2080 y 2099

Al igual que el acuífero Herradura se desarrollarán los escenarios para dos modelos numéricos del acuífero Jacó, uno para el año 2080 y otro para el año 2099 y también ambos modelos en estado estacionario, la propuesta del escenario en esta zona para el año 2080 es variando las siguientes condiciones de frontera:

i. Se mantiene la precipitación promedio mensual al año 2019.
ii. Variación de la recarga, con el escenario del cálculo de la ETP por el aumento de la temperatura al año 2080, el valor de la recarga es de 510,30 mm/año ($1,62\times10^{-8}$m/s).
iii. Aumento de un 50 % de la extracción de agua subterránea por medio de los pozos perforados para una extracción proyectada de 230 l/s entre todos los pozos (Tabla 37).

Las demás condiciones de frontera se mantienen igual que para las condiciones actuales del modelo propuesto para el acuífero Jacó (sección 8.2.4).

Tabla 37 Aumento del 50 % de extracción de los pozos al año 2080 en el acuífero Jacó

POZO	X (LONG)	Y (LAT)	Q (m^3/s) AÑO 2019	Q (m^3/s) AÑO 2080
HE-002	431450	1063558	-0,0008	-0,0011
HE-003	430529	1064181	-0,0020	-0,0030
HE-004	432238	1063030	-0,0024	-0,0036
HE-016	432788	1062679	-0,0005	-0,0008
HE-019	431865	1064930	-0,0150	-0,0225
HE-047	431790	1064780	-0,0030	-0,0045
HE-068	431792	1064722	-0,0250	-0,0375
HE-069	431770	1064762	-0,0290	-0,0435
HE-077	431239	1064431	-0,0140	-0,0210
HE-106	431571	1063472	-0,0020	-0,0030
HE-120	432059	1063333	-0,0115	-0,0173
HE-121	432150	1063345	-0,0050	-0,0075
HE-134	430995	1065104	-0,0430	-0,0645
TOTAL			**-0,1569**	**-0,2297**

La propuesta del escenario para el año 2099 es variando las siguientes condiciones de frontera:

i. Se mantiene la precipitación promedio al año 2099.
ii. Variación de la recarga, con el escenario del cálculo de la ETP por el aumento de la temperatura al año 2099, el valor de la recarga es de 431,33 mm/año ($1,37\times10^{-8}$m/s).
iii. Aumento de un 100 % de la extracción de agua subterránea por medio de los pozos perforados. para una extracción proyectada de 306 l/s entre todos los pozos (Tabla 38).

Las demás condiciones de frontera se mantienen igual que para las condiciones actuales del modelo propuesto (sección 8.2.4).

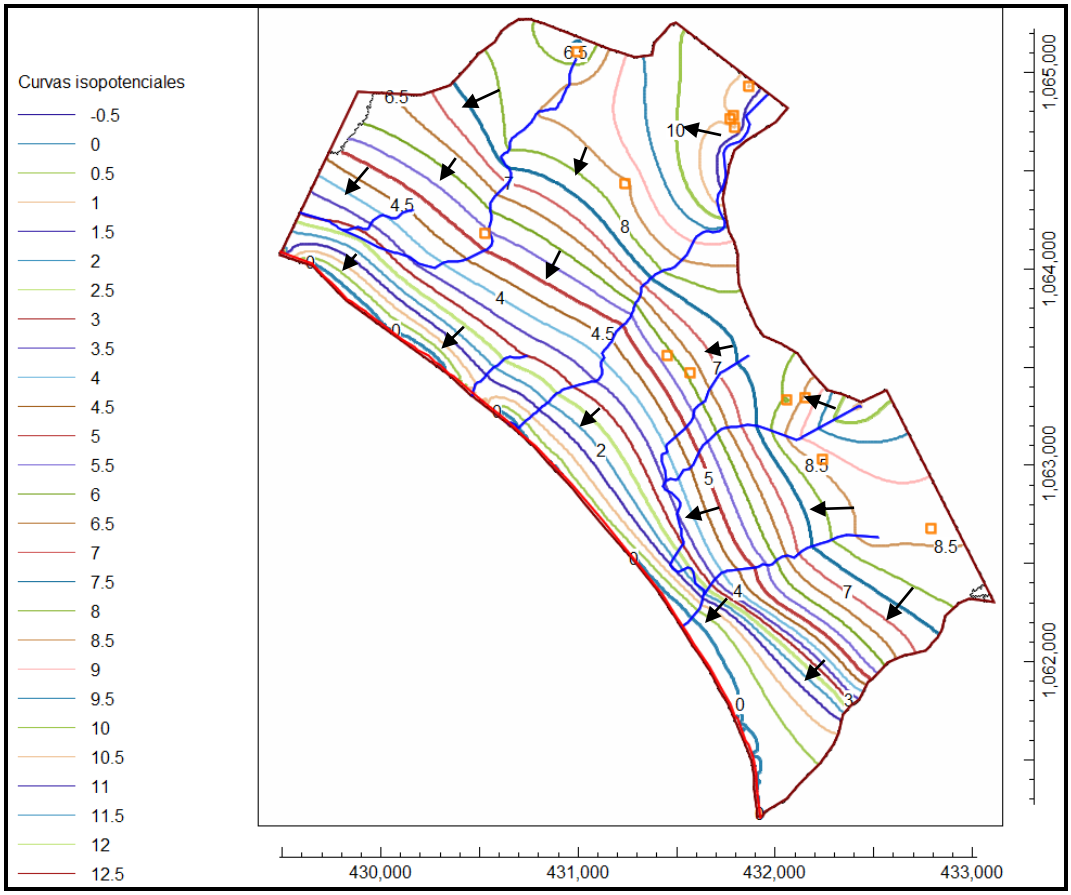
Tabla 38 Aumento del 100 % de extracción de los pozos al año 2099 en el acuífero Jacó

POZO	X (LONG)	Y (LAT)	Q (m^3/s) AÑO 2019	Q (m^3/s) AÑO 2099
HE-002	431450	1063558	-0,0008	-0,0015
HE-003	430529	1064181	-0,0020	-0,0040
HE-004	432238	1063030	-0,0024	-0,0048
HE-016	432788	1062679	-0,0005	-0,0010
HE-019	431865	1064930	-0,0150	-0,0300
HE-047	431790	1064780	-0,0030	-0,0060
HE-068	431792	1064722	-0,0250	-0,0500
HE-069	431770	1064762	-0,0290	-0,0580
HE-077	431239	1064431	-0,0140	-0,0280
HE-106	431571	1063472	-0,0020	-0,0040
HE-120	432059	1063333	-0,0115	-0,0230
HE-121	432150	1063345	-0,0050	-0,0100
HE-134	430995	1065104	-0,0430	-0,0860
TOTAL			**-0,1569**	**-0,3063**

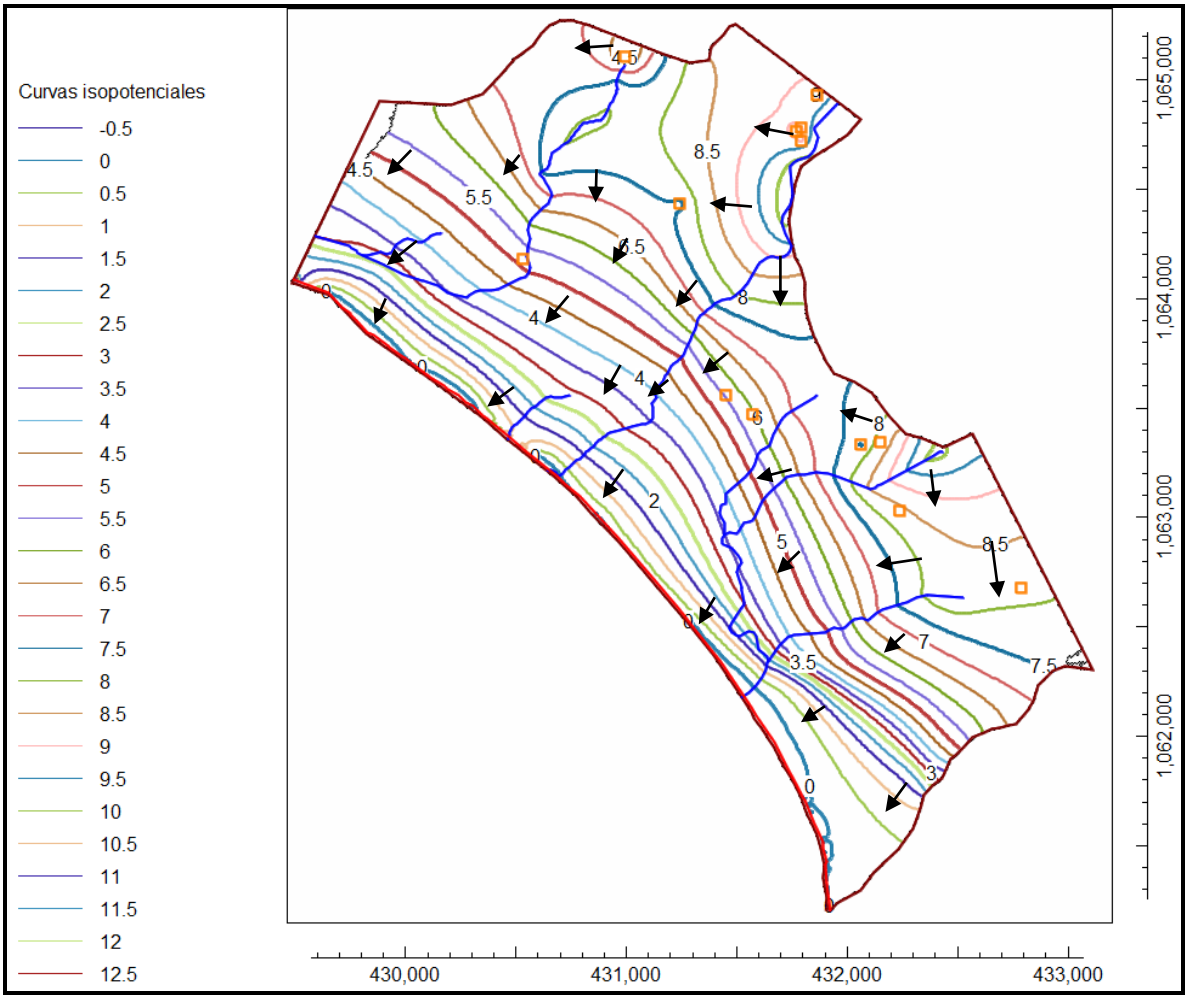
9.5.1 Resultados de los Modelos Numéricos para el acuífero Jacó en los escenarios de los años 2080 y 2099

Dirección de Flujo y Gradiente Hidráulico

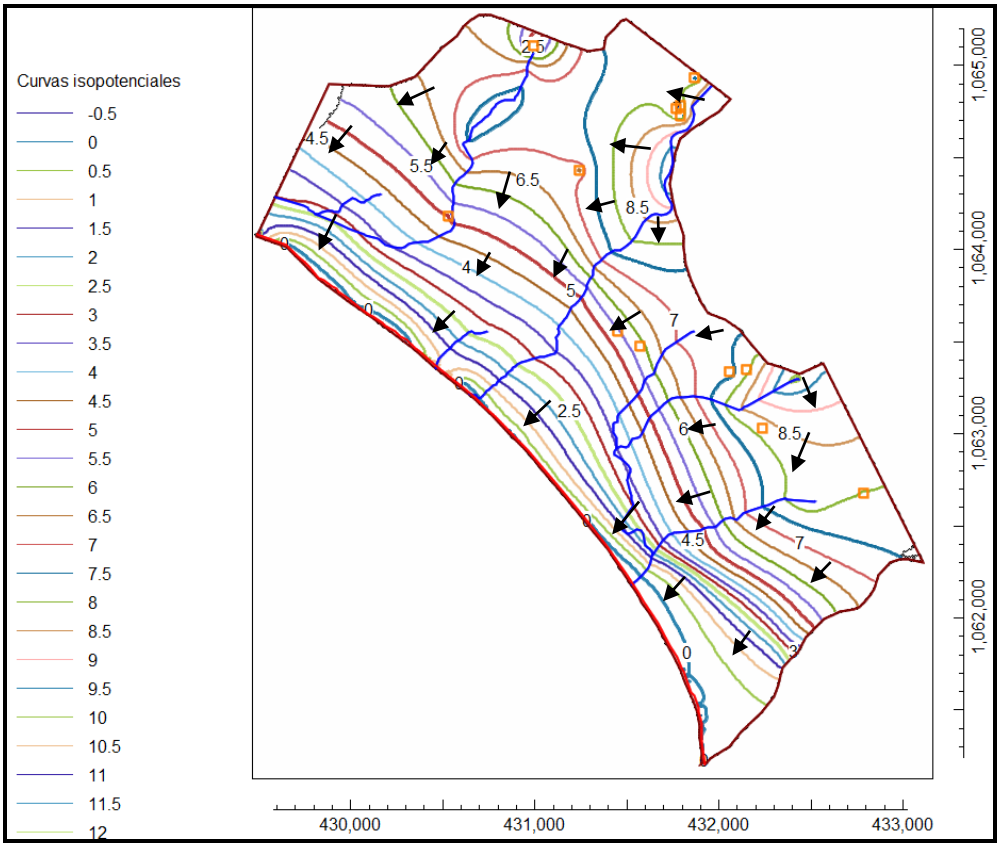
El análisis del flujo del agua subterránea en el acuífero Jacó se mantiene prácticamente sin ninguna variación para los años 2080 y 2099, se conserva el gradiente muy bajo entre un 0,004 - 0,008 y la dirección del flujo es sur y suroeste hacia la playa Jacó como se muestra en los tres mapas de las curvas isopotenciales que están en la Figura 93.



a) Año 2019


Curvas isopotenciales
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
8.5
9
9.5
10
10.5
11
11.5
12
12.5
430,000
431,000
432,000
433,000
1,065,000
1,064,000
1,063,000
1,062,000

b) Año 2080

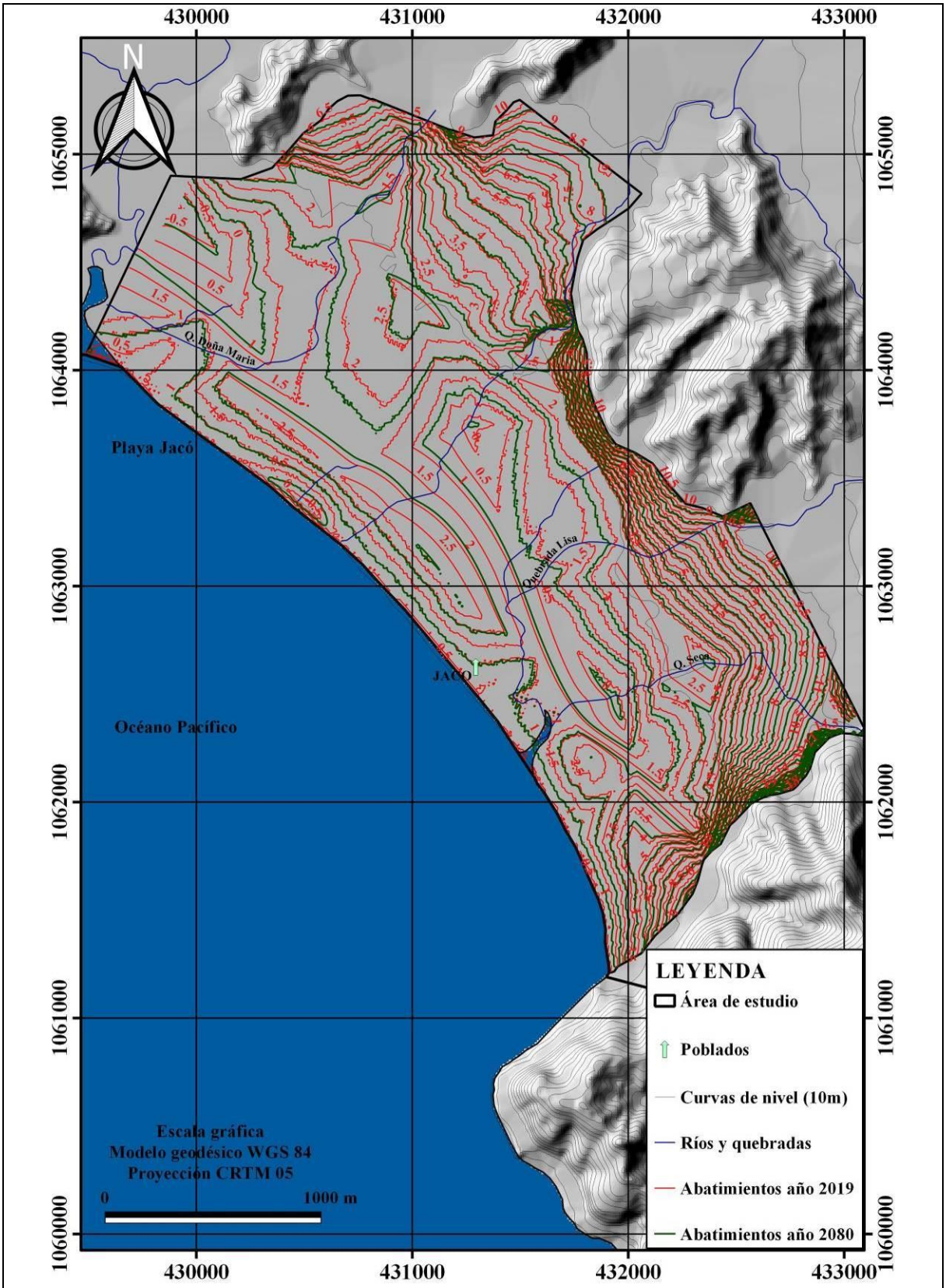


c) Año 2099

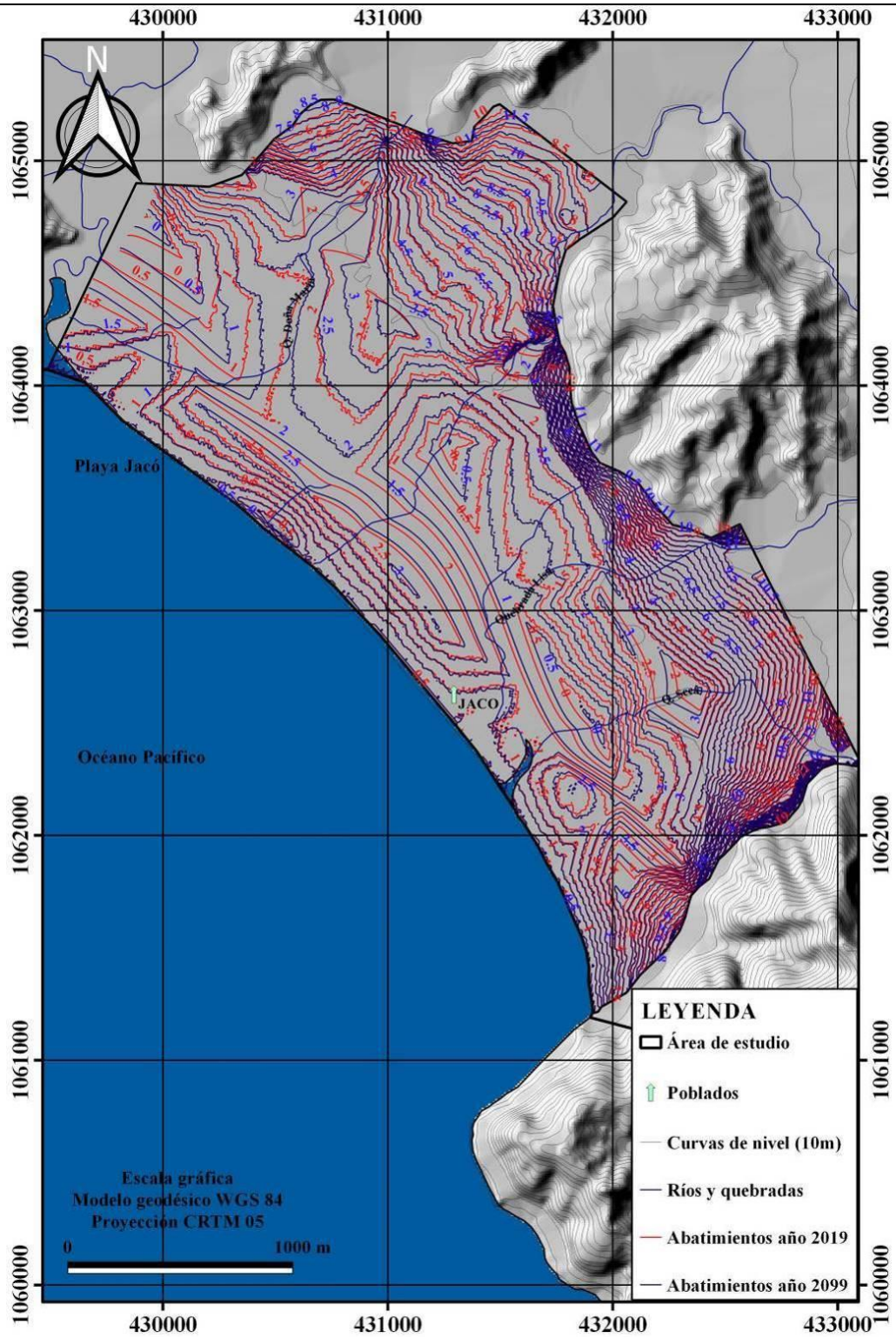
Figura 93 Mapas de las curvas isopotenciales del acuífero Jacó para los años 2019 a), 2080 b) y 2099 c)

Abatimientos proyectados

Los abatimientos proyectados para los escenarios de cambio climático al año 2080 y al año 2099, con respecto al abatimiento del año 2019; es de aproximadamente un metro y medio en el acuífero Jacó en el año 2080 y de tres a tres metros y medio para el año 2099, la proyección se observa en la siguiente figura en donde se comparan los abatimientos con respecto al año 2019 en el Mapa A) se tiene la comparación entre los años 2019 y 2080 y en el Mapa B) se ilustra la comparación entre los años 2019 y 2099. Los datos de los abatimientos proyectados cercanos al contacto del aluvión con las rocas del Complejo de Nicoya tiene los valores mayores sin embargo se tiene afinar con un mayor detalle el espesor de los aluviones cerca del pie de monte en los bordes del modelo numérico y en el contacto geológico entre ambas formaciones.



