



SENARA

SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN HÍDRICA

**ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCAS
DIRIÁ, ANDAMOJO Y NIMBOYORES.
SANTA CRUZ, GUANACASTE.**

INFORME FINAL

Elaborado por
Hidrogeól. Hugo V Rodríguez Estrada
Mediante la Contratación Directa No. 2009CD-000149-OC
“Contratación de servicios profesionales en Hidrogeología”

Administrador de la Contratación en SENARA
Hidrogeól. Roberto Ramírez Chavarría
Dirección de Investigación y Gestión Hídrica

Agosto, 2010

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	UBICACIÓN GENERAL DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO.....	4
3.	METODOLOGÍA DE TRABAJO, ACTIVIDADES REALIZADAS	4
4.	CUENCA DIRIÁ	6
4.1	Geomorfología	6
4.1.1	Serranías y cerros residuales y denudacionales.....	6
4.1.2	Llanura aluvial.....	7
4.1.3	Coluvios	7
4.2	Marco geológico.....	7
4.2.1	Formación Complejo de Nicoya	7
4.2.2	Unidad de coluvio	7
4.2.3	Depósitos aluviales cuaternarios	8
4.3	Condiciones hidrogeológicas	8
4.3.1	Presencia de acuíferos	8
4.3.2	Presencia de pozos	8
4.3.3	Niveles de agua subterránea y direcciones de flujo	8
4.3.4	Parámetros hidráulicos de los acuíferos	9
4.4	Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.....	9
4.4.1	Grado de confinamiento hidráulico.....	10
4.4.2	Tipo de material de cobertura (Ocurrencia del sustrato).....	10
4.4.3	Profundidad al nivel estático	11
4.4.4	Mapa de vulnerabilidad integrado.....	11
4.5	Calidad del agua y evidencias de contaminación.....	11
4.6	Cálculos de la recarga a los acuíferos	14
4.6.1	Cálculo de la precipitación que infiltra	14
4.6.2	Balance de humedad de suelos y cálculo de la recarga.....	20
4.7	Estimación de la extracción actual y balance de aguas.....	21
5.	CUENCA DEL RÍO ANDAMOJO	23
5.1	Geomorfología	23
5.1.1	Llanura aluvial.....	23
5.1.2	Coluvios	23
5.1.3	Serranías y suelos residuales y denudacionales	24
5.1.4	Meseta estructural	24
5.2	Marco geológico.....	24
5.3	Condiciones hidrogeológicas	24
5.3.1	Presencia de acuíferos	24
5.3.2	Presencia de pozos	24
5.3.3	Niveles de agua subterránea y direcciones de flujo	25
5.4	Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.....	25
5.5	Calidad del agua y evidencias de contaminación.....	26
5.6	Cálculos de la recarga a los acuíferos	27
5.6.1	Cálculo de la precipitación que infiltra	27
5.6.2	Balance de humedad de suelos y cálculo de la recarga.....	30
5.7	Estimación de la extracción actual y balance de aguas.....	31
6.	CUENCA DEL RÍO NIMBOYORES	31

6.1 Vulnerabilidad acuífera a la contaminación.....	31
6.2 Calidad del agua subterránea e indicios de contaminación.....	32
7. CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES	33
REFERENCIAS	36



SENARA

**SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN HÍDRICA**

ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCAS DIRIÁ, ANDAMOJO Y NIMBOYORES. SANTA CRUZ, GUANACASTE.

1. INTRODUCCIÓN

El presente es el informe técnico final de una serie de estudios hidrogeológicos llevados a cabo en las cuencas de los ríos Diríá, Andamojo y Nimboyores, todas localizadas en el cantón de Santa Cruz, provincia de Guanacaste.

El trabajo se hizo mediante la Contratación Directa No. 2009CD-000149-OC “Contratación de servicios profesionales en Hidrogeología” y el objetivo primordial fue el de realizar estudios y análisis, y generar información y documentos que el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) requiera para el desarrollo de sus funciones desde la perspectiva de las aguas subterráneas en las zonas comprendidas en el estudio.

2. UBICACIÓN GENERAL DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Dos de las cuencas de estudio se localizan en la Península de Nicoya. La del río Diríá está en su parte norte y central y la del Andamojo en el lado oeste colindando con el océano Pacífico. La cuenca del río Nimboyores se encuentra ligeramente al norte de esa península. La figura 2.1 muestra la ubicación general de estas zonas de estudio.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO, ACTIVIDADES REALIZADAS

Para desarrollar el presente estudio se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Análisis de la información existente. Principalmente se recolectó la información de los archivos del SENARA.
- Giras de campo para recolectar información específica en cada una de las cuencas. Entre los aspectos considerados se incluyó geología, ejecución de pruebas de infiltración in situ, muestreo de suelos, muestreo de agua en pozos seleccionados, y observaciones de la cobertura vegetal y sus características relevantes.
- Análisis de laboratorio de suelos para determinar porosidad, gravedad específica, capacidad de campo y punto de marchitez.

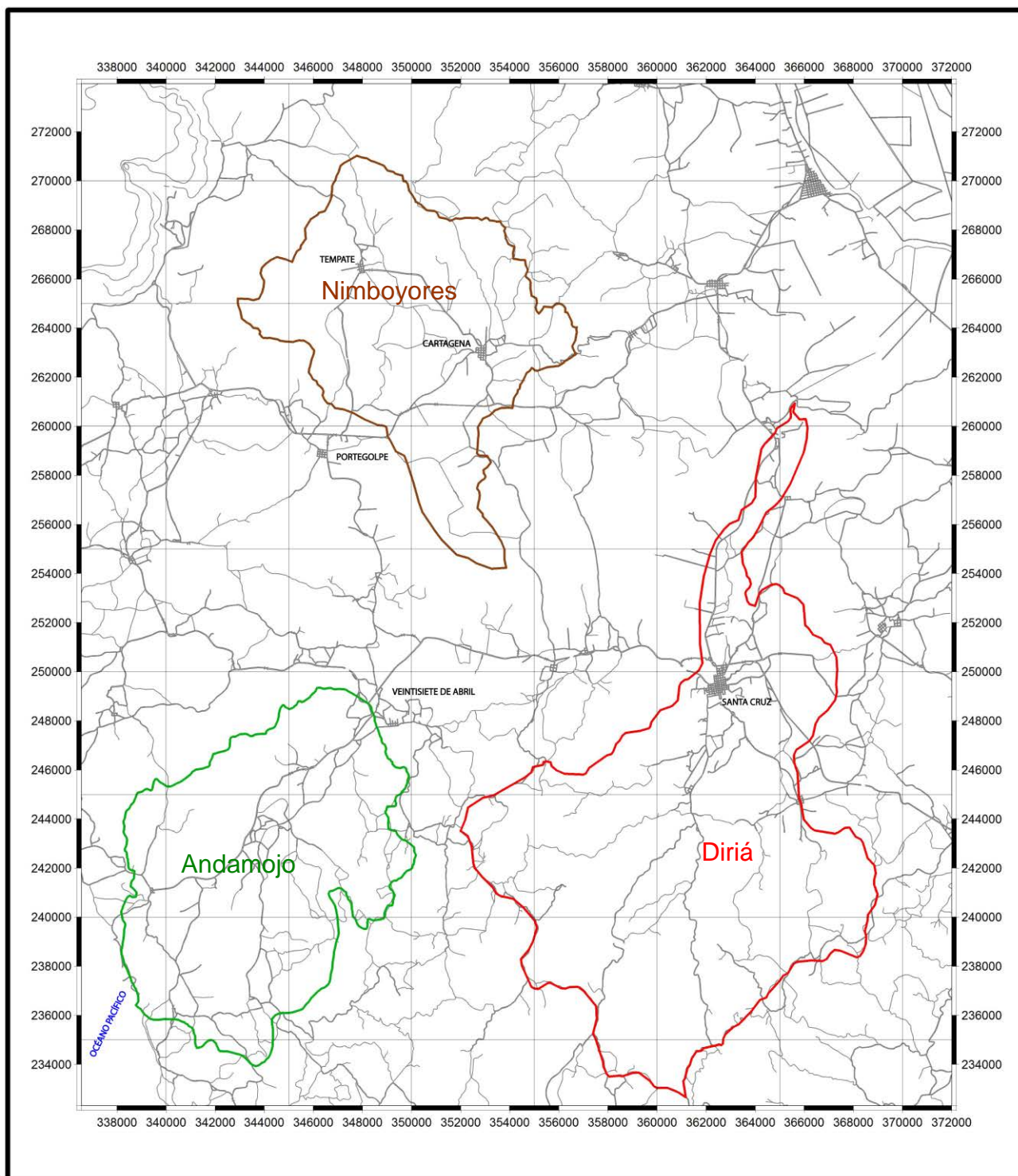


Figura 2.1 – Ubicación relativa de las tres cuencas de estudio
Mapas base: Matapalo, Belén, Villarreal, Diría, Marbella y Cerro Brujo.
Escala aprox. 1:250000

- Análisis de laboratorio de aguas de pozos considerando aspectos físico químicos y bacteriológicos.
- Generación de mapas en oficina. Entre ellos mapas de pendientes, tipo de cobertura vegetal, líneas isofreáticas, factores para el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación, mapas de vulnerabilidad, mapas de ubicación de pozos, sitios de muestreo, zonificación del suelo según sus características hidráulicas, sectores de recarga.
- Cálculos de la recarga potencial.
- Análisis, interpretación e integración de los resultados y preparación del presente informe técnico.

El personal relacionado directamente con este trabajo estuvo integrado de la siguiente manera:

- Hidrogeól. Roberto Ramírez Chavarría: designado por el SENARA como Administrador de la Contratación, con quien se tuvieron reuniones de coordinación y de entrega de informes de avance.
- Mauricio A. Zúñiga Calderón: manejo del sistema de información geográfica (SIG) utilizado para el procesamiento e interacción de la información cartográfica, recopilación de información, trabajo de campo.