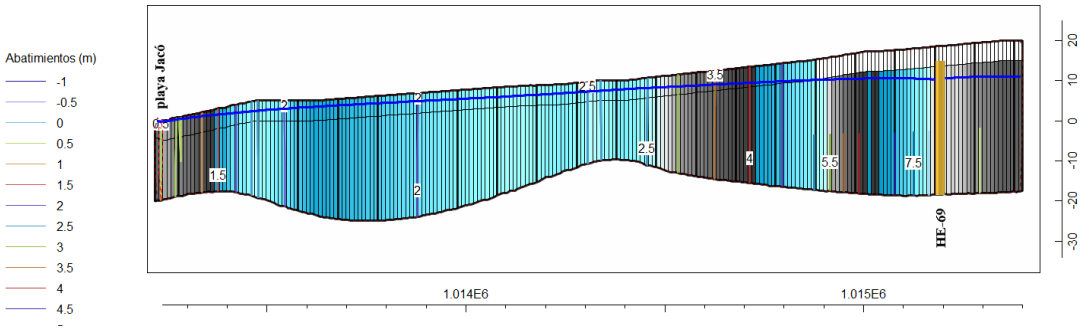
A) Años 2019-2080



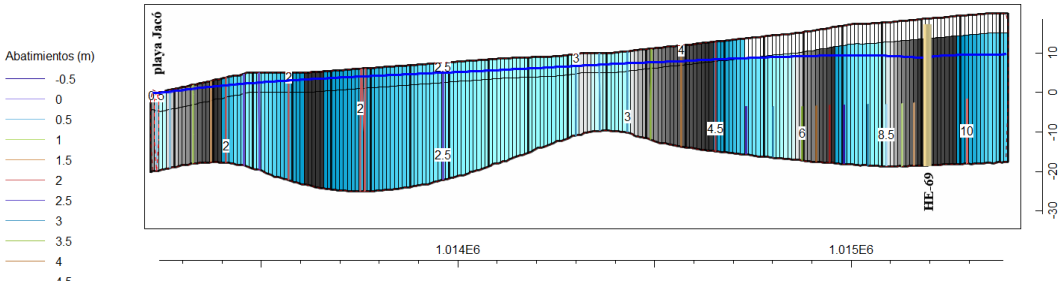
B) Años 2019-2099

Figura 94 Mapas de los abatimientos proyectados en el acuífero Jacó
Elaborado y dibujado por: Alonso Alfaro Martínez

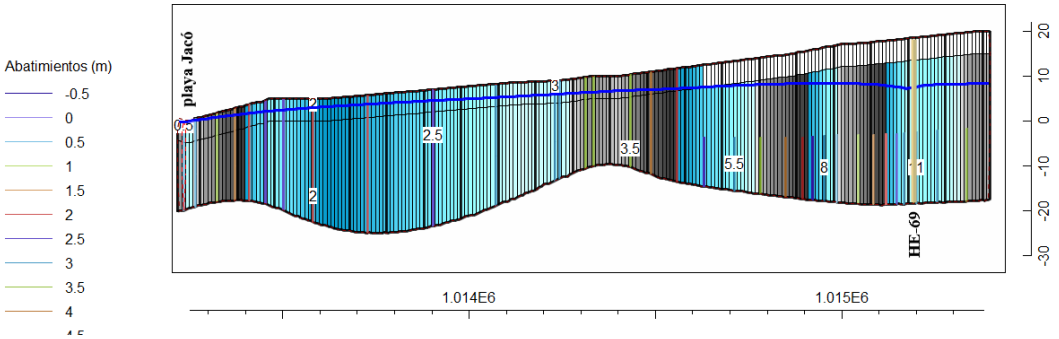
En los tres perfiles de la Figura 91 se muestran los valores de los abatimientos con tomando como base en el escenario de cambio climático para el año 2080, se ilustran como referencia se tiene el pozo HE-69 el cual es utilizado para abastecimiento por parte del AyA en la zona de Jacó (HE-25 y HE-45) en donde se observa el abatimiento proyectado de un metro y medio para el año 2080 y de tres metros y medio para el año 2099, ambos con respecto a la referencia del abatimiento para el año 2019 y bajo las condiciones de bombeo actuales, este perfil corresponde al Perfil 2 de la sección 8.2.5 (Figura 80).



a) Año 2019



b) Año 2080



c) Año 2099

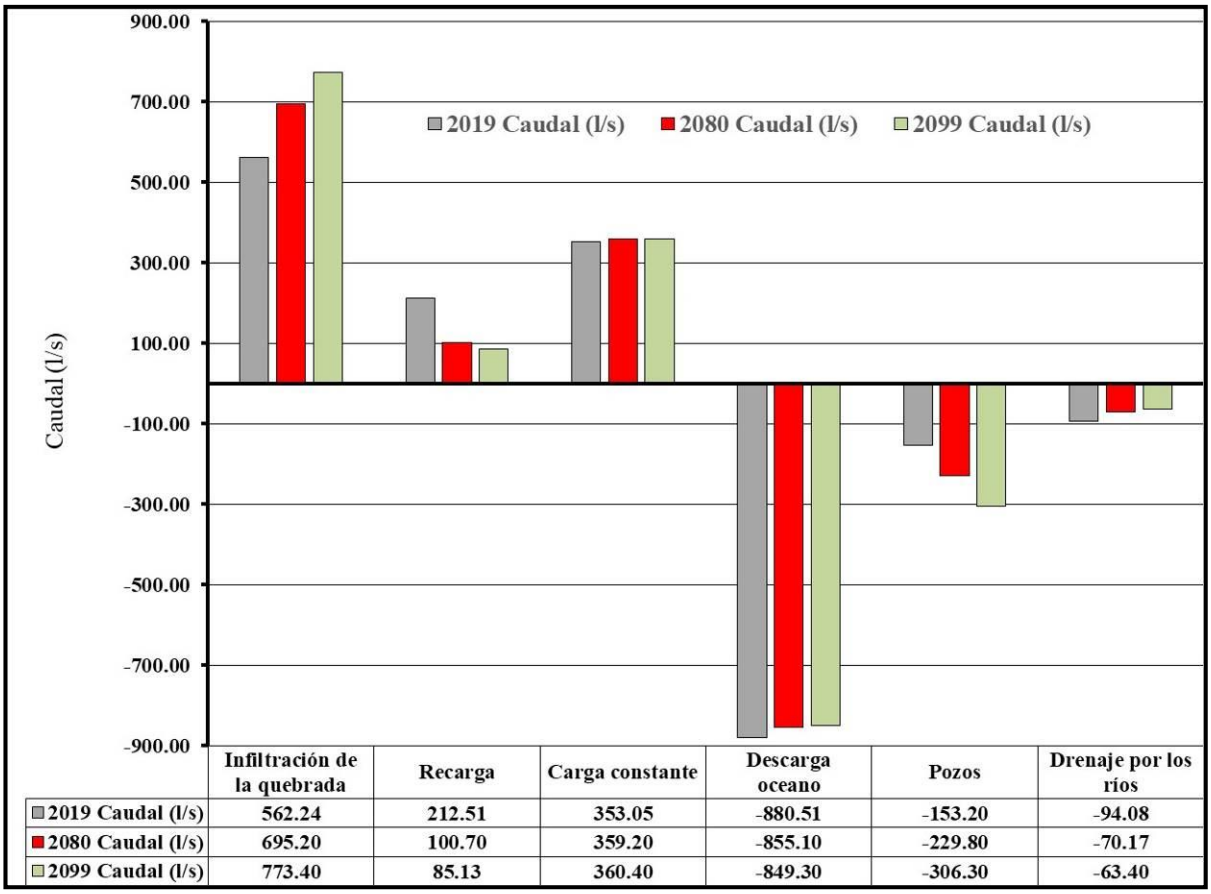
Figura 95 Perfiles transversales con los abatimientos en el acuífero Jacó para el año 2019 a), para el año 2080 b) y para el año 2099 c); (exageración vertical seis veces la horizontal)

Balance del agua subterránea en el acuífero Jacó para los años 2080 y 2099

En el gráfico de la Figura 92 se tiene el balance volumétrico total para el acuífero Jacó en las condiciones actuales al año 2019 y en los dos escenarios planteados en el año 2080 y el año 2099; se observa un aumento en el valor de la infiltración de los ríos y las quebradas, pasando de 562 l/s en el año 2019 a 773 l/s en el año 2099; sin embargo este dato tiene que manejarse con precaución ya que esto puede ser un resultado del modelo numérico del MODFLOW que trata de compensar la disminución tan drástica de la recarga que disminuye de 213 l/s en el año 2029 a 85 l/s en el año 2099 con el objetivo de mantener el equilibrio en las cargas hidráulicas; este mismo comportamiento se tiene para el año 2080 pero con un nivel intermedio.

El drenaje por los ríos y las quebradas en los sectores efluentes pasa de 94 l/s en el año 2019 a 63 l/s en el año 2099; esto provocaría un impacto negativo a los ecosistemas dependientes del agua subterránea en los humedales del sector costero de la playa Jacó; misma situación se tiene para el año 2080 pero en un impacto menor.

También el análisis arroja que la descarga en el océano en el sector de la playa de Jacó disminuye de 195 l/s en el año 2019 a 179 l/s en el año 2099, lo cual es algo que pude impactar de manera negativa a la sostenibilidad el acuífero y para la posibilidad de utilizar más agua subterránea por medio de la extracción de pozos o para el aumento de caudales de las concesiones otorgadas.



	Infiltración de la quebrada	Recarga	Carga constante	Descarga oceano	Pozos	Drenaje por los ríos
2019 Caudal (l/s)	562.24	212.51	353.05	-880.51	-153.20	-94.08
2080 Caudal (l/s)	695.20	100.70	359.20	-855.10	-229.80	-70.17
2099 Caudal (l/s)	773.40	85.13	360.40	-849.30	-306.30	-63.40

Figura 96 Gráfico del balance volumétrico de agua para los modelos numéricos del Acuífero Jacó (años 2019, 2080 y 2099)

10 CONCLUSIONES

Modelo Hidrogeológico Conceptual

Las rocas sedimentarias de la formación Punta Carballo se clasifican como de muy bajo potencial acuífero en donde se desarrollan acuíferos fracturados, que dependiendo del sector; se puede comportar como un acuífero libre cubierto o un acuífero confinado.

El Complejo de Nicoya se clasifica como rocas de bajo potencial acuífero en rocas volcánicas, conformando acuíferos fracturados libres y confinados, la profundidad del agua es muy variada dependiendo de la altura de la boca del pozo.

Las gravas y arenas de los depósitos cuaternarias aluviales que conforman el acuífero Herradura se clasifican como un acuífero poroso libre de un alto potencial con un espesor de 28 metros; está conformado en la parte superior en algunos sectores por unas capas de arcillas o sedimentos de textura fina con un espesor de 7 metros.

La zona saturada está conformada por intercalaciones de capas de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas de origen coluvio-aluvial con un espesor saturado de unos 17 a 19 metros, la profundidad del agua subterránea oscila entre los 5 y 12 metros con el máximo en octubre y el mínimo en el mes de abril.

El acuífero Herradura tiene una gran importancia en la economía local del sector de Herradura ya que parte de la extracción y distribución de agua para consumo humano en la zona de Herradura se hace por medio de pozos perforados de la ASADA Herradura y la ASADA Los Sueños.

El acuífero Jacó está conformado por capas de origen fluvial de gravas gruesas a finas y arenas gruesas a finas con intercalaciones de lentes de limos y arcillas de origen principalmente aluvial; en la parte superior se tiene unas arcillas, arenas finas y limos con un espesor promedio de 4 a 6 metros.

Tiene un espesor total que oscila entre los 23 a 25,25 metros y un espesor saturado con agua subterránea de unos 18 a 20 metros, la profundidad del agua subterránea oscila entre los 4 y los 5 metros con el máximo en el mes de abril y el mínimo en el mes de noviembre.

El acuífero Jacó tiene una gran importancia en la economía local del sector de Jacó ya que parte de la extracción y distribución de agua para consumo humano en la zona de Herradura se hace por medio de pozos perforados que administra el AyA.

Recarga potencial

Para toda la zona de estudio en promedio la recarga potencial es de 993,99mm/año por lo que para un área de 70,9 km^2 nos da una caudal de recarga de $70,47\times10^6$ m^3 al año o 2234,71 litros por segundo, esto corresponde a un 38,7 % de la precipitación promedio anual.

La recarga mayor de 1103 y 1097 mm anuales se presentan en la unidad de basaltos en la formación del Complejo de Nicoya, en un sector plano al NW en la zona plana que comunica Herradura y Jacó; con una percolación de un 42 % de la precipitación promedio anual.

Los acuíferos Herradura y Jacó tienen una capacidad de recarga potencial de 1031 mm/año y 1072 mm/año respectivamente, con un 39 y 40 % de la precipitación promedio anual respectivamente.

Las unidades de balance Basaltos y Areniscas, específicamente en los sectores con las mayores pendientes en las filas y cerros tienen los potenciales de recarga más bajos, con 805 mm anuales (31 %) y 855 mm anuales (32 %) respectivamente

Los cerros que bordean las divisorias de aguas y que están formados por las rocas del Complejo de Nicoya y la formación Punta Carballo tienen las recargas más bajas relativas en la zona de estudio, sin embargo tienen un área muy significativa de captación y la

recarga en estas rocas juega un papel muy importante en el flujo base en los ríos y las quebradas en la época seca, ya que en las zonas influentes recargan los depósitos aluviales en las zonas más bajas y de menor pendiente, tal es el caso de la quebrada Cañablancal y el río Copey.

Con la metodología de la fluctuación de niveles para el acuífero Herradura la recarga es unos 0,81 m por año y por lo tanto se tiene una recarga de 111l/s, con una diferencia de 220 mm anuales con respecto a la metodología del cálculo de la recarga potencial con 1032 mm anuales.

Modelos Numéricos y Escenarios de Cambio Climático para los Años 2080 y 2099

Acuífero Herradura

En la capa superior de Arenas finas las líneas isopotenciales muestran las zonas de influencia y efluencia de la quebrada Cañablancal así como también los sectores en donde las celdas que se secan en el sector norte y noreste de Herradura.

En la capa inferior de Aluvión todas las celdas están saturadas y las cargas hidráulicas del agua subterránea tiene un gradiente de promedio de 0,01 - 0,03 con dirección sur y suroeste para descargar en la zona de la playa.

El acuífero Herradura tiene una entrada total de agua de unos 515 litros por segundo anualmente; se concluye que la recarga del agua de lluvia ocurre en la capa de Arenas finas 84 l/s y en menor grado por la capa de Aluvión con 22 l/s, para un total de 106 l/s.

Existe un aporte muy significativo por la infiltración de agua por medio de las zonas influentes de la quebrada Cañablancal que le introduce al sistema unos 284 litros por segundo por la capa de Arenas finas, lo que revela que es muy importante el manejo del uso de suelo en dichos sectores así como la calidad del agua superficial que discurre por esta quebrada, la cual tiene una conexión hidráulica directa con el acuífero Herradura.

La principal salida del sistema es la descarga de agua hacia el mar en la capa de Aluvión con 192 l/s y en menor grado por la capa de Arenas finas que descargan 4 l/s para un total de unos 196 litros por segundo; sin embargo, se considera que esta salida de agua del acuífero es muy importante ya que se podría aprovechar por medio de pozos perforados desarrollando una gestión sostenible del recurso.

La salida de agua del sistema por medio de la quebrada Cañablancal en la capa de Arenas finas es de 124 litros por segundo hacia la playa Herradura, cumpliendo una función esencial en los humedales (ecosistemas) y el control de las mareas en la zona de confluencia e interacción de la quebrada y el mar.

La extracción de agua por medio de los pozos perforados es de 197 litros por segundo, sin embargo, hay que destacar que esta extracción se hizo de una manera teórica asumiendo que los pozos están bombeando los caudales reportados.

De acuerdo con los niveles observados en los pozos el modelo numérico del acuífero Herradura tiene una tendencia aceptable a que exista una igualdad entre los datos de las cargas hidráulicas observadas y las cargas hidráulicas simuladas.

Los resultados muestran que el ajuste es muy bueno de la predicción del modelo numérico con respecto a los valores de las cargas hidráulicas simuladas ya que hay una muy buena correlación en la regresión lineal obtenida entre los valores observados y los valores simulados.

Para los escenarios de cambio climático la dirección del flujo se mantiene prácticamente sin ninguna variación hacia el SW para los años 2080 y 2099, en la zona cercana a la playa de Herradura el gradiente del agua subterránea es muy bajo con valores entre 0,0003 a 0,0005 esto por ser la zona más plana cercana a la zona de descarga al océano y en el sector norte y noreste de Herradura el gradiente oscila entre 0,01 y 0,02.

El abatimiento proyectado es de aproximadamente un metro en el año 2080 con un aumento de un 50 % más de extracción en los pozos y de dos metros para el año 2099 para un aumento del 100 % más de la extracción en los pozos.

En los escenarios del año 2080 y del año 2099; se obtiene un aumento en el valor de la infiltración de la quebrada Cañablancal, sin embargo, este dato tiene que manejarse con precaución ya que esto puede ser un resultado del modelo numérico que trata de compensar la disminución tan drástica de la recarga potencial para mantener las cargas hidráulicas.

En los modelos para los escenarios climáticos de los años 2080 y 2099 se observa la disminución del drenaje por la quebrada Cañablancal en los sectores efluentes y la descarga en el océano, lo cual es algo que pude impactar de manera negativa lo posibilidad de utilizar más agua subterránea por medio de la extracción de pozos; así como también provocar un impacto negativo a los ecosistemas dependientes del agua subterránea en los humedales de la playa Herradura.