- Carlos F. Orozco Sancho: asistencia de campo.
- Hidrogeól. Hugo V. Rodríguez E: ejecutor y responsable del estudio.

A continuación se presentan los trabajos y resultados correspondientes a cada cuenca individual.

4. CUENCA DIRIÁ

4.1 Geomorfología

El reconocimiento de las unidades geomorfológicas en un estudio como el presente radica principalmente en que estas unidades presentan características hidráulicas propias en su superficie. De esta manera, las unidades geomorfológicas pueden ser consideradas como unidades de trabajo en lo que se refiere al comportamiento hidráulico de los suelos.

En la cuenca del río Dirá se han diferenciado tres unidades geomorfológicas, cuya distribución se puede ver en el mapa de la figura 4.1. Las principales características de estas unidades se comentan a continuación.

4.1.1 Serranías y cerros residuales y denudacionales

Corresponde con los cerros y sectores montañosos de mayor elevación que se encuentran predominantemente en la mitad sur de la cuenca, además de algunos cerros menores que se pueden ver en el borde noreste de la misma. Son terrenos formados por la erosión de las rocas que constituyen estas áreas y muestran una fuerte pendiente. Como se verá en la descripción geológica, son sectores constituidos casi en su totalidad por rocas volcánicas del Complejo de Nicoya.

4.1.2 Llanura aluvial

Al contrario de las serranías y cerros denudacionales, esta unidad está originada por la depositación de sedimentos a causa de las crecidas históricas de los ríos. Forman la parte baja y de suave pendiente que ocupa cerca del 40% de la parte norte de la cuenca.

4.1.3 Coluvios

Formados por la depositación de materiales que forman los cerros y arrastrados hasta los pies de las serranías principalmente por acción de la gravedad y de la escorrentía superficial que se da sobre la superficie de estos cerros durante los eventos de lluvia más intensos. Tienen una pendiente de media a alta y su ocurrencia dentro de la cuenca es bastante reducida.

4.2 Marco geológico

Se distinguen tres unidades rocosas en la cuenca del río Diríá, que mencionadas en orden cronológico son Formación Complejo de Nicoya, Coluvio y Depósitos Fluviales Cuaternarios. La figura 4.2 es un mapa geológico que presenta la distribución de estas unidades, cuyas principales características se comentan en los siguientes párrafos.