Acuífero Jacó

En la capa superior de Arenas finas las líneas isopotenciales reflejan las zonas de influencia-efluencia de los ríos y las quebradas, también se muestran sectores en el NE y el SE en donde el modelo numérico revela las celdas que estén secas, destacan los sectores de las desembocaduras de los ríos y quebradas en la playa Jacó en donde se tienen pequeños humedales y la interacción del sistema del agua superficial con las mareas.

En la capa inferior de Aluvión las celdas todas están saturadas las cargas hidráulicas del agua subterránea tienen un gradiente de muy bajo con un rango entre 0,004 - 0,008 con dirección suroeste para descargar el agua subterránea en la playa.

La profundidad del agua subterránea oscila entre los 0,00 y los 4,50 metros bajo el nivel del suelo en donde se comprueba el confinamiento de las gravas y arenas de los aluviones en la mayor parte del acuífero.

El acuífero Jacó cuenta con un balance de entradas y salidas de agua de 1128 l/s; la recarga del agua de lluvia ocurre en la capa de arcilla con 169 l/s y en menor grado por la capa de aluvión con 43 l/s debido al poco espesor de la capa de Arenas finas que favorece la infiltración.

Se origina un aporte muy significativo por la infiltración de agua por medio de las zonas influentes de los ríos y las quebradas que introduce al sistema unos 562 litros por segundo, por lo que es muy importante el manejo del uso de suelo en dichos sectores así como la calidad del agua superficial que discurre por estos cauces, especialmente en las zona influentes y en donde existe infraestructura que descargan aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento.

La principal salida del sistema se realiza por medio de la descarga de agua hacia el mar con un total de unos 880 litros por segundo la cual es muy importante ya que se podría aprovechar por medio de pozos perforados conforme se justifique su necesidad y desarrollando una gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo.

La extracción de agua por medio de los pozos perforados es de 153 litros por segundo en la capa de Aluvión, sin embargo, hay que destacar que esta extracción se hizo de una manera teórica asumiendo que los pozos están bombeando los caudales reportados y con base en la información de las bases de datos institucionales.

El drenaje hacia el mar en la playa de Jacó por medio de los ríos y las quebradas equivale a 94 litros por segundo por medio de la capa de Aluvión, y se considera que ese aporte de agua subterránea es muy importante ya que forma parte de la dinámica de los ecosistemas que se forman en las desembocaduras de los ríos y quebradas, principalmente la quebrada Doña María, el río Copey y la quebrada Seca.

El modelo numérico del acuífero Jacó tiene una tendencia baja a que exista una igualdad entre los datos de las cargas hidráulicas observadas y las cargas hidráulicas simuladas, sin embargo al ser pocos datos de niveles de pozos los resultados está muy sesgado por el valor del pozo HE-134 ya que el valor residual es de 5,80 m.

El ajuste del modelo numérico en Jacó es bueno con respecto a la predicción del modelo numérico y los valores de las cargas hidráulicas simuladas, sin embargo, se concluye que no hay una buena correlación en la regresión lineal obtenida entre los valores observados y los valores esto por el sesgo del valor residual del pozo HE-134.

Para los escenarios de Cambio Climático en los años 2080 y 2099 la dirección del flujo del agua subterránea se mantiene prácticamente sin ninguna variación para los años 2080 y 2099 ya que se conserva el gradiente muy bajo y la dirección hacia el sur y el suroeste.

Con un aumento de un 50% más de extracción en los pozos en el año 2080 y un aumento del 100 % para el año 2099 los abatimientos proyectados para los escenarios de cambio climático son de aproximadamente 1,50 m y 3,50 m respectivamente,

En el balance volumétrico para el año 2080 y el año 2099 se observa un aumento en el valor de la infiltración de los ríos y las quebradas, sin embargo, al igual que en el acuífero Herradura este dato tiene que manejarse con precaución ya que esto puede ser un resultado del modelo numérico que trata de compensar la disminución tan drástica de la recarga para mantener el equilibrio en las cargas hidráulicas.

La descarga da agua al mar y el drenaje por los ríos y las quebradas en los sectores también disminuye significativamente para los años 2080 y 2099; esto provocaría un impacto negativo a los ecosistemas dependientes del agua subterránea en los humedales del sector costero lo cual es algo que pude impactar de manera negativa a la sostenibilidad el acuífero; también limitaría la posibilidad de utilizar más agua subterránea por medio de la extracción de nuevos pozos o aumentos de caudales de las concesiones.

Acerca de los Modelos Numéricos de los acuíferos Herradura y Jacó

Los modelos numéricos que se proponen en esta investigación son sujetos a una constante calibración conforme se genere más información en el campo como son los niveles de agua subterránea, pruebas de bombeo en pozos perforados o excavados, para afinar las características hidráulicas de los acuíferos como la conductividad hidráulica y la transmisividad.

Los modelos numéricos que se generaron en esta investigación deben ser validados por las instituciones competentes para desarrollar un modelo de extracción sostenible del recurso hídrico subterráneo.

Los modelos numéricos y los escenarios a futuro pueden ser utilizados como base para continuar modelando y validando el comportamiento hidráulico conforme se generen nuevos datos de escenarios con respecto al cambio climático en el sector del Pacífico de Costa Rica, se puede realizar corridas cada cinco años conforme se genere más información hidroclimática.

11 RECOMENDACIONES

A los entes operadores de acueductos del sector de Herradura y Jacó se les recomienda establecer y/o mantener un programa de muestreo para dar un seguimiento a la calidad del agua subterránea utilizada para el abastecimiento público.

Dada la importancia de las zonas influentes de los ríos y las quebradas se le recomienda a la la DIGH del Senara establecer un programa de aforos y muestreo hidrogeoquímico en los sectores influentes de los ríos y quebradas como un plan de vigilancia de la calidad del agua superficial y subterránea.

A la DIGH del Senara se le recomienda generar investigaciones hidrogeoquímicas del agua subterránea; especialmente en los sectores cercanos a la línea de costa en la playa Herradura y Jacó como insumos para estudios de calidad de agua, intrusión salina y regulación de la perforación.

A la DIGH del Senara, en colaboración con la Dirección de Agua del Minae y los entes operadores de acueductos continuar el monitoreo de los niveles de agua subterránea con el objetivo de seguir generando información para calibrar y validar los modelos numéricos de los acuíferos Herradura y Jacó, para mejorar la calidad de la información se pueden utilizar los sensores de presión que se colocan en los pozos y así generar información con mayor frecuencia.

En el sector de Jacó se deben de realizar al menos seis piezómetros de observación para continuar con la calibración y validación del modelo numérico

En el sector de Herradura se deben perforar unos cuatro piezómetros persiguiendo el mismo objetivo que el acuífero Jacó.

Se debe de investigar el flujo en la zona no saturada para investigar el mecanismo de recarga hacia el acuífero y contar con insumos para modelar el transporte de contaminantes con escenarios de crecimiento poblacional, tanto por el desarrollo urbanístico y el comercial.

A la Municipalidad de Garabito se le recomienda desarrollar el Plan Regulador del Uso de Suelo incorporando la variable hidrogeológica para zonificar el uso del suelo y lograr una efectiva protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

12 REFERENCIAS

Almazroui, M., Islam, M.N., Saeed, F. et al. (2021). Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems Environment.* https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5.

Alpízar, R. (2014). *Modelo conceptual y aplicación de modelo numérico usando Visual Modflow del acuífero aluvial del río Tempisque en el sector de Trancas, provincia de Guanacaste, Costa Rica*. (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Alvarado, F., Contreras, W., Alfaro, M y Jiménez, E. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional. San José. Costa Rica.

Amanambu, A., Obarein, O., Mossa, J. et al. (2020). Groundwater System and Climate Change: Present Status and Future Considerations. *Journal of Hydrology*. 589. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163.

Andensor, M., Woessner, W. y Hunt, R. (2015). *Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport.* Academic Press.

Arias, M. y Morera, S. (2000). Evaluación del acuífero Jacó, cantón de Garabito, provincia de Puntarenas. San José. Informe Interno SENARA.

Arias, O. (2003). Redefinición de la formación Tulín (maastrichtiano-eoceno inferior) del Pacífico Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 28, 47-68.

Aslam, R.A., Shrestha, S. y Pandey, VP. (2018). Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology. *Science of The Total Environment*. 612. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.237.

Bear, J. y Cheng, A. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. EUA: Springer.

Chang, M. (2013). *Forest Hydrology. An introduction to water and forests* (3). Boca Ratón, Florida: Taylor & Francis Group.

Chaves, M. (2016). *Estimación de los efectos en el caudal y el nivel del agua subterránea por la excavación de los túneles de desvío proyecto hidroeléctrico Reventazón, Siquirres, Limón, Costa Rica*. (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Chereque, W. (s.f). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima, Perú.

Collins, J. (1999). *A Groundwater Resource Evaluation of a Volcanic Aquifer System near the city of Liberia, Costa Rica* (Tesis de Maestría). University of Waterloo, Ontario, Canadá.

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* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Custodio, E., y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. (2). Barcelona, España: Ediciones Omega.

Custodio, E. (1998). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero*, 109 (4), 329-346.

Denyer, P., Aguilar, T., y Alvarado, G.E. (2003). Geología y estratigrafía de la hoja Barranca. *Revista Geológica de América Central*, 29, 105-125.

Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G.E. (2003): *Atlas tectónico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Denyer, P. y Alvarado, G.E. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica*. Escala 1:400.000. San José, Costa Rica: Librería Francesa.

Enemark, T., Peeters, L. J. M., Mallants, D., y Batelaan, O. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569, 310-329. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.007.

Fetter, W. (2000). *Applied hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall.

Freeze, R.A., y Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice Hall.

García, A. (2013). *Modelación hidrogeológica del acuífero Nimboyores, Guanacaste Costa Rica utilizando Modflow Premium 2010* (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

García, P. (2015). *Determinación de la disponibilidad del agua subterránea en el sistema acuífero Potrero y Caimital, Nicoya, Guanacaste*. (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Gutiérrez, F., y Gutiérrez, M. (2016). *Landforms of the Earth*. Switzerland: Springer.

Harbaugh, A.W. (1990). A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392.

Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., y Konikow, L. F. (2017). MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017, http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G.

Healy, R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. New York, EUA. Cambridge University Press.

Instituto Meteorológico Nacional. (2000). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Cambio Climático*. MINAE. San José.

Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2014). *Atlas cantonal digital*. ITEC. Cartago, Costa Rica.

Johnson, A. I. (1967). Specific yield – Compilation of Specific Yields for Various Materials. G*eological Survey Water-Supply*, 1662-D.

Kuijpers, E. (1979). Análisis sedimentológico de la Formación Punta Carballo (Mioceno), Costa Rica. *Informe Semestral IGN*, 2. 77-94.

Kussmaul, S. (2000). Estratigrafía de las rocas ígneas. En Denyer, P y Kussmaul, S (comp): *Geología de Costa Rica*. (1). Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica.

Madrigal, R. (1970). Geología del mapa básico “Barranca”, Costa Rica. *Informe Técnico y Notas Geológicas*, Dirección de Geología, Minas y Petróleo, 9 (37).1-59.

Montero, W. (1999). El terremoto del 4 de marzo de 1924 (Ms 7,0): ¿Un gran temblor interplaca relacionado al límite incipiente entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá? *Revista Geológica de América Central*, 22. 25-62.

Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la Microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24. 29-56

Murillo, J. (2017). *Modelación numérica del acuífero costero Palmar-Cortés, bajo diferentes escenarios hidrológicos* (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Organización de las Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago, Chile.

Orozco, E. (2014). *Modelo numérico del acuífero de la margen derecha del río Tempisque, desde Monte Galán hasta Filadelfia, Guanacaste, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Salazar, L. G. (2000). Geomorfología. En Denyer, P y Kussmaul, S (comp): *Geología de Costa Rica*. (1). Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica.

SENARA. (2005). Diagnóstico de las aguas subterráneas en las hojas Tárcoles, Herradura y Candelaria. San José, Costa Rica. Informe Interno.

SENARA. (2015). Pruebas de infiltración, tipos de suelos e investigación geofísica en: Parte media de la cuebnca del río Tempisque, , cuenca del río Arío y zonas costeras del Pacífico Central. San José. Informe Interno.

SENARA. (2016). Evaluación y propuesta dela explotación de las aguas utilizando modelación hidrogeológica y numérica del Valle Central de Costa Rica, América Central. San José, Costa Rica. Informe Interno.

SENARA. (2020). Base de datos de manantiales y pozos perforados.

Schosinsky N. G., y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55.

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

Tournon, J., y Alvarado, G.E. (1997). *Mapa Geológico de Costa Rica*. Escala 1:500.000. Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Vallero, D. (2018). *Environmental Models. Translating Diverse Environmental Data into Reliable Information.* Recuperado de https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812446-8.00008-6.

Vásquez, M. (2005). *Evaluación del potencial hidrogeológico del acuífero La Bomba, cuenca del río Banano, Limón, Costa Rica*. (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Villón, M. (2002). *Hidrología*. Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Winston, Richard B. (2009). ModelMuse: a graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. Reston, Va.:U.S. Geological Survey.

Zúñiga, H. (2006). *Caracterización hidrogeológica del acuífero Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

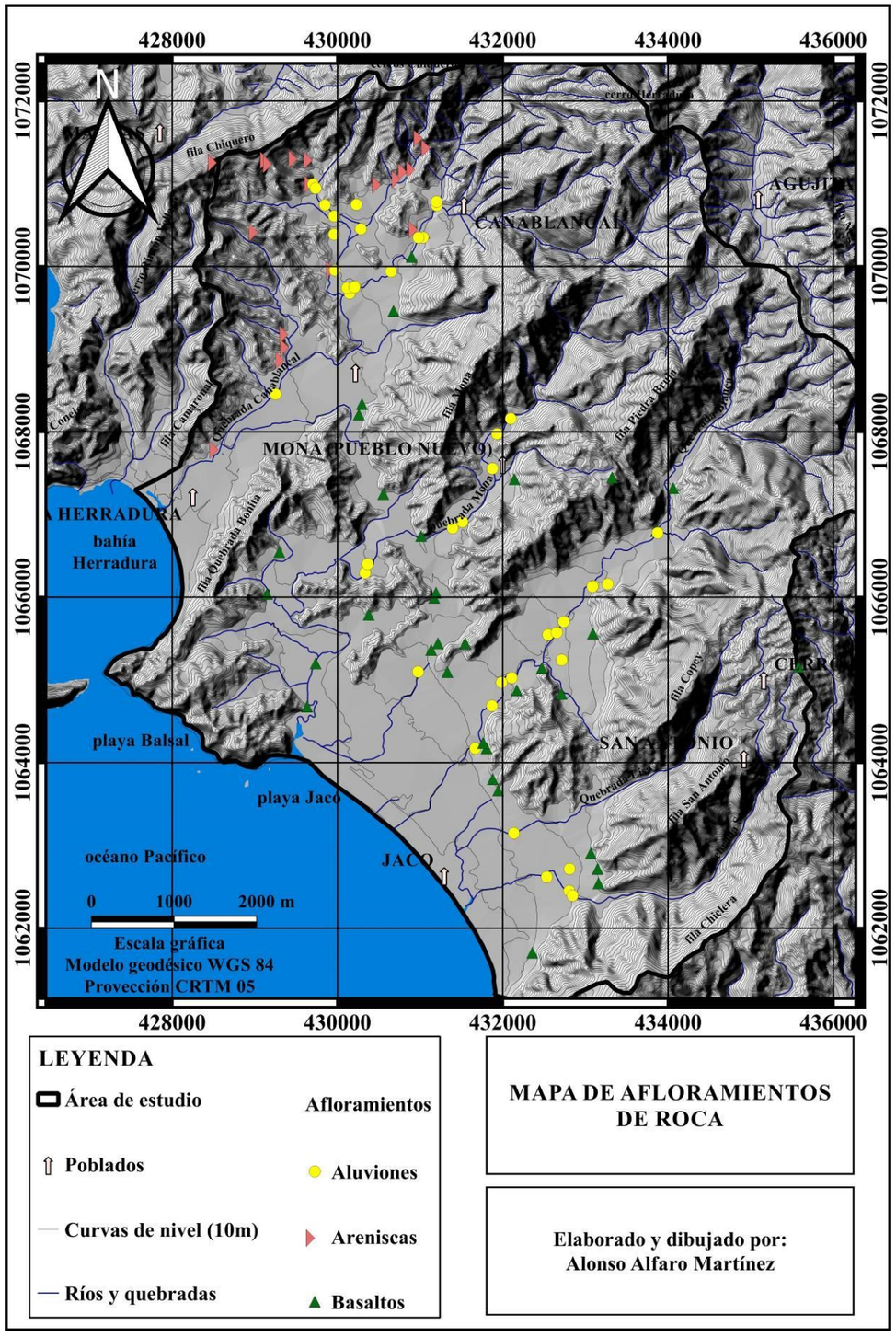
13 ANEXOS

ANEXO 1 AFLORAMIENTOS DE ROCA

Afloramiento	X	Y	Formación	Descripción	Observaciones
HJ-01	429171	1071281	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-02	429206	1071234	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-03	429515	1071296	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-04	429698	1071282	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-05	429707	1070995	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-06	431027	1071549	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-07	431122	1071429	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-08	430939	1071168	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-09	430839	1071142	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-10	430526	1070986	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-11	430229	1070748	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-12	430283	1070453	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-13	430898	1070115	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-14	431035	1070349	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-15	430678	1069461	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-16	430148	1069675	Aluviones	Arenas y gravas	quebrada Cañablancal seca
HJ-17	430296	1068335	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-18	429249	1068456	Aluviones	Arenas y gravas	quebrada Cañablancal seca
HJ-19	429358	1068864	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-20	429412	1069018	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-21	429404	1069174	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-22	430259	1068209	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-23	430555	1067248	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-24	429148	1066040	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-25	429632	1064678	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-26	429736	1065201	Complejo de Nicoya	Basaltos	Cruce camino quebrada Bonita
HJ-27	431170	1065994	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-28	431012	1066741	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-29	431876	1067556	Aluviones	Arenas y gravas	quebrada La Mona
HJ-30	432097	1068160	Aluviones	Arenas y gravas	quebrada La Mona, con agua
HJ-31	431931	1067975	Aluviones	Arenas y gravas	se infiltra el agua en la quebrada La Mona
HJ-32	432141	1067428	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-33	431216	1065444	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-34	433855	1066803	Complejo de Nicoya	Basaltos	quebrada Copey
HJ-35	432358	1061702	Complejo de Nicoya	Basaltos	sector de la carretera
HJ-36	432533	1062618	Aluviones	Arenas y gravas	tramo sin agua del río
HJ-37	432804	1062449	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-38	432844	1062393	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-39	433159	1062542	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-40	433148	1062716	Complejo de Nicoya	Basaltos	pie de monte
HJ-41	432809	1062716	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-42	433066	1062905	Complejo de Nicoya	Basaltos	pie de monte
HJ-43	432134	1063148	Aluviones	Arenas y gravas	quebrada seca sobre la costanera
HJ-44	431945	1063665	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-45	431879	1063801	Complejo de Nicoya	Basaltos	

HJ-46	431804	1064174	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-47	431667	1064173	Aluviones	Arenas y gravas	rio Copey con agua sobre la costanera
HJ-48	431763	1064238	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-49	432170	1064875	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-50	432711	1064832	Complejo de Nicoya	Basaltos	fin de planicie aluvial SE cuenca Copey
HJ-51	432473	1065144	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-52	432714	1065241	Aluviones	Arenas y gravas	parte plana del río Copey
HJ-53	433092	1065562	Complejo de Nicoya	Basaltos	pie de monte
HJ-54	433096	1066135	Aluviones	Arenas y gravas	rio Copey con agua
HJ-55	433874	1066777	Aluviones	Arenas y gravas	río Copey con agua cerca del puente
HJ-56	432549	1065547	Aluviones	Arenas y gravas	cauce del rio Copey
HJ-57	432739	1065704	Aluviones	Arenas y gravas	tramo sin agua del río Copey
HJ-58	432109	1065026	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-59	431870	1064687	Aluviones	Arenas y gravas	rio Copey con agua
HJ-60	435580	1065158	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-61	437044	1067276	Complejo de Nicoya	Basaltos	meteorizados
HJ-62	436438	1067174	Golfito	Calizas pelagicas	
HJ-63	430975	1065099	Aluviones	Arenas y gravas	quebrada con agua, cerca pozo AyA
HJ-64	431875	1061034	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-65	431545	1065444	Complejo de Nicoya	Basaltos	roca sana
HJ-66	433323	1067447	Complejo de Nicoya	Basaltos	altamente meteorizado
HJ-67	430378	1065789	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-68	429296	1066547	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-69	429036	1070409	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-70	428539	1071252	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-71	429704	1070994	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-72	429735	1070945	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-73	429849	1070742	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-74	429958	1070387	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-75	431028	1071546	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-76	430764	1071050	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-77	429958	1070607	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-78	429969	1069959	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-79	429968	1069953	Aluviones	Arenas y gravas	Contacto entre las formaciones
HJ-80	430116	1069738	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-81	430116	1069738	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-82	431330	1065096	Complejo de Nicoya	Basaltos	Cerritos de baja pendiente
HJ-83	430649	1069938	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-84	430981	1070348	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-85	430970	1070444	Roca Carballo	Areniscas	Margen derecha de la quebrada Cañablancal
HJ-86	431202	1070736	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-87	431200	1070782	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-88	430210	1069757	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-89	430205	1069747	Aluviones	Arenas y gravas	Se resume la quebrada Cañablancal
HJ-90	428560	1067783	Roca Carballo	Areniscas	
HJ-91	431193	1066055	Complejo de Nicoya	Basaltos	
HJ-92	433270	1066159	Aluviones	Arenas y gravas	Contacto entre los coluvios y aluviones
HJ-93	433085	1066128	Aluviones	Arenas y gravas	

HJ-94	432654	1065573	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-95	431987	1064970	Aluviones	Arenas y gravas	
HJ-96	434063	1067320	Complejo de Nicoya	Basaltos	Rocas meteorizadas
HJ-97	431134	1065363	Complejo de Nicoya	Basaltos	Rocas meteorizadas, dragado de la quebrada Doña María
HJ-98	431512	1066911	Aluviones	Arenas y gravas	rio la Mona
HJ-99	431394	1066837	Aluviones	Arenas y gravas	rio la Mona
HJ-100	430334	1066295	Aluviones	Arenas y gravas	rio la Mona
HJ-101	430365	1066401	Aluviones	Arenas y gravas	rio la Mona


428000
430000
432000
434000
436000
1072000
1070000
1068000
1066000
1064000
1062000
N
fila Chiquero
CANABLANCAL
AGUJITA
MONA (PUEBLO NUEVO)
HERRADURA
bahía
Herradura
playa Balsal
playa Jacó
océano Pacífico
JACO
SAN ANTONIO
CERRO
0
1000
2000 m
Escala gráfica
Modelo geodésico WGS 84
Provección CRTM 05
LEYENDA
Área de estudio
Poblados
Curvas de nivel (10m)
Ríos y quebradas
Afloramientos
Aluviones
Areniscas
Basaltos
MAPA DE AFLORAMIENTOS
DE ROCA
Elaborado y dibujado por:
Alonso Alfaro Martínez

ANEXO 2 INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

ESTACIÓN PUNTA LEONA (86007) – DATOS DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL (mm)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1990	104.3	1.7	2.0	84.8	480.2	-	541.6	234.2	315.0	384.3	352.1	88.8
1991	116.4	24.0	31.6	233.4	353.3	263.0	242.6	330.2	200.9	262.3	164.7	46.1
1992	0.0	11.0	0.4	52.1	126.3	223.9	331.8	162.2	386.1	245.4	171.6	12.3
1993	126.0	0.0	31.1	10.2	267.6	317.1	321.5	750.4	379.9	238.5	180.5	90.6
1994	5.0	7.0	0.0	81.2	180.6	97.0	318.4	539.1	276.3	566.2	395.2	57.0
1995	11.5	0.0	25.0	322.5	83.8	334.1	472.5	536.7	481.8	420.8	43.1	155.4
1996	10.5	13.1	27.6	75.6	387.8	722.7	383.8	430.8	182.5	890.9	489.6	60.0
1997	21.4	148.5	45.4	113.7	217.4	239.4	128.7	127.5	331.3	252.1	319.7	0.0
1998	0.0	0.0	25.1	36.2	131.8	114.7	-	168.9	349.6	964.3	227.6	124.7
1999	66.7	53.9	11.8	161.6	-	-	170.2	-	-	152.9	140.7	77.1
2000	34.3	22.0	-	25.1	108.6	162.3	124.3	290.1	505.0	183.8	268.2	41.8
2001	41.9	-	0.4	102.1	418.2	366.8	255.7	101.0	272.2	487.8	313.1	100.9
2002	13.8	4.4	0.0	95.9	375.7	220.3	232.0	-	248.2	218.6	44.3	5.0
2003	0.0	0.0	-	-	-	-	573.6	-	121.6	523.3	135.8	6.5
2004	0.0	60.5	0.0	0.0	-	-	-	-	-	368.8	180.7	34.7
2005	11.3	16.0	-	-	231.3	310.5	384.1	261.0	601.0	646.3	-	-
2006	35.5	143.7	20.7	85.3	64.1	307.9	345.4	228.7	357.5	480.3	319.5	125.6
2007	40.1	0.0	0.0	259.4	527.6	-	299.2	511.4	478.8	617.8	117.3	41.6
2008	23.9	-	-	-	-	28.5	98.8	304.2	200.8	1121.8	191.5	52.4
2009	103.9	13.6	13.7	33.0	226.0	354.6	212.4	406.9	250.3	243.1	-	-
2010	0.0	-	-	-	609.1	292.4	427.4	555.7	734.3	263.8	474.6	5.9
2011	181.3	94.3	15.3	64.2	336.9	539.3	351.7	208.9	377.1	764.5	234.5	46.0
2012	6.0	0.0	23.8	16.6	182.1	175.7	281.2	246.2	133.4	474.0	37.5	193.9
2013	0.0	0.0	1.5	12.0	328.8	347.5	270.4	256.1	344.5	296.1	122.1	21.1
2014	43.7	47.7	0.0	58.0	198.8	198.0	145.2	323.0	198.4	498.2	155.7	66.6
2015	39.5	14.7	6.0	55.6	128.0	257.1	211.4	146.6	261.6	465.7	279.3	50.2
2016	0.0	0.0	0.0	37.0	188.9	282.7	187.1	202.6	326.5	28.3	281.0	262.3
2017	0.0	0.0	12.9	72.2	298.2	248.9	222.2	240.5	279.1	754.7	186.1	5.8
2018	31.5	5.7	9.0	0.0	138.5	326.4	168.2	205.8	235.2	260.1	117.6	13.3
2019	0.0	0.0	0.0	13.7	188.6	95.1	93.4	91.1	316.2	266.5	61.6	41.3
Promedio	**35.6**	**25.3**	**12.1**	**80.8**	**260.7**	**273.0**	**278.4**	**302.3**	**326.6**	**444.7**	**214.5**	**65.2**

Fuente: IMN (2020)

ESTACIÓN JACÓ (86009) - DATOS DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL (mm)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1997	20.3	87.5	28.0	49.9	195.8	417.2	263.6	151.5	515.0	260.1	452.0	18.3
1998	0.0	8.4	0.0	13.5	151.1	481.6	392.5	328.7	408.9	1182.2	279.8	198.5
1999	15.1	36.5	2.3	91.1	273.1	445.2	387.2	298.2	817.4	237.7	155.0	169.9
2000	14.8	24.3	0.0	88.7	407.2	365.9	306.9	298.6	793.0	516.8	388.1	20.4
2001	-	-	-	75.3	165.2	295.4	349.0	302.8	429.3	762.4	-	-
2002	-	-	-	-	437.3	343.1	-	617.5	-	580.7	-	-
2003	0.0	5.0	57.3	137.4	373.8	740.7	623.6	400.8	315.0	510.3	196.3	-
2004	0.0	0.0	0.0	78.0	625.5	521.4	246.4	505.3	417.0	773.1	211.8	19.0
2005	8.9	0.0	214.3	63.2	558.1	425.8	358.5	196.0	811.6	626.8	132.7	141.2
2006	19.8	4.8	26.7	93.0	264.0	253.3	166.5	243.6	448.7	540.2	395.4	245.5
2007	3.5	34.7	14.4	83.2	665.1	88.4	491.8	676.9	443.8	1088.8	150.4	213.9
2008	74.3	104.6	5.6	17.3	619.1	245.8	316.8	618.5	573.4	924.1	132.5	89.2
2009	44.6	0.0	4.5	57.6	232.0	482.1	246.6	395.2	395.7	664.3	329.7	26.0
2010	0.0	153.5	14.3	393.5	639.4	481.0	510.0	447.6	925.3	368.6	745.7	88.0
2011	144.3	46.2	77.0	170.4	390.1	534.5	436.7	353.2	317.1	833.2	-	-
2012	0.0	0.0	8.3	57.4	368.2	124.8	239.8	343.1	259.0	447.7	143.5	123.8
2013	29.3	0.0	31.2	67.3	402.1	513.3	493.8	336.5	403.6	164.4	349.0	24.0
2014	3.6	0.0	38.9	123.1	205.3	294.9	59.7	426.2	367.2	575.8	225.0	43.1
2015	145.2	83.5	0.0	12.0	91.9	234.4	195.1	294.2	208.5	529.0	197.3	9.3
2016	52.0	0.0	0.0	23.1	97.0	183.2	300.3	186.2	154.8	400.2	248.7	177.2
2017	0.0	0.0	36.6	55.8	342.7	385.8	400.1	626.0	364.5	772.8	38.0	46.0
2018	15.7	0.0	0.0	108.4	240.3	-	363.5	194.5	292.6	863.3	80.1	32.3
2019	0.0	0.0	33.3	34.8	315.3	291.4	372.7	344.9	390.4	392.7	86.1	0.0
Promedio	**28.2**	**28.0**	**28.2**	**86.1**	**350.4**	**370.4**	**341.9**	**373.3**	**456.9**	**609.4**	**246.9**	**88.7**

Fuente: IMN (2020)

ESTACIÓN MUELLE HERRADURA (86013) - DATOS DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL (mm)

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2015	-	-	-	-	-	235.8	270.0	-	-	-	283.0	38.6
2016	1.8	0.0	1.8	93.6	114.8	272.6	231.6	463.4	426.4	488.2	442.0	260.6
2017	3.0	0.2	4.2	97.2	304.2	336.4	393.4	541.8	629.6	637.0	167.2	14.4
2018	156.6	0.0	15.4	68.4	232.0	246.2	255.0	265.0	280.2	915.8	154.0	20.8
2019	0.2	0.0	0.0	24.2	278.8	150.0	356.4	331.8	428.0	482.4	73.8	26.0
Promedio	**40.40**	**0.05**	**5.35**	**70.85**	**232.45**	**248.20**	**301.28**	**400.50**	**441.05**	**630.85**	**224.00**	**72.08**

Fuente: IMN (2020)

ESTACIÓN PIEDRA BRUJA

Mes	Precipitación Acumulada mensual (mm)	Humedad relativa mínima mensual (%)	Humedad relativa media mensual (%)	Humedad relativa máxima mensual (%)	Temperatura mínima mensual (°C)	Temperatura media mensual (°C)	Temperatura máxima mensual (°C)
jun-15	227.00	60.58	94.83	100.00	21.07	26.16	32.80
jul-15	289.20	67.28	95.23	100.00	21.12	25.60	32.64
ago-15	226.90	71.95	96.28	100.00	22.39	25.67	32.16
sep-15	230.40	68.27	96.01	100.00	22.05	25.63	32.90
oct-15	492.60	73.52	97.24	100.00	22.01	25.15	32.21
nov-15	455.90	78.44	98.25	100.00	21.06	24.81	30.02
dic-15	58.60	69.95	97.05	100.00	21.98	25.65	31.24
ene-16	47.90	49.46	93.00	100.00	21.03	25.29	32.21
feb-16	0.30	41.67	82.19	99.90	21.56	26.29	34.24
mar-16	11.40	39.55	86.16	100.00	22.07	27.31	35.16
abr-16	112.10	37.66	83.68	100.00	23.08	27.43	35.72
may-16	265.40	67.05	95.42	100.00	20.60	26.13	32.71
jun-16	230.10	71.18	97.42	100.00	21.63	25.14	31.14
jul-16	240.10	75.96	98.26	100.00	21.30	24.86	30.80
ago-16	498.80	75.20	98.05	100.00	21.69	25.25	30.93
sep-16	289.70	67.00	97.64	100.00	20.94	24.99	31.93
oct-16	518.30	72.66	98.65	100.00	21.32	24.54	30.27
nov-16	393.60	81.40	99.38	100.00	20.22	24.11	29.04
dic-16	329.30	81.20	99.07	100.00	20.99	24.10	29.07
ene-17	1.90	58.86	95.38	100.00	20.33	24.46	30.57
feb-17	0.20	52.71	89.47	100.00	20.63	25.37	31.80
mar-17	26.30	55.11	86.03	100.00	21.64	26.28	34.67
abr-17	170.90	51.22	91.56	100.00	21.97	26.62	34.20
may-17	368.90	66.13	97.45	100.00	22.02	25.53	31.30
jun-17	517.50	74.84	98.56	100.00	21.90	25.10	31.08
jul-17	378.70	73.38	98.46	100.00	21.50	24.92	31.30
ago-17	ND	77.35	98.11	100.00	21.58	25.04	31.55
sep-17	461.30	75.34	98.32	100.00	21.95	24.91	30.61
oct-17	718.70	79.35	98.50	100.00	21.44	24.67	29.83
nov-17	241.30	ND	ND	ND	21.13	24.42	29.08
dic-17	33.20	ND	ND	ND	20.03	24.09	29.95
ene-18	62.40	63.88	93.99	100.00	20.18	24.15	29.70
feb-18	4.90	53.42	87.32	100.00	20.31	25.02	32.02
mar-18	1.70	43.35	80.73	98.90	20.57	26.26	33.66
abr-18	111.60	40.92	89.38	100.00	21.71	25.71	33.18
may-18	247.30	65.38	94.62	100.00	21.57	25.21	31.47
jun-18	251.20	73.48	96.64	100.00	21.50	24.94	30.78
jul-18	317.30	67.59	96.93	100.00	21.21	24.84	30.78
ago-18	170.00	68.43	96.58	100.00	20.96	24.96	31.27
sep-18	323.20	72.75	97.27	100.00	21.48	24.74	30.04
oct-18	765.10	79.29	98.27	100.00	21.49	24.11	29.27
nov-18	164.10	75.22	98.14	100.00	21.42	24.63	29.74
dic-18	19.80	69.88	95.83	100.00	19.97	24.35	30.01

ene-19	5.30	51.12	92.21	100.00	19.81	24.52	31.66
feb-19	2.60	36.72	85.92	100.00	20.52	25.47	32.90
mar-19	20.40	49.12	81.26	100.00	21.56	26.58	33.21
abr-19	86.30	43.69	86.46	100.00	20.81	26.75	33.45
may-19	408.80	59.44	96.05	100.00	22.09	25.40	33.50
jun-19	200.20	63.54	96.88	100.00	22.00	25.59	31.40
jul-19	181.50	73.75	96.99	100.00	20.81	25.23	31.20
ago-19	377.30	69.02	97.64	100.00	21.82	25.10	31.41
sep-19	438.50	74.66	97.68	100.00	21.49	24.90	30.29
oct-19	419.30	79.23	98.50	100.00	21.71	24.29	29.38
nov-19	111.40	78.86	98.14	100.00	21.08	24.62	29.51
dic-19	38.40	76.80	97.82	100.00	21.46	24.72	30.19

Notas: ND = registro no disponible
Fuente: UEN Gestión Ambiental AyA (2020)

ESTACIÓN DAMAS, QUEPOS (90009)

Elementos	Períodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
LLUVIA	1984	2018	60.0	28.2	40.3	160.4	423.5	414.6	440.5	491.0	521.6	619.3	392.7	158.4	3750.5
TEM.MAX.	1984	2017	31.3	32.0	32.5	32.3	31.3	30.9	30.7	30.6	30.4	30.1	29.9	30.6	
TEM.MIN.	1984	2017	21.8	22.0	22.7	23.4	23.4	23.2	22.9	22.8	22.7	22.8	22.8	22.5	
TEM.MED.	1984	2017	26.6	27.0	27.6	27.9	27.3	27.0	26.8	26.7	26.6	26.4	26.4	26.5	
HUMEDAD	1984	2018	82.3	79.3	78.9	82.4	86.6	87.4	87.8	88.4	88.4	89.1	88.9	85.6	
VIENTO VEL.	1984	2004	4.2	4.5	4.8	4.9	4.6	4.4	4.3	4.3	4.5	4.4	4.3	4.0	
BRILLO SOLAR	1984	2018	7.2	8.1	8.0	6.6	5.0	4.4	4.1	4.5	4.5	4.3	4.3	5.7	
RADIACION	1984	1999	17.6	19.0	19.4	18.0	15.6	14.7	15.1	15.2	15.7	15.4	14.3	15.1	
EVAPORACION TANQUE	1999	2010	4.5	5.2	6.2	5.2	4.5	4.0	3.8	4.1	4.3	4.0	3.3	3.9	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	5	5		
Promedio dias con lluvia >= 0.1 mm.	7	4	6	13	23	23	26	26	26	27	24	15	219.3	Total.

Fuente: IMN (2020)

ANEXO 3 POZOS Y PIEZÓMETROS

Pozo	Profundidad (m)	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Caudal (l/s)	Descripción Litológica (m)	Armado (m)	Prueba Bombeo	Uso	Observaciones
HE-001	38.00	NI	NI	3.70	0.00-13.00m: Deposito coluvio aluvial, constituido por arena y grava fina en una matriz arcillosa. 13.00-38.00m: Basalto fracturado. Se observan abuNIantes planos de oxidacion principalmente asociados con vetillas de minerales secuNIarios.	Ciego:0-9.5m Rejilla: 9.5-38m	Si	NI	Mezcla de acuíferos, rejilla en el cuaternario y el basalto, T=209m2/dia
HE-002	17.00	1.40	6.42	0.75	0.00-0.50m: Arcilla con materia organica 0.50-5.00m: Arcilla gris, pocos fragmentos liticos y materia organica 5.00-8.00m: Arcilla gris, algunos fragmentos liticos 8.00-10.00m: Arena media con fragmentos liticos de tamaño grava 10.00-13.00m: Arena media y fina homogenea 13.00-17.00m: Arena media con fragmentos liticos de tamaño grava	Ciego:0-12m Rejilla: 12-15m Ciego: 15-17	No	NI	
HE-003	17.00	1.17	5.33	2.00	0.00-2.00m: Arcilla gris verdoso, liviana, con materia organica, vetas de oxidos de hierro 2.00-6.00m: Arcilla gris verdoso, suave, saturada,adhesiva, con 10 a 20% aproximado de limo 6.00-8.00m: Arena y limo en 70% aproximadamente, gris claro, suave, saturado, con 30% de arcilla permeabilidad aparente baja 8.00-12.00m: Grava 20%, arena fina 10%, limo 40%, arcilla gris 30% aproximadamente, clastos de jaspe, areniscos, cuarzo, permeabildad aparente baja 12.00-14.00m: Arena fina a media 80%, arcilla 10%, clastos subangulares 10% aproximadamente, permeabilidad aparente mala 14.00-18.00m: Arena media a fina 80%, limo 20% aproximadamente, material muy suelto	Ciego:0-8m Rejilla: 8-17m	Si	Domestico	
HE-004	13.00	5.00	NI	2.40	0.00-9.00m: Gravilla y arena en matriz arcillosa de moderada permeabilidad 9.00-13.00m: Acuifero principal de grava en matriz arenosa. Permeabilidad aparente alta. A 13 m se localizao el basamento basaltico impermeable.	Ciego:0-7m Rejilla: 7-13m	No	NI	
HE-005	23.50	0.50	5.40	35.00	0.00-3.00m: Limo color café con bloques, permeabilidad aparente baja 3.00-7.00m: Limo color gris verdoso, denso, permeabilidad aparente baja a muy baja. 7.00-9.00m: Limo arenoso muy fino, permeabilidad aparente baja. 9.00-18.00m: Arena gruesa con poca arcilla, los granos son principalmente de cuarzo y rocas igneas, permeabilidad aparente alta. 18.00-21.00m: Arena arcillosa, 30% de arcilla, poca grava, permeabilidad aparente media-baja. 21.00-24.00m: Arena y grava, con poca arcilla. Las arenas son grises azuladas y se oberva bastante cuarzo, permeabilidad aparente alta a muy alta 24.00-25.00m: Basamento rocoso, roca ignea gris, permeabilidad aparente muy baja.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-23.5m	No	Turistico	T=970m2/dia
HE-016	20.00	1.50	2.20	0.50	0.00-0.15m: Suelo café oscuro arenoso 0.15-20.00m: Arena, en general media, aunque con tramos gruesos (15-18m) y con tramos de arena fina. La permeabilidad aparente es de media a alta. La coloración es gris oscuro.	Ciego:0-13.5m Rejilla: 13.5-19.5m	No	Domestico	T=285m2/dia
HE-017	23.00	1.21	1.34	3.78	0.00-12.00m: Suelos y materiales arcillosos 12.00-23.00m: Grava mediana sin arcilla	Ciego:0-15m Rejilla: 15-23m	Si	Domestico-Riego	

HE-019	34.00	1.93	0.60	15.00	0.00-5.00m: Sedimentos aluviales, formados aproximadamente en un 75% por arcilla de color amarillenta y en un 25% por arena, lo cual hace este tramo tenga una permeabilidad aparente muy baja 5.00-8.00m: Aluvion formado exclusivamente por fragmentos de tamaño grava gruesa, redoNIeados, sin cementar y algo heterogeneos, aunque se nota una clara predominancia de los restos de composicion lavica. Este tramo presenta muy alta permeabilidad aparente, que lo convierte en una buena zona productora del pozo, aunque tenga un espesor relativamente pequeño 8.00-9.00m: Arcilla de color negro, muy plastica, maleable y totalmente impermeable. Sin ninguna importancia en la produccion del pozo. 9.00-13.00m: Aluvion con las mismas caracteristicas del aluvion del tramo de 5 a 8 metros 13.00-20.00m: Arcilla, color negro, identica a la existente entre 8 y 9 metros de profuNIidad 20.00-34.00m: Aluvion, formado por fragmentos tamaño grava gruesa identicos a los del tramo de 5 a 8 metros de profunidad. Esta parte es la principal zona productora del pozo. CuaNIo alcanzo los 27 metros de profuNIidad el pozo se volvio artesiano.	Ciego:0-6m Rejilla: 6-34m	No	Abastecimiento Publico	
HE-020	35.00	5.40	5.43	9.66	0.00-15.00m: Aluvion de rio fragmentado de 2 cm, composicion arenisca y lutitas con matriz arcillosa 15.00-34.00m: Aluvion fino con intercalaciones de areniscas y arcillas fragmentadas de menos de 2 cm, mas fragmentadas 34.00-35.00m: Formacion Nicoya, material muy duro, piso del acuifero	Ciego:0-17m Rejilla: 17-34m Ciego: 34-35m	Si	Urbanistico	T=1184m2/dia
HE-023	29.00	3.80	8.00	4.00	0.00-2.00m: Arcillas de coloración clara café, con pocos cantos y bloques redoNIeados. Permeabilidad baja. 2.00-8.00m: Arenas medias con arcillas (50-50%). Permeabilidad aparente baja. 8.00-14.00m: Arenas finas, sin arcilla, permeabilidad aparente media. 14.00-27.00m: Arenas gruesas, compuestas por cuarzo, fragmentos igneos y sedimentarios, con algun contenido arcilloso. 27.00-29.00m: Basamento de rocas sedimentarias, poco metoerizada, coloración general gris, se observan estructuras relicto de estratificacion, el contenido arcilloso es del 50% aproximadamente. La permeabilidad es baja. La roca se puede clasificarcomo lutita	Ciego:0-18m Rejilla: 18-29m	No	Turistico	T=100m2/dia
HE-024	20.00	3.30	6.50	4.50	0.00-3.00m: Arcillas de coloración clara café, englobaNIo cantos y bloques redoNIeados, de dificil perforación. Permeabilidad baja. 3.00-13.00m: Arenas medias y finas, con algun contenido arcilloso. De permeabilidad aparente media. 13.00-20.00m: Aluvion medio, con cantos de origen igneo y sedimentario redoNIeados, en una matriz arenosa-arcillosa (60-40%). Permeabilidad aparente alta.	Ciego:0-13m Rejilla: 13-20m	No	Riego-Turismo	T=130m2/dia
HE-027	28.00	1.71	3.30	18.00	0.00-3.00m: Arena gruesa y arcilla 3.00-12.00m: Arena gruesa y grava 12.00-13.00m: Limo 13.00-15.00m: Limo y grava gruesa 15.00-16.00m: Grava 16.00-17.00m: Grava y arcilla 17.00-19.00m: Arena media 19.00-22.00m: Grava y limo 22.00-24.00m: Grava gruesa, limpia 24.00-26.00m: Grava con arcilla 26.00-28.00m: Arcilla y grava	Ciego:0-6m Rejilla: 6-25m Ciego: 25-28m	Si	Turistico	T=5302m2/dia

HE-028	27.00	0.50	1.54	30.00	0.00 3.00 Arena gruesa y arcilla 3.00 9.00 Grava media y arenas gruesas 9.00-15.00m: Limo y arcilla gris 15.00-24.00m: Gravas gruesas, arenas gruesas 24.00-27.00m: Arcillas, limos con grava ocasional	Ciego:0-18m Rejilla: 18-24m Ciego: 24-27m	Si	Varios	T=4823m2/dia
HE-035	38.00	1.39	6.70	9.50	0.00-3.00m: Grava gruesa, subredoNIeada, clastos de arenisca, limolita de color café hasta 20 mm de diametro, matriz arcillosa café. Permeabilidad aparente moderada. 3.00-9.00m: Grava media a gruesa (5-20mm), clastos de basalto, arenisca y limolita café, no hay arcilla. Permeabilidad aparente muy buena. 9.00-11.00m: Grava gruesa en una matriz arcillosa y limosa de color gris, saturada. Permeabilidad aparente mala. 11.00-15.00m; Limo gris oscuro, saturado, incluy clastos de grava en un 20%. Permeabikidad aparente mala. 15.00-17.00m: Limo y arcilla dura, color gris, incluye algunos clastos de grava 17.00-19.00m: Limo y arcilla gris, saturado, adhesivo, grava 20%. Permeabilidad aparente mala. 19.00-20.00m: Grava en matriz arcillosa gris, clastos gris oscuro, arenisca y limolita. Permeabilida aparente moderada. 20.00-21.00m: Grava de color café y gris, en matriz arcillosa amarilla. Permeabilidad aparente moderada. 21.00-22.00m: Grava gruesa de color gris, angulosa, en matriz arcillosa amarilla, dura. Permeabilidad aparente moderada. 22.00-23.00m: Limo y arcilla gris verdoso, saturado, grava 25%. Permeabilidad aparente mala. 23.00-27.00m: Limo y arcilla gris, adhesiva, impermeable. 27.00-30.00m: Grava gruesa, 15-20mm de diametro, color café, presencia de arcilla amarilla. Pemeabilidad aparente buena. 30.00-31.00m: Limo y arcilla café amarillento, saturado, suave. Permeabilidad aparente mala. 31.00-32.00m: Grava gruesa hasta 20 mm de diametro, sana, sin arcilla, clastos de color café de arenisca y limolita sub-redoNIeados. 32.00-33.00m: Grava gruesa poca arcilla. Permeabilidad aparente buena. 33.00-34.00m: Grava y arena gruesa, clastos café amarillento, subredoNIeados. Permeabilidad aparente buena. 34.00-35.00m: Grava gruesa sin arcilla, clastos café amarillento de areniscas y limolitas. Permeabilida aparente muy buena. 35.00-38.00m: Arcilla y limo amarillento, saturados, presencia de grava. Permeabilidad aparente mala	Ciego:0-27m Rejilla: 27-35m Ciego: 35-38m	Si	Varios	T=237m2/dia

					0.00-2.00m: Material de relleno color café. 2.00-4.00m: Arcilla de color gris verdoso, suave, saturada, moldeable, adhesiva. 4.00-7.00m: Material arcilloso duro, ocasionalmente presenta grava tipo lajilla, cristales de cuarzo, materia organica. Permeabilidad aparente muy mala. Acuicludo. 7.00-8.00m: Arcilla color gris verdoso, saturada y muy adhesiva, incluye clastos de grava (7-11mm) subangular, lajilla, grava 20%, clastos de arenisca y basalto color gris verdoso a gris oscuro. Permeabilida aparente mala. Acuitardo. 8.00-10.00m: Guijjaros de 3 cm de diametro, grava gruesa 15-20 mm de diametro, color gris verdoso, poca arcilla. Permeabilidad aparente buena. Acuifero. 10.00-12.00m: Guijarros de 30 cm de diametro ovoides, grava media de 10-15 mm de diametro, clastos de arenisca y basalto. Permeabilidad aparente muy buena. Acuifero. 12.00-14.00m: Grava 50% y 50% de limo gris oscuro, muy saturado, suave. Permeabilidad aparente baja. Materia orgánica. Acuitardo. 14.00-18.00m: Limo de color gris oscuro, suave, saturado completamente. Acuitardo.				
HE-036	41.00	0.08	NI	4.00	18.00-23.00m: Arcilla gris oscuro, suave muy saturada con limo, presencia de grava. Permeabilidad aparente mala. Acuitardo. 23.00-24.00m: Limo de color gris oscuro, saturado con presencia de grava. Materia orgánica. Permeabilidad aparente mala. Acuitardo. 24.00-26.00m: Grava meida 7-12 mm de diametro, arena muy gruesa, clastos de arenisca, basalto. Permeabilidad aparente buena. Acuifero. 26.00-27.00m: Arena gruesa, grava fina con limo gris verdoso, clastos de basalto y arenisca café. Acuitardo. 27.00-28.00m: Arcilla gris y grava 60% y 40%. Permeabilidad aparente baja. Acuitardo. 28.00-29.00m: Limo y arcilla color gris verdoso, muy adhesiva. Permeabilidad aparente muy baja. Acuicludo 29.00-31.00m. Arcilla de color gris muy dura. Impermeable, sello. Acuifugo. 31.00-33.00m: Grava media y arena gruesa con algo de limo, saturada. Permeabilida aparente moderada. Acuifero. 33.00-40.00m: Arcilla de color gris verdoso, muy dura, adhesiva, sello impermeable. Acuicludo. 40.00-41.00m: Arena gruesa a media, color café amarillento, lajilla, cuarzo. Acuifero contacto con el basamento. Materiales de poco recorrido, arenas muy limpias y homogéneas.	NI	No	Piezometro	Se reporta surgencia del agua
HE-043	20.00	0.90	1.20	2.50	0.00-9.00m: Arenisca de grano fino y color café amarillento debido a la meteorización. Parcialmente alterada y con baja permeabilidad aparente. 9.00-40.00m: Arenisca de grano fino y color gris celeste en superficies sanas. Ligeramente alterada hasta 18 m de profuNIidad, el resto de la unidad se mantiene relativamente sana, dura y con baja permeabilidad aparente., pero con moderada porosidad secuNIaria originada por fracturacion.		Si	Domestico-Riego	
HE-044	63.00	30.70		1.00	0.00-8.00m: Arcilla de color rojo, dura, no hay saturación, impermeable 8.00-18.00m: Arcilla amarillenta, dura impermeable 18.00 26.00 Regolita, suave de color café, mucho cristal pequeño de cuarzo. Permeabilidad aparente baja 26.00-58.00m: Basalto muy alterado, muy suelto, arenoso, cristales de cuarzo, color café claro, suave. Permeabilidad aparente moderada. 58.00-63.00m: Basalto sano, duro, color gris oscuro. Permeabilidad		No	Abrevadero	

					aparente mala.				
HE-045	33.00	NI	NI	9.50	0.00-4.00m: Suelo arcilloso arenoso 4.00-6.00m: Aluvion 6.00-12.00m: Arcilla plastica 12.00-19.00m: Aluvion 19.00-21.00m: Arcilla plastica 21.00-32.00m: Aluvion limpo alta permeabilidad 32.00-33.00m: Arcilla		Si	Abastecimiento Publico	
HE-047	30.00	0.20	1.70	3.00	0.00-3.00m: Arcillas, aluvion, englobados en una matriz arcillo limosa color cafe 3.00-29.00m: Aluvion, gravas gruesas y arenas limpias con poca matriz arcillosa 29.00-30.00m: Cascajo gris, lavas alteradas del Complejo de Nicoya	Ciego:0-12m Rejilla: 12-29.70m	Si	Domestico-Riego	Bajo abatimiento, pozo surgente
HE-048	20.00	5.50	8.10	2.00	0.00-5.00m: Suelo arcilloso 5.00-20.00m: Arenas medias de color negro. El tramo de 13,5 a 16 fue de arena gruesa, limpia, redoNIeada. De alta permeabilidad.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-20m	Si	Domestico	
HE-051	78.00	35.00	NI	1.50	0.00-33.00m: Arcilla parda y rojiza de plasticidad media con fragmentos de basaltos parcialmente meteorizados. Permeabilidad aparente baja. 33.00-78.00m: Basalto con diferenetes estados de alteracion, con coloraciones verde oscura, rojiza y negro. Textura afanitica porfiritica y presencia de fracturas con relleno calcareo. Permeabilidad aparente baja-media	NI	Si	Riego-Domestico-Turismo	
HE-058	180.00	100.00	NI	1.50	0.00-20.00m: Suelo arcilloso roijizo 20.00-100.00m: Lavas del Complejo de Nicoya, alteradas y fracturadas 100.00-180.00m: Lavas mas o menos sanas del Complejo de Nicoya con fracturas	NI	No	Domestico-Riego	
HE-059	30.00	7.46	22.12	8.00	0.00-3.00m: Arcilla café con limo, adhesiva, moldeable, impermeable (acuifugo) 3.00-6.00m: Arcilla café, adhesiva, moldeable, impermeable (acuifugo) incluye algunos clastos sub-angulares de basalto 6.00-7.00m: Grava de grano medio de 9 mm hasta 25 mm de diametro, clastos de basalto. Sección acuífera. 7.00-9.00m: Arcilla cafe, suave moldeable, impermeable (acuifugo) 9.00-11.00m: Arcilla café, dura con arena gruesa, impermeable 11.00-13.00m: Arcilla café, suave, saturada, incluye grava y guijarros (acuicludo) 13.00-15.00m: Grava gruesa de 7 a 9 mm de diametro con presencia de arcilla. Permeabilidad aparente baja. 15.00-17.00m: Grava gruesa de 7 a 9 mm de diametro, con presencia de arcilla. Pemeabilidad aparente moderada. 17.00-29.00m: Grava muy gruesa 12 a 25 mm de diametro, incluye algunos guijarros, los componentes principales areniscas, limolitas y basalto, cuarzo amorfo. Pemeabilidad aparente muy buena. 29.00-30.00m: Basamento arcilloso, verdoso, muy duro, impermeable, sello (acuifugo)	Ciego:0-18m Rejilla: 18-27m Ciego: 27-30m	No	Domestico	T=42m2/dia

HE-061	122.00	109.00	NI	0.86	0.00-8.00m: Arcilla rojiza (latosol), suave, impermeable 8.00-14.00m: Arcilla café, incluye clastos, suave, adhesiva 14.00-18.00m: Brecha arcillosa, rojiza, suelta, suave. Permeabilidad aparente baja. 18.00-32.00m: Roca con mucho cuarzo amorfo lechoso, duro muy fracturada. 32.00-34.00m: Basalto alterado, muy suelto inestable. 34.00-36.00m: Arcilla café, suave. 36.00-38.00m: Arcilla roja, dura, paleosuelo. 38.00-54.00m: Arcilla café, dura. Permeabilidad aparente mala. 54.00-60.00m: Arcilla amarilla, dura, incluye clastos de basalto alterado, jazpe rojo. Permeabilidad aparente mala. 60.00-62.00m: Arcilla gris oscuro, clastos de basalto alterado, jazpe rojo. Permeabilidad aparente mala. 62.00-76.00m: Basalto gris oscuro, fracturado, mucho jazpe rojizo, cuarzo amorfo lechozo. Permeabilidad aparente mala. 76.00-86.00m: Basalto gris amarillento, meteorizado con presencia de jazpe rojizo. Pemeabilidad aparente mala. 86.00-118.00m: Arcilla verdosa, dura (falla) fragmento liticos de basalto, suave. Permeabilidad aparente mala. 118.00-122.00m: Basalto sano, de color gris oscuro, muy fracturado.	NI	No	Otros Usos	
HE-062	180.00	160.00	NI	1.00	0.00-18.00m: Suelo arcilloso roijizo 18.00-105.00m: Lavas del Complejo de Nicoya, alteradas y fracturadas 105.00-180.00m: Lavas mas o menos sanas del Complejo de Nicoya con fracturas	NI	No	Domestico	k 1.31 m/dia en areniscas Carballo
HE-067	35.00	8.16	19.00	0.80	0.00-4.00m: Arcillas color café 4.00-15.00m: Arcillas y fragmentos de material sedimentario, principalmente lutitas. 15.00-30.00m: Sedimentario marino, compuesto por areniscas y lutitas 30.00-35.00m:I39 Complejo de Nicoya	Ciego:0-12m Rejilla: 12-35m	Si	Domestico	Presencia de la falla inversa regional y prueba de bombeo
HE-068	38.50	1.91	10.70	25.00	0.00-3.00m: Suelo arcilloso 3.00-20.00m: Arcilla plastica gris oscura 20.00-23.00m: Aluvion grueso 23.00-29.00m: Arenas en matriz arcillosas 29.00-38.00m: Arenas gruesas 38.00-38.50m: Material denso, aparente lavas	Ciego:0-20.30m Rejilla: 20.30-23.38m Ciego: 23.30-38.50m	Si	Abastecimiento Publico	
HE-069	40.00	2.19	8.66	29.00	0.00-6.00m: Arcilla plastica 6.00-10.00m: Arenas y gravas 10.00-16.00m: Arcilla gris 16.00-20.00m: Arenas y gravas 20.00-22.00m: Arcilla plástica 22.00-24.00m: Arena fina 24.00-27.00m: Arcilla plástica 27.00-29.00m: Gravas 29.00-32.00m: Arcilla 32.00-40.00m: Arcilla	NI	No	Abastecimiento Publico	Mismo pozo INV-226
HE-070	30.00	16.10	16.70	2.50	0.00-3.00m: Arcillas color café 3.00-17.00m: Gravas y arcillas, permeabilidad nula 17.00-27.00m: Gravas limpias, permeabilidad aparente alta 27.00-30.00m: Arcillas	Ciego:0-18m Rejilla: 18-28m Ciego: 28-30m	No	Domestico	

HE-071	61.00	2.00	3.00	15.00	0.00-6.00m: Sedimentos finos, limos y arcilla y arenosos en menor proporcion. De color café claro y moderada porosidad y permeabilidad aparentes 6.00-12.00m: Arcilla, color gris claro, plástica y con baja permeabilidad aparente. 12.00-18.00m: Arcilla y limos, color café claro, menos plastica que la anterior y con baja permeabilidad aparente 18.00-22.00m: Aluvion fino, gravas y arenas de composición heterogénea y con alta porosidad y permeabilidad aparente 22.00-40.00m: Arcilla, limos y arenas de color café claro, con baja a moderada porosidad y permeabilidad aparentes 40.00-50.00m: Aluvion fino, similar al tramo de 88 a 22 metros 50.00-61.00m: Arenisca de grano fino y color gris oscuro verdoso, en los primeros 6 metros la roca se encuentra algo alterada y oxidada, el resto se mantiene sana, dura y con baja a moderada permeabilidad aparente	Ciego:0-15m Rejilla: 15-60m	No	Varios	
HE-075	21.00	7.16	8.49	0.50	0.00-2.00m: Suelo areno arcilloso 2.00-6.00m: Arenas finas a gruesas 6.00-12.00m: Arenas gruesas 12.00-18.00m: Grvas finas a medias 18.00-21.00m: Gravas medias	Ciego:0-7m Rejilla: 7-20m Ciego: 20-21m	No	Domestico-Riego	
HE-076	30.00	0.50	1.60	7.00	0.00-1.00m: Arcillas color café 1.00-6.00m: Gravas con matriz arcillosa 6.00-10.00m: Gravas muy limpias 10.00-12.00m: Arcillas color gris 12.00-14.00m: Gravas de tamaño medio, limpias 14.00-16.00m: Arcillas color gris 16.00-24.00m: Gravas con lentes de arcillas 24.00-30.00m: Gravas muy limpias formadas por lutitas de grano medio, en este zona presenta artesianismo	Ciego:0-6m Rejilla: 6-30m	No	Domestico	
HE-077	22.00	1.70	5.08	14.00	0.00 2.00 Arcillas color café 2.00 5.00 Arcillas y gravas, permeabilidad nula 5.00-8.00m: Arcillas color gris 8.00-14.00m: Gravas y arenas limpias 14.00-20.00m: Arenas y limos, permeabilidad aparente muy baja 20.00-22.00m: Limos	Ciego:0-2m Rejilla: 2-20m Ciego: 20-22m	No	Domestico	
HE-080	51.00	2.00	4.00	15.00	0.00-15.00m: Arenas, limo y arcilla, todos de color café claro, con moderada porosidad y permeabilidad aparentes 15.00-30.00m: Aluvion fino, conformado por gravas, arenas y algo de limos, los cantos son sedimentos de color café claro, con alta porosidad y permeabilidad aparentes. Entre 20-24 m de profuNIidad contiene algo de arcilla 30.00-51.00m: Arenisca de grano fino y color gris oscuro verdoso, en los primeros 6 metros la roca se encuentra algo alterada, el resto se mantiene sana, dura y con baja a moderada permeabilidad aparente.	Ciego:0-12m Rejilla: 12-51m	No	Riego-Domestico-Turismo	
HE-088	30.00	0.50	1.22	2.00	0.00-3.00m: Sedimentos: Limos y arcillas de color café claro, con baja permeabilidad aparente. 3.00-6.00m: Aluvión fino con arcilla hasta grava. Fragmentos de arenisca de grano fino y color gris oscuro verdoso. Con alta porosidad y permeabilidad aparentes. 6.00-24.00m: Sedimentos, limos y arcillas de color negro. Posible depósito de manglar, con baja permeabilidad aparente. 24.00-30.00m: Aluvión fino, arenas y gravas, fragmentos de lutitas y areniscas de color café claro. Con alta porosidad y permeabilidad aparentes.	Ciego:0-16m Rejilla: 16-27m Ciego: 27-30m	Si	Turistico	T= 73 m2/dia

HE-098	19.00	2.75	5.23	0.90	0.00-6.00m: Limo arcilloso saturado, color gris verdoso, presencia de materia orgánica 6.00-9.00m: Grava gruesa y guijarros en matriz limosa, clastos de arenisca y limonitas saturadas. Sección acuífera 9.00-12.00m: Grava de grano medio de 7 a 9 mm de diámetro, poca arcilla, clastos de areniscas. Permeabilidad aparente buena. 12.00-15.00m: Grava gruesa de 18 a 20 mm de diámetro, mucho cuarzo y areniscas verdosas. Permeabilidad aparente buena. 15.00-19.00m: Arcilla gris verdosa con grava y guijarros. Permeabilidad aparente mala	Ciego:0-10m Rejilla: 10-18m Ciego: 18-19m	Si	Domestico		T= 6.64 m2/dia
HE-099	100.00	74.46	85.01	0.60	0.00-4.00m: Arcillas de color rojo (laterita), impermeable 4.00-40.00m: Ignimbrita de color amarillento, dura, impermeable 40.00- 58.00m: Basalto algo alterado, de coloración grisásea, duro, cuarzo amorfo y cristales. Permeabilidad aparente mala. 58.00-70.00m: Basalto gris oscuro, impermeable muy duro. Permeabilidad aparente mala. 70.00-80.00m: Basalto gris oscuro, duro con mucha presencia de cuarzo amorfo. 80.00-84.00m: Basalto alterado de color amarillento, suelto arenoso, muchos cristales de cuarzo, pareciera material de falla. 84.00-100.00m: Basalto sano, oscuro, duro. Permeabilidad aparente mala.	NI	No	Domestico		
HE-101	30.00	2.50	17.87	1.50	0.00-12.00m: Arcilla de color café amarillenta, con clastos subredoNIeados de areniscas y limolitas. Permeabilidad aparente mala 12.00-18.00m. Coluvial de matriz arcillosa, color café, incluye mucha grava. Permeabilidad aparente baja. 18.00-21.00m: Grava gruesa hasta 9 mm de diámetro, subredoNIeados, poca arcilla, color café. Permeabilidad aparente moderada. 21.00-24.00m: Coluvial con arcilla verdosa, clastos igneos. Permeabilidad aparente mala. 24.00-30.00m: Lutitas y limolitas de color verdoso. Permeabilidad aparente mala.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-24m Ciego: 24-30m	No	Domestico		T= 11.5 m2/dia
HE-102	30.00	1.20	1.76	3.00	0.00-6.00m: Arcillas color café 6.00-15.00m: Grava con matriz arcillosa 15.00-16.00m: Gravas muy limpias 16.00-20.00m: Grava con matriz arcillosa 20.00-23.00m: Gravas de tamaño medio, limpias 23.00-29.00m: Gravas con lentes de arcillas 29.00-30.00m: Arcillas colo café, se toca el basamento	NI	No	Domestico		T= 5.49 m2/dia
HE-103	18.00	0.76	2.18	3.15	0.00-4.00m: Suelo arcilloso 4.00-10.00m: Arenas finas intercaladas con arcillas en capas típicas de rellenos aluviales, de granulometrías finas a medias de mala selección, buena a baja permeabilidad 10.00-18.00m: Gravas aluviales de muy buena permeabilidad y arenas gruesas, compuesta por granos de colores variados entre blancos, rojizos, grises y negros, de composición volcánica y sedimentaria, de tamaños mm a cm de alta esfericidad y rodoNIes, contienen cristales de cuarzo. A los 18 metros se reporta un basamento duro asociado al Complejo de Nicoya	Ciego:0-3m Rejilla: 3-17m Ciego: 17-18m	No	Domestico-Riego		T= 602 m2/dia
HE-106	18.00	1.00	2.90	2.00	0.00-4.00m: Suelo arcilloso y vegetal 4.00-18.00m: Arenas finas intercaladas con arcillas en capas típicas de rellenos aluviales, de granulometrías finas a medias de mala selección, buena a baja permeabilidad	Ciego:0-3m Rejilla: 3-17m Ciego: 17-18m	No	Domestico-Riego		T= 186 m2/dia

HE-112	30.00	0.92	10.82	4.16	0.00-12.00m: Arcilla color café claro, adhesiva, presencia de limos. Impermeable, sello geologico natural, saturada 12.00-15.00m: Arcilla café claro, saturada, adhesiva, hay presencia de grava 15.00-18.00m: Grava café, poca arcilla, clastos hasta 9 mm de diametro de areniscas finas, cuarzo amorfo 18.00-21.00m: Grava de color café de 7 a 9 mm de diametro, clastos de areniscas, subredoNIeados y subangulares, poca arcilla 5% mas o menos. Permeabilidad aparente buena. 21.00-24.00m: Grava de color café, clastos de areniscas de 7-12 mm de diametro, poca arcilla, subredodeados. Permeabilidad aparente buena. 24.00-30.00m: Basamento igneo, probablemente basalto del complejo de Nicoya, muy fracturado, color gris oscuro, material muy sano. Permeabilidad aparente buena.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-30m	Si	Domestico	T= 20 m2/dia
HE-114	30.00	0.50	11.18	2.81	0.00-3.00m: Arcilla gris verdosa, dura, incluye grava gruesa en un 10%. Impermeable, sello natural, acuicludo. 3.00-6.00m: Arcilla verde, dura con grava, incluye clastos de grava gruesa en un 5%. Permeabilidad aparente mala. Acuicludo. 6.00-12.00m: Arcilla de color verde, dura incluye clastos de grava gruesa (5 a 12 mm de diametro). Permeabilidad aparente mala, acuicludo. 12.00-18.00m: Grava media, con clastos hasta 12 mm de diametro, subangulares y redoNIeados, principalmente de areniscas de grava fina de color café, con alguna presencia de arcilla. Pemeabilidad aparente buena. 18.00-24.00m: Arcilla café suave, adhesiva, saturada, incluye un 40% de grava de tamaño medio 9-12 mm de diametro. Permeabilidad aparente baja, acuitardo 24.00-30.00m: Basamento igneo, basaltos del Complejo de Nicoya, color gris oscuro, duro pero con fracturación, que bien puede aportar agua subterránea	Ciego:0-3m Rejilla: 3-17m Ciego: 17-18m	No	Domestico	T= 18 m2/dia
HE-115	36.00	-0.41	14.51	5.20	0.00-12.00m: Arcilla de color café claro, adhesiva, saturada, inlcuye un 5% (estimado) de grava media. Permeabilidad aparente cerrada. Acuicludo. 12.00-15.00m: Arcilla café grisaseo, adhesiva, saturada, incluye grava media en un 15% (estimado). Permeabilidad aparente cerrada. Acuicludo. 15.00-21.00m: Grava media a gruesa (12mm a 25.4mm), clastos de arenisca café, cristales de cuarzo, arcilla en un 5%, facilmente desaparece con la acción mecánica. Permeabilidad aparente buena. Acuifero. 21.00-24.00m: Arcilla café, adhesiva, incluye clastos de grava media en un 15%. Pemeabilidad aparente mala. Acuicludo. 24.00-36.00m: Basamento igneo (basalto del Complejo de Nicoya), color gris oscuro, duro, pero muy fracturado, con evidencia de circulación de agua. Permeabilidad aparente moderada, sección acuifera.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-36m	No	Domestico	T= 23 m2/dia

HE-116	30.00	0.60	9.06	11.00	0.00-3.00m: Arcilla amarilla con arena y grava. Permeabilidad aparente mala 3.00-6.00m: Arcilla de color café, adhesiva, incluye grava. Permeabilidad aparente mala. 6.00-9.00m: Arcilla de color café, incluye grava. Permeabilidad aparente mala. 9.00-12.00m: Grava fina, 3-5 mm en matriz arcillosa. Permeabilidad aparente baja. 12.00-15.00m: Grava media 7-9mm, matriz arcillosa café. Permeabilidad aparente moderada. 15.00-18.00m: Grava media, con presencia de arcilla en poco cantidad 5-7%. Permeabilidad aparente moderada. 18.00-24.00m: Grava media 7-9mm, poca arcilla gris, componentes igneos. Permeabilidad aparente buena. 24.00-26.00m: Grava sin arcilla, 7-9 mm, componentes de origen igneo. Permeabilidad aparente buena. 26.00-30.00m: Grava sana, sin arcilla, componentes igneos. Permeabilidad aparente muy buena.	NI	No	Otros Usos	T= 126m2/dia
HE-117	30.00	-0.17	19.47	1.00	0.00-6.00m: Arcilla gris con grumos ocasionales, poco compacta. 6.00-9.00m: Arcilla con grava media, predomina la arcilla. Permeabilidad aparente muy baja. 9.00-12.00m: Arcilla con grava de 2 a 9 mm de diametro, matriz arcillosa café claro en un 50% 12.00-15.00m: Arcilla café claro, densa, plastica, con arena fina y ocacionales fragmentos de grava (9 mm de diametro). Predomina la arcilla. Permabilidad aparente muy baja. 15.00-18.00m: Grava tipica de 9-12 mm de diametro, en un 80%, arena gruesa en un 15 % y arcilla de color café claro, plastica. Permeabilidad aparente muy alta. Acuifero. 18.00-21.00m: Grava bien redoNIeada, con arena gruesa y arcilla café en un 3-5%. Permabilidad aparente muy alta. 21.00-24.00m: Grava y arena fina con arcilla amarillenta en 5 a 7%. 24.00-27.00m: Basalto parcialmente meteorizado (Complejo de Nicoya) y con salbaNIa de falla (gouge) tipica. Permeabilidad aparente baja. 27.00-30.00m: Basaltos más sanos del Complejo de Nicoya. Tipico basamento volcanico.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-24m Ciego: 24-30m	Si	Servicios medicos	Artesiano a 30 m, varios tramos de rejilla, T= 12 m2/dia
HE-120	30.00	9.70	10.78	11.50	0.00-8.00m: Arcilla 8.00-10.00m: Grava con arcilla 10.00-14.00m: Grava gruesa, permeabilidad aparente buena 14.00-16.00m: Grava con arcilla, permeabilidad aparente buena 16.00-24.00m: Grava gruesa, permeabilidad aparente buena 24.00-30.00m: Arcilla y grava, permeabilidad aparente moderada		Si	Domestico-Riego	
HE-121	30.00	13.78	14.35	5.00	0.00-3.00m: Arcilla 3.00-6.00m: Grava 6.00-14.00m: Arcilla 14.00-26.00m: Grava 26.00-34.00m: Grava gruesa muy limpia 34.00-40.00m: Arcilla y grava	Ciego:0-18m Rejilla: 18-30m	Si	NI	T= 498m2/dia
HE-123	126.00	58.00	61.74	4.00	0.00-35.00m: Materiales coluviales, compuestos por rocas sedimentarias de grano fino y coloración rojiza, asociadas a las Radiolaritas del Complejo de Nicoya 35.00-126.00m: Rocas sedimentarias de grano fino a muy fino, coloración rojiza, moderadamente fracturadas y bastante sanas, correlacionadas con las Radiolaritas del Complejo de Nicoya.	NI	Si	Domestico-Riego	T= 27.33m2/dia

HE-125	105.00	23.74	27.11	3.00	0.00-8.00m: Materiales coluviales, compuestos por rocas sedimentarias de grano fino y coloración rojiza, asociadas a las Radiolaritas del Complejo de Nicoya 8.00-80.00m: Rocas sedimentarias de grano fino a muy fino, coloración rojiza, moderadamente fracturadas y bastante sanas, correlacionadas con las Radiolaritas del Complejo de Nicoya. 80.00-105.00m: Rocas volcánicas de coloración verdosas, al principio se muestran bastante meteorizadas, posteriormente se presentan sanas con cierto fracturamiento, estas han sido correlacionadas con los basaltos del Complejo de Nicoya	Ciego:0-44m Rejilla: 44-98m Ciego: 98-105m	Si	Domestico-Riego	T= 39m2/dia
HE-131	30.50	5.03	5.54	3.00	0.00-8.00m: Arcilla de color café claro, adhesiva, saturada, inlcuye grava media a gruesa (2 a 15 mm de diametro), clastos igneos, sub-angulares y sub-redoNIeados. 8.00-29.00m: Grava heterogenea cuya granulometria oscila de 3 a 15 mm de diametro, subangular y subredoNIeada, clastos igneos, no hay presencia de arcilla. Permeabilidad aparente muy buena, acuifero. 29.00-30.50m: Arcilla gris verdoso, acuicludo. Sello	Ciego:0-22.5m Rejilla: 22.5-28.5m Ciego: 28.5-30.5m	Si	Comercial	
HE-134	38.00	0.50	1.78	43.00	0.00-3.00m: Arcilla amarillenta. 3.00-5.00m: Arcilla gris 5.00-10.00m: Arena gruesa 10.00-12.00m: Arcilla gris 12.00-22.00m: Arena gruesa 22.00-33.00m: Basaltos meteorizados y fracturados (Complejo de Nicoya) 33.00-38.00m: Basaltos sanos (Complejo de Nicoya)	Ciego:0-12m Rejilla: 12-30m Ciego: 30-38m	Si	Abastecimiento Publico	Surgente del AyA, T= 4199m2/dia
HE-140	59.00	9.72	43.77	5.00	0.00-6.00m: Suelo areno color café 6.00-59.00 Coladas de lava basaltica del Complejo de Nicoya con intercalaciones de brechas	Ciego:0-18m Rejilla: 18-59m	Si	Abastecimiento Publico	T= 1.81m2/dia
HE-141	59.00	16.78	NI	5.00	0.00-6.00m: Suelo areno color café 6.00-59.00m: Coladas de lava basaltica del Complejo de Nicoya con intercalaciones de brechas	NI	No	Abastecimiento Publico	k 1.47 m/dia en basaltos
HE-150	118.00	11.20	35.54	0.00	0.00-5.00m: Arcilla roja 5.00-10.00m: Basalto alterado fracturado 10.00-50.00m: Basalto gris verdoso poco fracturado. Permeabilidad fracturado. Permeabilidad aparente mala 50.00-70.00m: Basalto fracturado 70.00-85.00m: Basalto fracturado, presencia de agua. Permeabilidad aparente media 85.00-100.00m: Basalto denso, verdoso. Permeabilidad aparente media	NI	Si	Varios	
HE-168	NI	NI	NI	NI	NI	NI	Si	Abastecimiento Publico	Pozo de la ASADA de Herradura, no tiene informe de perforación, T=276 m2/dia
TS-013	40.00	15.50	17.00	4.70	0.00-4.00m: Material arcilloso-limoso, freable, suave, ligeramente moldeable, color café claro 4.00-22.00m: Arcilla café oscuro a claro, plastica, adhesiva, moldeable,incluye grava, guijarros y arena gruesa, material heterogéneo en granulometría, aumentaNIo el % hasta en un 40% en lo inferior del pozo y mejoraNIo la permeabildad que es moderada aparentemente 22.00-26.00m: Grava y arena gruesa en un 80% con un 20% de arcilla, mejora la permeabilidad aparente, los clastos son de poco recorrido 26.00-30.00m: Arcilla de color gris verdoso a oscuro, plastica, adhesiva, incluye un 30% de clastos subangulares, permeabilidad aparente baja. Acuitardo. 30.00-40.00m: Sedimentario marino, formado por areniscas de grano fino y limolitas interestratificadas, de color gris verdoso, semiduras, permeabilidad aparente mala se le considera un acuifugo.	Ciego:0-17m Rejilla: 17-30m Ciego: 30-40m	No	Riego	

TS-018	60.00	0.50	NI	1.80	0.00 10.00 Aluvion, compuesto de gravas gruesas, en matriz arcillosa. La permeabilidad aparente es baja 10.00 12.00 Arcilla, rojiza, plastica impermeable 12.00-26.00m: Gravas gruesas, en matriz areno arcillosa, color café claro. Se trata de aluvión, la permeabilidad aparente es media alta. 26.00-35.00m: Roca sedimentaria, arenisca de grano grueso, con matriz meteorizada arcillosa. La permeabilidad aparente es baja 35.00-60.00m: Roca sedimentaria, arenisca de grano grueso, color gris con abuNIantes fracturas de 42 en adelante. De 58 a 60l a roca es sana y sin fracturas	Ciego:0-36m Rejilla: 36-58m Ciego: 58-60m	No	INIustrial	
TS-091	25.00	3.91	14.40	0.90	0.00-9.00m: Arcillas color café 9.00-15.00m: Grava con matriz arcillosa, permeabilidad baja 15.00-30.00m: Arcillas color gris con lentes de gravas subredoNIeadas, se toca el basamenteo, permeabilidad baja		No	Domestico	
TS-106	40.00	9.75	17.60	1.00	0.00-9.00m: Arcillas color café 9.00-12.00m: Arcillas color café claro 12.00-18.00m: Gravas con poca arcilla color café claro 18.00-25.00m: Gravas con poca arcilla color gris, permeabilidad aparente buena 25.00-38.00m: Areniscas de grano fino, presentan fracturamiento, permeabilidad buena 38.00-40.00m: Areniscas solidas	NI	No	Domestico	
TS-107	40.00	12.10	12.79	2.60	0.00-9.00m: Arcillas color café 9.00-12.00m: Arcillas color café claro 12.00-18.00m: Gravas con poca arcilla color café claro 18.00-25.00m: Gravas con poca arcilla color gris, permeabilidad aparente buena 25.00-38.00m: Areniscas de grano fino, presentan fracturamiento, permeabilidad buena 38.00-40.00m: Areniscas solidas	Ciego:0-10m Rejilla: 10-40m	No	Domestico	Surgente, analisis FQ, reprocesar la prueba
TS-113	40.00	3.25	3.65	2.50	0.00-9.00m: Arcillas color café 9.00-12.00m: Arcillas color café claro 12.00-18.00m: Gravas con poca arcilla color café claro 18.00-25.00m: Gravas con poca arcilla color gris, permeabilidad aparente buena 25.00-38.00m: Areniscas de grano fino, presentan fracturamiento, permeabilidad buena 38.00-40.00m: Areniscas solidas	NI	No	Domestico-Riego	k 1.61 m/dia en areniscas Carballo
TS-120	40.00	9.65	10.05	1.00	0.00-9.00m: Se encuentra grava de guijarros. Esta posee aproximadamente un 40% de matris limo-arcillosa, de color café claro y plasticidad moderada. Los guijarros son redoNIeados a subredoNIeados, generalmente subesfericos y se encuentran constituidos aproximadamente por 83% de areniscas finas y lutitas, de color cafe grisaseo y con abuNIantes patinas de oxido de hierro y manganeso, 15% de guijarros baslticos del Complejo de Nicoya, son de color negro y textura afanitica y un 2% de cuarzo, opalo y radiolaritas. La permeabilidad de esta sección es buena. 9.00-18.00m: Esta constituido por la misma grava pero con un 10% de material limo-arcillosoy tiene una muy buena permeabilidad 18.00-27.00m: Se encuentra grava de guijarros, con aproximadamente un 50% de matriz limoa-arcillosa color café claro y plasticidad moderada. Los guijarros son en su mayoría areniscas finas y lutitas, de colores café grisaseo y algunas tonalidades rojizas por oxidos de hierro 27.00-40.00m. Se encuentra constituido por areniscas de grano fino con un color gris claro. En esta se econtraron fosiles de bivalvos y también estratos de arenisca media, en la que se observan clastos de radiolarios, opalo y basaltos, estos son angulares y se encuentran subredoNIeados.	Ciego:0-15m Rejilla: 15-40m	No	Domestico-Riego	

TS-121	30.00	9.65	10.05	1.00	0.00-9.00m: Se encuentra grava de guijarros. Esta posee aproximadamente un 40% de matris limo-arcillosa, de color café claro y plasticidad moderada. Los guijarros son redoNIeados a subredoNIeados, generalmente subesfericos y se encuentran constituidos aproximadamente por 83% de areniscas finas y lutitas, de color cafe grisaseo y con abuNIantes patinas de oxido de hierro y manganeso, 15% de guijarros baslticos del Complejo de Nicoya, son de color negro y textura afanitica y un 2% de cuarzo, opalo y radiolaritas. La permeabilidad de esta sección es buena. 9.00-18.00m: Esta constituido por la misma grava pero con un 10% de material limo-arcilloso y tiene una muy buena permeabilidad 18.00 27.00 Se encuentra grava de guijarros, con aproximadamente un 50% de matriz limoa-arcillosa color café claro y plasticidad moderada. Los guijarros son en su mayoría areniscas finas y lutitas, de colores café grisaseo y algunas tonalidades rojizas por oxidos de hierro 27.00-40.00m: Se encuentra constituido por areniscas de grano fino con un color gris claro. En esta se econtraron fosiles de bivalvos y también estratos de arenisca media, en la que se observan clastos de radiolarios, opalo y basaltos, estos son angulares y se encuentran subredoNIeados.	NI	No	Domestico-Riego	
TS-127	30.00	5.40	9.03	1.00	0.00-9.00m: Arcillas color café 9.00-11.00m: Arcillas color café claro 11.00-18.00m: Gravas con poca arcilla color café claro 18.00-25.00m: Gravas con poca arcilla color gris, permeabilidad aparente buena 25.00-30.00m: Areniscas de grano fino, presentan fracturamiento, permeabilidad buena	Ciego:0-9m Rejilla: 9-30m	Si	Domestico	Prueba de bombeo
TS-143	0.00	0.00	13.30	0.00	0.00-12.00m: Roca meteorizada con arcilla color café claro 12.00-19.00m: Lutitas meteorizadas con fracturas, color gris oscuro a negro 19.00-27.00m: Lutitas gris oscuro a negras con arcillas color gris oscuro 27.00-33.00m: Lutitas color gris oscuro con clastos liticos 33.00-36.00m: Arenisca fina color gris claro con fragmentos liticos 36.00-41.00m: Lutitas grises con fragmentos subredoNIeados color blanco 41.00-45.00m: Arcillas plastica color gris oscuro sin presencia de agua, plasticidad alta 45.00-66.00m: Lutitas grises, fracturadas, color gris oscuro, poca productividad hidrica 66.00-79.00m: Idem anterior, con fracturas secuNIarias y presencia de agua 79.00-84.00m: Areniscas color café claro con presencia de agua 84.00-90.00m: Arenisca finas a medias, no consolidadas, con presencia de agua	NI	No	Domestico-Riego	T= 13m2/dia
TS-158	60.00	6.00	50.80	0.00	0.00-6.00m: Arcillas plasticidad media a alta, color anaranjado 6.00-12.00m: Arcillas color gris, con fragmentos de roca sedimentaria. Mala permeabilidad. 12.00-30.00m: Lutitas gris oscuro a negro, altamente fracturadas 30.00-38.00m: Intercalaciones de areniscas y limos de color gris a negro, se presentan muy meteorizadas y fracturadas con alta permeabilidad 38.00-60.00m: Lavas basalticas fracturadas con relleno arcilloso en las fracturas a partir de los 58 m se presentan capas de areniscas muy fracturadas	Ciego:0-36.8m Rejilla: 36.8-60m	Si	Domestico	T= 102.4m2/dia

ANEXO 4 NIVELES DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA RED DE MONITOREO DE POZOS

No.	Pozo/propietario	Tipo	Localidad	Latitud	longitud	Profundidad	Brocal (m)	nov-19		dic-19		ene-20		feb-20		mar-20		abr-20		may-20		jun-20		jul-20		ago-20		sep-20		oct-20		nov-20		dic-20		feb-21		mar-21	
								NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)	NE (m)	ND (m)
1	HE-176	Perforado	Herradura	434435	1067821	100.00	0.70	93.04								92.79		92.83		92.82				93.13		93.03		93.08				93.03		92.87		92.84		92.76	
2	HE-168	Perforado	Herradura	429035	1068028	NI	0.20										11.56		10.80		11.78	12.40		12.33			13.49		13.56		13.41		13.64		13.48	13.19		12.19	
3	HE-045	Perforado	Herradura	430236	1068677	33.00	0.45	24.80								17.07			14.72	15.00									25.25										
4	HE-183	Perforado	Herradura	430238	1068675	60.00	0.70	24.73								16.92		14.89		14.39				19.63		24.55		25.02		24.91		25.09		24.69		22.55		18.87	
5	HE-020	Perforado	Herradura	430082	1068797	35.00	0.70		23.35							17.23	15.80	13.98		13.38				18.70		23.78		24.21		24.12		24.28		23.89		21.70		17.99	
6	HE-184	Perforado	Herradura	430080	1068792	51.00	0.72	23.62								15.97		14.06		13.46				18.76		23.68		24.12		24.04		24.18		23.81		21.63		17.96	
7	TS-170	Perforado	Herradura	430356	1069728	50.00	0.70	31.33								16.86		14.21		14.07				25.12		32.24		33.36		33.08		32.98		32.10		26.87		19.89	
8	TS-166	Perforado	Herradura	429709	1071128	100.00	0.60	67.78								67.08		66.52		66.32				66.67		66.85		69.52		69.26		69.59		69.28		68.12		67.34	
9	Finca Pipasa, Herradura	Perforado	Herradura	429813	1070738	NI	0.72	49.73								48.62		48.33		47.93				50.13		51.43		52.94		52.49		52.67		50.21				48.72	
10	Cañablancal	Perforado	Herradura	431153	1070491	40.00	0.35													43.15				53.16		53.63		54.92		54.49		54.08				47.62		45.01	
11	TS-127	Perforado	Herradura	430455	1069172	30.00	0.35																	18.65		25.77		26.65		26.45		26.80		26.12		22.52		16.70	
12	HE-131	Perforado	Herradura	429806	1068326	30.50	0.00																							19.15		19.29		19.03		17.81			
13	inca Valle Escondido, Herradu	Excavado	Herradura	429924	1070366	20.00	0.40																							44.43		44.20		43.23		40.74		40.43	
14	HE-068	Perforado	Jacó	431792	1064722	38.50	0.60	11.20		10.78		10.28		9.83		9.60			6.01		6.13		5.00																
15	HE-069	Perforado	Jacó	431770	1064762	40.00	NI	14.77		14.27		13.53		13.12		12.92		11.25		12.05			4.10																
16	HE-019	Perforado	Jacó	431650	1064631	34.00	0.27	16.34		15.99		15.37		15.03		14.76		12.83		14.27																			
17	HE-134	Perforado	Jacó	430995	1065104	38.00	NI	14.18		15.50			15.38		15.38		15.38		15.38		15.38		15.38																

ANEXO 5 ANÁLISIS DE SUELOS, CAPACIDAD DE CAMPO, PUNTO DE MARCHITEZ, DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD

MUESTRA	X	Y	CC	%CC	PM	%PM	DENSIDAD APARENTE (g/cm3)	POROSIDAD %	CLASIFICACION	USCS	FORMACION GEOLOGICA	UNIDAD BALANCE	FUENTE
1	429384	1070073	40.00	0.49	35.00	0.43	1.23	56.66	Limo de alta plasticidad	MH	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
2	427482	1068241	33.00	0.51	29.00	0.45	1.55	51.03	Limo de baja plasticidad	ML	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
3	430861	1065799	23.00	0.44	16.00	0.31	1.91	21.16	Arena-limosa	SM	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
4	433343	1067877	25.00	0.48	19.00	0.37	1.93	35.23	Limo arcilloso de baja plasticidad	CL-ML	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
5	435609	1063210	41.00	0.62	30.00	0.46	1.52	45.47	Limo de alta plasticidad	MH	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
6	437117	1067451	59.00	0.67	52.00	0.59	1.14	63.56	Limo de alta plasticidad	MH	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
7	429750	1070783	19.81	0.31	14.02	0.22	1.54	25.87	Grava mal graduada con limo y arena	GP- GM	PUNTA CARBALLO	Areniscas	SENARA, 2015
8	428872	1071381	20.69	0.26	15.38	0.20	1.27	45.73	Arena limosa con grava	SM	PUNTA CARBALLO	Areniscas	Corrales, 2017
9	426454	1070748	36.81	0.41	20.47	0.23	1.11	47.64	Limo de alta plasticidad	MH	PUNTA CARBALLO	Areniscas	Corrales, 2017
10	428262	1071685	21.39	0.25	15.37	0.18	1.18	47.09	Limo de alta plasticidad	MH	PUNTA CARBALLO	Areniscas	Corrales, 2017
11	431213	1070443	72.00	1.65	67.00	1.53	2.29	22.73	Grava-limosa	GM	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	SENARA, 2015
12	431979	1069681	41.00	0.57	38.00	0.52	1.38	45.46	Limo de alta plasticidad	MH	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	SENARA, 2015
13	433123	1061309	20.16	0.27	15.14	0.20	1.32	38.96	Arena-Limosa	SM	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	SENARA, 2015
14	434705	1068224	20.87	0.37	15.34	0.27	1.78	25.87	Arena Arcillosa	SC	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	SENARA, 2015
15	435248	1064607	39.94	0.64	21.67	0.34	1.59	41.48	Limo-elástico arenoso	MH	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	SENARA, 2015
16	435181	1070143	37.29	0.43	20.66	0.24	1.15	47.24	Arena Limosa	SM	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	Corrales, 2017
17	434688	1070271	21.54	0.26	15.39	0.18	1.19	46.15	Arcilla arenosa de baja plasticidad	CL	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	Corrales, 2017
18	433310	1072602	41.94	0.47	22.81	0.25	1.11	47.89	Limo de alta plasticidad con arena	MH	COMPLEJO NICOYA	Basaltos	Corrales, 2017
19	428328	1067238	41.00	0.60	31.00	0.45	1.46	43.19	Limo de alta plasticidad	MH	ALUVIAL	Herradura	SENARA, 2015
20	429113	1067740	38.61	0.66	21.59	0.37	1.71	18.31	Arena Arcillosa	SC	ALUVIAL	Herradura	SENARA, 2015
21	430424	1064507	23.00	0.43	21.00	0.39	1.85	40.51	Grava-limosa	GM	ALUVIAL	Jaco	SENARA, 2015
22	432664	1066216	27.00	0.47	19.00	0.33	1.73	35.13	Grava-limosa	GM	ALUVIAL	Jaco	SENARA, 2015
23	432233	1063048	39.67	0.73	20.86	0.38	1.83	32.31	Grava Limosa con Arena	GM	ALUVIAL	Jaco	SENARA, 2015
24	431776	1065355	28.18	0.46	20.62	0.33	1.62	21.94	Arena Arcillosa	SC	ALUVIAL	Jaco	SENARA, 2015

ANEXO 6 RECARGA POTENCIAL POR UNIDAD DE BALANCE AL AÑO 2019

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Areniscas, promedio al 2019

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	2060.47
Kp [0.01%]	0.07
Kv [0.01%]	0.20
Kfc [0.01%]	1
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.37
PR (mm)	2124.10
HSi (mm)	930.33
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.19

	por peso (%)	(mm)
CC	31.97	930.33
PM	24.62	716.45
(CC-PM)	7.35	213.89

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	6.21	5.00	5.00	16.10	56.38	58.44	57.69	63.95	72.98	100.50	44.03	14.59	500.86
Pi (mm)	26.50	18.13	12.94	68.64	240.35	249.14	245.93	272.61	311.12	428.44	187.69	62.20	2123.68
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	123.88	122.55	150.67	155.87	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	125.14	1630.55
HSi (mm)	885.80	831.71	795.31	766.36	780.08	890.10	930.33	930.33	930.33	930.33	930.33	930.33	
C1	0.92	0.62	0.43	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.39	0.27	0.13	0.15	0.71	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.71	
HD (mm)	195.85	133.39	91.80	118.55	303.99	422.79	459.81	486.50	525.01	642.32	401.58	276.08	
ETR (mm)	80.58	54.53	41.89	54.91	130.34	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	106.73	1268.77
HSf (mm)	831.71	795.31	766.36	780.08	890.10	930.33	930.33	930.33	930.33	930.33	930.33	885.80	
DCC (mm)	98.62	135.02	163.98	150.25	40.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.53	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.17	104.50	134.46	182.19	301.32	67.29	0.00	854.92
NR (mm)	141.92	203.04	272.76	251.21	62.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.95	994.43

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 02, promedio al 2019

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.07
Kv [0.01%]	0.20
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	2236.87
HSi (mm)	1178.41
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3…12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.19

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	1178.41
PM	27.00	863.66
(CC-PM)	9.84	314.75

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	6.21	5.00	5.00	16.10	56.38	58.44	57.69	63.95	72.98	100.50	44.03	14.59	500.86
Pi (mm)	26.50	18.13	12.94	68.64	240.35	249.14	245.93	272.61	311.12	428.44	187.69	62.20	2123.68
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	123.88	122.55	150.67	155.87	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	125.14	1630.55
HSi (mm)	1127.98	1062.54	1012.62	966.61	971.31	1087.96	1178.41	1178.41	1178.41	1178.41	1178.41	1178.41	
C1	0.92	0.69	0.51	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.56	0.42	0.27	0.28	0.62	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	
HD (mm)	290.82	217.01	161.91	171.59	348.01	473.45	560.68	587.37	625.88	743.19	502.44	376.95	
ETR (mm)	91.93	68.04	58.95	63.94	123.71	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	112.63	1318.98
HSf (mm)	1062.54	1012.62	966.61	971.31	1087.96	1178.41	1178.41	1178.41	1178.41	1178.41	1178.41	1127.98	
DCC (mm)	115.87	165.79	211.80	207.10	90.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.43	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.95	104.50	134.46	182.19	301.32	67.29	0.00	804.70
NR (mm)	147.82	220.29	303.52	299.03	119.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.95	1153.01

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 03, promedio al 2019

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.28
Kv [0.01%]	0.15
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	408.17
HSi (mm)	215.03
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	215.03
PM	27.00	157.59
(CC-PM)	9.84	57.43

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	123.88	122.55	150.67	155.87	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	125.14	1630.55
HSi (mm)	215.03	180.80	157.59	157.59	157.59	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	
C1	1.00	0.72	0.23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
HD (mm)	85.14	41.33	12.94	74.57	261.13	328.11	324.62	353.60	395.44	522.89	261.34	125.01	
ETR (mm)	61.94	41.33	12.94	74.57	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	62.57	1205.80
HSf (mm)	180.80	157.59	157.59	157.59	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	
DCC (mm)	34.23	57.43	57.43	57.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	51.03	126.93	125.76	158.01	209.07	338.34	83.51	5.00	1097.65
NR (mm)	96.17	138.65	195.17	138.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.57	631.29

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 04

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.26
Kv [0.01%]	0.14
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	368.66
HSi (mm)	194.21
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	194.21
PM	27.00	142.34
(CC-PM)	9.84	51.87

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	123.88	122.55	150.67	155.87	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	125.14	1630.55
HSi (mm)	194.21	159.98	142.34	142.34	142.34	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	
C1	1.00	0.69	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
HD (mm)	79.59	35.77	12.94	74.57	261.13	322.55	319.06	348.05	389.88	517.34	255.78	119.45	
ETR (mm)	61.94	35.77	12.94	74.57	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	62.57	1200.24
HSf (mm)	159.98	142.34	142.34	142.34	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	
DCC (mm)	34.23	51.87	51.87	51.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	56.59	126.93	125.76	158.01	209.07	338.34	83.51	5.00	1103.21
NR (mm)	96.17	138.65	189.61	133.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.57	620.17

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: acuífero Herradura, promedio al 2019

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infilta.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raices.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente (ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación (ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	432.02				
Kp [0.01%]	0.18				
Kv [0.01%]	0.14			por peso	
Kfc [0.01%]	0.83075			(%)	(mm)
I [0.01%]	1		CC	35.54	419.12
DS (g/cm^3):	1.75		PM	23.86	281.38
PR (mm)	673.88		(CC-PM)	11.68	137.74
HSi (mm)	419.12				
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3…12?	11				
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.13				

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	11.02	38.58	39.99	39.47	43.75	49.93	68.76	30.12	9.98	346.60
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	73.72	258.16	267.60	264.14	292.80	334.17	460.17	201.59	66.80	2277.94
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	123.88	122.55	150.67	155.87	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	125.14	1630.55
HSi (mm)	387.28	348.86	324.71	306.87	324.46	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	
C1	0.97	0.62	0.41	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.10	0.07	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	
HD (mm)	133.61	85.61	56.27	99.22	301.24	405.34	401.89	430.55	471.91	597.91	339.33	204.55	
ETR (mm)	66.13	42.29	30.77	56.14	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	98.64	1246.41
HSf (mm)	348.86	324.71	306.87	324.46	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	387.28	
DCC (mm)	70.26	94.41	112.25	94.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.84	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	10.83	123.85	122.72	154.65	205.23	333.05	81.19	0.00	1031.53
NR (mm)	128.01	174.67	232.15	194.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.34	787.56

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: acuífero Jacó, promedio al 2019

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1041.84
Kp [0.01%]	0.17
Kv [0.01%]	0.13
Kfc [0.01%]	0.97187
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.76
PR (mm)	509.17
HSi (mm)	264.00
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	29.46	264.00
PM	20.37	182.54
(CC-PM)	9.09	81.46

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	123.88	122.55	150.67	155.87	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	125.14	1630.55
HSi (mm)	250.65	216.42	195.43	184.49	185.85	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	
C1	1.00	0.64	0.32	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.29	
HD (mm)	95.82	52.01	25.83	76.51	264.43	352.13	348.64	377.63	419.47	546.92	285.37	149.03	
ETR (mm)	61.94	39.12	23.89	73.20	152.66	143.74	141.42	138.16	128.94	127.12	120.40	80.92	1231.51
HSf (mm)	216.42	195.43	184.49	185.85	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	250.65	
DCC (mm)	47.58	68.57	79.52	78.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.35	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	30.31	126.93	125.76	158.01	209.07	338.34	83.51	0.00	1071.94
NR (mm)	109.52	151.99	206.30	160.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.57	686.21

ANEXO 7 RECARGA POTENCIAL POR UNIDAD DE BALANCE PARA EL ESCENARIO DEL AÑO 2080

BALANCE HIDRICO DE SUELOS
Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Areniscas, escenerio al año 2080
Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infilta.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raices.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente (ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación (ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	2060.47
Kp [0.01%]	0.07
Kv [0.01%]	0.20
Kfc [0.01%]	1
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.37
PR (mm)	2124.10
HSi (mm)	930.33
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.19

	por peso (%)	(mm)
CC	31.97	930.33
PM	24.62	716.45
(CC-PM)	7.35	213.89

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	6.21	5.00	5.00	16.10	56.38	58.44	57.69	63.95	72.98	100.50	44.03	14.59	500.86
Pi (mm)	26.50	18.13	12.94	68.64	240.35	249.14	245.93	272.61	311.12	428.44	187.69	62.20	2123.68
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	198.85	218.05	251.09	285.18	252.17	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	200.88	2777.05
HSi (mm)	855.55	799.66	766.13	742.31	747.95	850.61	895.53	914.18	930.33	930.33	930.33	928.02	
C1	0.77	0.47	0.29	0.44	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.05	0.00	0.00	0.00	0.09	0.59	0.82	1.00	1.00	1.00	0.98	0.34	
HD (mm)	165.60	101.34	62.62	94.50	271.86	383.31	425.01	470.34	525.01	642.32	401.58	273.78	
ETR (mm)	82.39	51.66	36.76	63.00	137.69	204.23	227.28	243.41	226.04	203.31	190.00	134.67	1800.43
HSf (mm)	799.66	766.13	742.31	747.95	850.61	895.53	914.18	930.33	930.33	930.33	928.02	855.55	
DCC (mm)	130.68	164.20	188.02	182.39	79.72	34.80	16.15	0.00	0.00	0.00	2.31	74.78	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.05	85.08	225.13	0.00	0.00	323.25
NR (mm)	247.13	330.60	402.36	404.57	194.20	86.77	38.87	0.00	0.00	0.00	4.18	140.99	1849.68

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 02, escenario al año 2080

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.07
Kv [0.01%]	0.20
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	2236.87
HSi (mm)	1178.41
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.19

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	1178.41
PM	27.00	863.66
(CC-PM)	9.84	314.75

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	6.21	5.00	5.00	16.10	56.38	58.44	57.69	63.95	72.98	100.50	44.03	14.59	500.86
Pi (mm)	26.50	18.13	12.94	68.64	240.35	249.14	245.93	272.61	311.12	428.44	187.69	62.20	2123.68
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	198.85	218.05	251.09	285.18	252.17	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	200.88	2777.05
HSi (mm)	1082.00	1002.68	949.65	915.14	924.25	1020.08	1080.33	1116.83	1158.55	1178.41	1178.41	1175.50	
C1	0.78	0.50	0.31	0.38	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.29	0.15	0.06	0.04	0.19	0.47	0.68	0.90	1.00	1.00	0.99	0.55	
HD (mm)	244.84	157.15	98.93	120.13	300.95	405.57	462.61	525.79	606.02	743.19	502.44	374.04	
ETR (mm)	105.82	71.16	47.44	59.53	144.53	188.89	209.43	230.89	226.04	203.31	190.60	155.70	1833.34
HSf (mm)	1002.68	949.65	915.14	924.25	1020.08	1080.33	1116.83	1158.55	1178.41	1178.41	1175.50	1082.00	
DCC (mm)	175.73	228.76	263.27	254.16	158.33	98.08	61.58	19.86	0.00	0.00	2.91	96.41	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.22	225.13	0.00	0.00	290.35
NR (mm)	268.76	375.66	466.92	479.81	265.97	165.38	102.14	32.38	0.00	0.00	4.18	141.59	2302.80

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 03, escenario al año 2080

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.28
Kv [0.01%]	0.15
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	408.17
HSi (mm)	215.03
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	215.03
PM	27.00	157.59
(CC-PM)	9.84	57.43

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	198.85	218.05	251.09	285.18	252.17	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	200.88	2777.05
HSi (mm)	182.16	157.59	157.59	157.59	157.59	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	
C1	0.91	0.32	0.23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
HD (mm)	52.28	18.13	12.94	74.57	261.13	328.11	324.62	353.60	395.44	522.89	261.34	125.01	
ETR (mm)	52.28	18.13	12.94	74.57	145.75	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	100.44	1774.93
HSf (mm)	157.59	157.59	157.59	157.59	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	182.16	
DCC (mm)	57.43	57.43	57.43	57.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.87	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	57.94	14.48	17.19	52.76	111.97	262.15	12.04	0.00	528.52
NR (mm)	204.00	257.36	295.59	268.05	106.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	133.30	1264.72

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 04, escenario al año 2080

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.26
Kv [0.01%]	0.14
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	368.66
HSi (mm)	194.21
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	194.21
PM	27.00	142.34
(CC-PM)	9.84	51.87

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	198.85	218.05	251.09	285.18	252.17	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	200.88	2777.05
HSi (mm)	161.35	142.34	142.34	142.34	142.34	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	
C1	0.90	0.35	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
HD (mm)	46.72	18.13	12.94	74.57	261.13	322.55	319.06	348.05	389.88	517.34	255.78	119.45	
ETR (mm)	46.72	18.13	12.94	74.57	147.85	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	100.44	1771.48
HSf (mm)	142.34	142.34	142.34	142.34	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	161.35	
DCC (mm)	51.87	51.87	51.87	51.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.87	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	61.40	14.48	17.19	52.76	111.97	262.15	12.04	0.00	531.97
NR (mm)	204.00	251.80	290.03	262.49	104.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	133.30	1245.94

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: acuífero Herradura, escenario al año 2080

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	432.02		
Kp [0.01%]	0.18		
Kv [0.01%]	0.14	por peso	
Kfc [0.01%]	0.83075	(%)	(mm)
I [0.01%]	1	CC 35.54	419.12
DS (g/cm^3):	1.75	PM 23.86	281.38
PR (mm)	673.88	(CC-PM) 11.68	137.74
HSi (mm)	419.12		
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11		
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.13		

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	11.02	38.58	39.99	39.47	43.75	49.93	68.76	30.12	9.98	346.60
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	73.72	258.16	267.60	264.14	292.80	334.17	460.17	201.59	66.80	2277.94
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	198.85	218.05	251.09	285.18	252.17	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	200.88	2777.05
HSi (mm)	382.81	317.30	292.65	283.52	281.38	407.97	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	
C1	0.94	0.39	0.18	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.03	
HD (mm)	129.14	54.05	24.21	75.87	258.16	394.19	401.89	430.55	471.91	597.91	339.33	204.55	
ETR (mm)	93.22	42.79	22.06	75.87	131.57	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	103.11	1839.44
HSf (mm)	317.30	292.65	283.52	281.38	407.97	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	382.81	
DCC (mm)	101.82	126.47	135.60	137.74	11.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.31	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	14.15	49.39	108.13	256.86	9.72	0.00	438.50
NR (mm)	207.45	301.74	364.63	347.06	131.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	134.07	1486.70

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: acuífero Jacó, escenario al año 2080

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infilta.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raices.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente (ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación (ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1041.84				
Kp [0.01%]	0.17				
Kv [0.01%]	0.13			por peso	
Kfc [0.01%]	0.97187			(%)	(mm)
I [0.01%]	1		CC	29.46	264.00
DS (g/cm^3):	1.76		PM	20.37	182.54
PR (mm)	509.17		(CC-PM)	9.09	81.46
HSi (mm)	264.00				
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11				
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12				

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	198.85	218.05	251.09	285.18	252.17	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	200.88	2777.05
HSi (mm)	231.14	182.54	182.54	182.54	182.54	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	
C1	0.94	0.22	0.16	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
HD (mm)	76.30	18.13	12.94	74.57	261.13	352.13	348.64	377.63	419.47	546.92	285.37	149.03	
ETR (mm)	76.30	18.13	12.94	74.57	139.95	256.19	249.99	243.41	226.04	203.31	191.87	100.44	1793.16
HSf (mm)	182.54	182.54	182.54	182.54	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	231.14	
DCC (mm)	81.46	81.46	81.46	81.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.87	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	39.72	14.48	17.19	52.76	111.97	262.15	12.04	0.00	510.30
NR (mm)	204.00	281.39	319.61	292.07	112.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	133.30	1342.60

ANEXO 8 RECARGA POTENCIAL POR UNIDAD DE BALANCE PARA EL ESCENARIO DEL AÑO 2099

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Areniscas, escenario al año 2099

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	2060.47
Kp [0.01%]	0.07
Kv [0.01%]	0.20
Kfc [0.01%]	1
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.37
PR (mm)	2124.10
HSi (mm)	930.33
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.19

	por peso (%)	(mm)
CC	31.97	930.33
PM	24.62	716.45
(CC-PM)	7.35	213.89

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	6.21	5.00	5.00	16.10	56.38	58.44	57.69	63.95	72.98	100.50	44.03	14.59	500.86
Pi (mm)	26.50	18.13	12.94	68.64	240.35	249.14	245.93	272.61	311.12	428.44	187.69	62.20	2123.68
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	236.86	237.52	297.35	309.93	299.03	279.02	322.30	314.07	246.53	242.31	228.82	239.28	3253.00
HSi (mm)	843.87	785.14	755.06	732.17	739.69	830.53	885.24	900.38	911.35	930.33	930.33	911.20	
C1	0.72	0.41	0.24	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.43	0.67	1.00	1.00	0.81	0.08	
HD (mm)	153.92	86.82	51.56	84.36	263.59	363.22	414.72	456.55	506.03	642.32	401.58	256.95	
ETR (mm)	85.23	48.21	35.84	61.12	149.51	194.43	230.78	261.64	246.53	242.31	206.82	129.53	1891.95
HSf (mm)	785.14	755.06	732.17	739.69	830.53	885.24	900.38	911.35	930.33	930.33	911.20	843.87	
DCC (mm)	145.19	175.27	198.17	190.65	99.81	45.10	29.95	18.98	0.00	0.00	19.13	86.46	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.62	186.12	0.00	0.00	231.74
NR (mm)	296.82	364.58	459.68	439.45	249.32	129.68	121.47	71.41	0.00	0.00	41.13	196.21	2369.75

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 02, escenario al año 2099

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.07
Kv [0.01%]	0.20
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	2236.87
HSi (mm)	1178.41
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.19

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	1178.41
PM	27.00	863.66
(CC-PM)	9.84	314.75

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	6.21	5.00	5.00	16.10	56.38	58.44	57.69	63.95	72.98	100.50	44.03	14.59	500.86
Pi (mm)	26.50	18.13	12.94	68.64	240.35	249.14	245.93	272.61	311.12	428.44	187.69	62.20	2123.68
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	236.86	237.52	297.35	309.93	299.03	279.02	322.30	314.07	246.53	242.31	228.82	239.28	3253.00
HSi (mm)	1052.41	977.87	933.81	905.33	918.83	1011.79	1069.00	1087.75	1112.21	1177.43	1178.41	1152.23	
C1	0.68	0.42	0.26	0.35	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.17	0.10	0.01	0.01	0.05	0.38	0.41	0.58	0.99	1.00	0.87	0.35	
HD (mm)	215.25	132.34	83.10	110.31	295.53	397.27	451.28	496.70	559.67	742.21	502.44	350.77	
ETR (mm)	101.03	62.19	41.42	55.14	147.39	191.92	227.18	248.15	245.90	242.31	213.87	162.02	1938.54
HSf (mm)	977.87	933.81	905.33	918.83	1011.79	1069.00	1087.75	1112.21	1177.43	1178.41	1152.23	1052.41	
DCC (mm)	200.54	244.60	273.08	259.58	166.62	109.41	90.66	66.20	0.98	0.00	26.18	126.00	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	185.14	0.00	0.00	185.14
NR (mm)	336.36	419.92	529.00	514.37	318.26	196.50	185.78	132.12	1.61	0.00	41.13	203.26	2878.31

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 03, escenario al año 2099

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.28
Kv [0.01%]	0.15
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	408.17
HSi (mm)	215.03
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	215.03
PM	27.00	157.59
(CC-PM)	9.84	57.43

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	236.86	237.52	297.35	309.93	299.03	279.02	322.30	314.07	246.53	242.31	228.82	239.28	3253.00
HSi (mm)	162.96	157.59	157.59	157.59	157.59	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	
C1	0.58	0.32	0.23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.04	0.69	1.00	1.00	0.57	0.00	
HD (mm)	33.08	18.13	12.94	74.57	261.13	328.11	324.62	353.60	395.44	522.89	261.34	125.01	
ETR (mm)	33.08	18.13	12.94	74.57	149.51	258.74	167.65	265.13	246.53	242.31	179.20	119.64	1767.44
HSf (mm)	157.59	157.59	157.59	157.59	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	215.03	162.96	
DCC (mm)	57.43	57.43	57.43	57.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.07	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	54.18	11.93	99.53	31.04	91.48	223.15	24.71	0.00	536.02
NR (mm)	261.21	276.82	341.84	292.79	149.51	20.28	154.65	48.94	0.00	0.00	49.62	171.70	1767.37

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: Basaltos 04, escenario al año 2099

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1421.51
Kp [0.01%]	0.26
Kv [0.01%]	0.14
Kfc [0.01%]	0.99637
I [0.01%]	1
DS (g/cm^3):	1.43
PR (mm)	368.66
HSi (mm)	194.21
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso (%)	(mm)
CC	36.84	194.21
PM	27.00	142.34
(CC-PM)	9.84	51.87

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	236.86	237.52	297.35	309.93	299.03	279.02	322.30	314.07	246.53	242.31	228.82	239.28	3253.00
HSi (mm)	142.34	142.34	142.34	142.34	142.34	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	
C1	0.53	0.35	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.00	0.65	1.00	1.00	0.52	0.00	
HD (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	322.55	319.06	348.05	389.88	517.34	255.78	119.45	
ETR (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	149.51	256.57	161.15	259.89	246.53	242.31	173.88	119.45	1742.64
HSf (mm)	142.34	142.34	142.34	142.34	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	194.21	142.34	
DCC (mm)	51.87	51.87	51.87	51.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.87	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	59.74	14.10	106.03	36.28	91.48	223.15	30.03	0.00	560.81
NR (mm)	261.02	271.26	336.28	287.23	149.51	22.45	161.15	54.18	0.00	0.00	54.94	171.70	1769.74

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: acuífero Herradura, escenario al año 2099

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.
I: Infiltración.
CC: Capacidad de Campo.
PM: Punto de Marchitez.
PR: Profundidad de Raices.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.
DS: Densidad de Suelo.
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR
Kp: Factor por pendiente (ver léame)
Kv: Factor por vegetación (ver léame)
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.
Pi: Precipitación que infilta.
ESC: Escorrentía Superficial
ETP: Evapotranspiración Potencial.
ETR: Evapotranspiración Real.
HSi: Humedad de Suelo Inicial.
HD: Humedad Disponible
HSf: Humedad de Suelo Final.
DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Rp: Recarga Potencial
NR: Necesidad de Riego.
Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	432.02					
Kp [0.01%]	0.18					
Kv [0.01%]	0.14				por peso	
Kfc [0.01%]	0.83075				(%)	(mm)
I [0.01%]	1			CC	35.54	419.12
DS (g/cm^3):	1.75			PM	23.86	281.38
PR (mm)	673.88			(CC-PM)	11.68	137.74
HSi (mm)	419.12					
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11					
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.13					

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	11.02	38.58	39.99	39.47	43.75	49.93	68.76	30.12	9.98	346.60
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	73.72	258.16	267.60	264.14	292.80	334.17	460.17	201.59	66.80	2277.94
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	236.86	237.52	297.35	309.93	299.03	279.02	322.30	314.07	246.53	242.31	228.82	239.28	3253.00
HSi (mm)	361.67	296.52	285.96	281.38	281.38	390.02	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	414.51	
C1	0.78	0.24	0.13	0.54	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.58	0.85	1.00	1.00	0.80	0.00	
HD (mm)	108.01	33.27	17.52	73.72	258.16	376.24	401.89	430.55	471.91	597.91	339.33	199.93	
ETR (mm)	92.86	28.69	17.52	73.72	149.51	237.98	254.26	289.83	246.53	242.31	206.20	119.64	1959.06
HSf (mm)	296.52	285.96	281.38	281.38	390.02	419.12	419.12	419.12	419.12	419.12	414.51	361.67	
DCC (mm)	122.60	133.16	137.74	137.74	29.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.61	57.45	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	9.88	2.98	87.64	217.86	0.00	0.00	318.88
NR (mm)	266.59	341.99	417.56	373.94	178.61	41.04	68.04	24.24	0.00	0.00	27.23	177.08	1916.32

BALANCE HIDRICO DE SUELOS

Gunther Schosinsky

Zona de Estudio: acuífero Jacó, escenario al año 2099

Fecha: feb-21

Textura de Suelo:

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infilta.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raices.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente (ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación (ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	1041.84			
Kp [0.01%]	0.17			
Kv [0.01%]	0.13		por peso	
Kfc [0.01%]	0.97187		(%)	(mm)
I [0.01%]	1	CC	29.46	264.00
DS (g/cm^3):	1.76	PM	20.37	182.54
PR (mm)	509.17	(CC-PM)	9.09	81.46
HSi (mm)	264.00			
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11			
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12			

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	32.71	23.13	17.94	84.74	296.73	307.58	303.61	336.56	384.10	528.93	231.72	76.79	2624.54
Ret [mm]	5.00	5.00	5.00	10.17	35.61	36.91	36.43	40.39	46.09	63.47	27.81	9.21	321.09
Pi (mm)	27.71	18.13	12.94	74.57	261.13	270.67	267.18	296.17	338.01	465.46	203.91	67.57	2303.45
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	236.86	237.52	297.35	309.93	299.03	279.02	322.30	314.07	246.53	242.31	228.82	239.28	3253.00
HSi (mm)	211.94	182.54	182.54	182.54	182.54	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	
C1	0.70	0.22	0.16	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.32	0.78	1.00	1.00	0.69	0.00	
HD (mm)	57.10	18.13	12.94	74.57	261.13	352.13	348.64	377.63	419.47	546.92	285.37	149.03	
ETR (mm)	57.10	18.13	12.94	74.57	149.51	264.72	213.26	279.57	246.53	242.31	193.83	119.64	1872.12
HSf (mm)	182.54	182.54	182.54	182.54	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	264.00	211.94	
DCC (mm)	81.46	81.46	81.46	81.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.07	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	30.15	5.95	53.92	16.61	91.48	223.15	10.08	0.00	431.33
NR (mm)	261.21	300.85	365.87	316.82	149.51	14.30	109.04	34.50	0.00	0.00	34.99	171.70	1758.78