4.2.1 Formación Complejo de Nicoya

Según lo indica Alvarado (1984), fue denominada así por los geólogos de la Compañía Petrolera de Costa Rica al referirse a las rocas más antiguas que afloran en la península de Nicoya (en Dengo, 1962). Esta última fuente de información le asigna una edad de Jurásico a Cretácico.

En el área de estudio está representada por basaltos originados en erupciones submarinas que hoy ocupan las áreas de cerros, con mayor elevación y relieve más abrupto. En general son rocas sanas, de una coloración gris oscuro, en las que difícilmente se pueden diferenciar cristales. Aunque la formación en sí consta de un basamento rocoso denso y relativamente sano, se puede observar de manera muy común un horizonte superior más meteorizado y fracturado que muestra espesores de hasta 5 o más metros que está sobre la masa rocosa densa y más sana. Esta condición tiene importancia desde el punto de vista hidrogeológico y será retomada más adelante. Sobre este horizonte más fracturado se encuentra en la mayoría de las localidades una capa de suelo residual cuyo espesor es variable, alcanzando en ocasiones espesores de hasta tres metros.

4.2.2 Unidad de coluvio

Como se comentó, está originada por procesos de acumulación de fragmentos provenientes de las serranías, y por esta razón se localizan al pie de las mismas. Está formado por una mezcla de limos, arcillas, materiales arenosos y fragmentos rocosos de tamaño heterogéneo, todo prácticamente sin ningún grado de cementación.

4.2.3 Depósitos aluviales cuaternarios

Coincide con la unidad geomorfológica identificada como Llanura Aluvial. Está constituida por capas de gravas, arenas, limos y arcillas dispuestas de manera lenticular más que en capas continuas. Sin embargo, prácticamente en la totalidad del área se presenta un suelo limo arcilloso a limo arenoso en la superficie. Sobreyace a un basamento de basaltos y su espesor es variable ya que muy probablemente ha sido depositada sobre una superficie irregular pre existente. El espesor máximo encontrado según la información brindada por los pozos construidos en el lugar es del orden de los 40 metros

4.3 Condiciones hidrogeológicas

4.3.1 Presencia de acuíferos

En la cuenca del río Dirιά existen acuíferos en la unidad de depósitos aluviales cuaternarios y en la formación de basaltos. El acuífero constituido en los aluviones es el principal de ambos, dada su capacidad de brindar caudales más altos. Por ejemplo, se tiene el caso de pozos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en donde se tiene una producción máxima de 30 l/s (AyA, comunicación verbal, agosto 2010).

El acuífero formado en los basaltos de la formación Complejo de Nicoya está limitado a los horizontes superiores de estas rocas, que como se mencionó, se encuentran ligeramente meteorizados, lo que produce la aparición de fracturas y de una mayor permeabilidad. Aún bajo estas condiciones, los caudales máximos reportados en pozos que captan este acuífero sin captar los aluviones llegan a un máximo reportado del orden de los 3 l/s.

4.3.2 Presencia de pozos

De acuerdo con los archivos de pozos del SENARA, se cuenta con 41 pozos registrados en esta cuenca que cuentan con información litológica. Los usos del agua que se extrae a través de ellos son principalmente abastecimiento público y doméstico, y en menor grado riego e industrial.

El Anexo 1 de este informe contiene la información disponible de los pozos según los archivos del SENARA. Entre los datos se encuentra el número de identificación del pozo, coordenadas, propietario, profundidad, uso, litología, caudal reportado y profundidad al nivel del agua. No en todos los pozos se cuenta con la información completa.

La ubicación de estas perforaciones se muestra en el mapa de la figura 4.3, el cual también contiene otros rasgos que se irán comentando en su momento.

4.3.3 Niveles de agua subterránea y direcciones de flujo

La profundidad al nivel del agua subterránea está en el rango de 2 a 20 metros, aunque predomina el rango de 2 a 10 metros. La profundidad al agua es menor en aquellos sectores ubicados en la parte más plana y de menor elevación de la cuenca, ocupando el sector ubicado al noreste de la ciudad de Santa Cruz y la parte norte de la cuenca. Más adelante, en el sub capítulo 4.4 se hará referencia

nuevamente a este tema desde la perspectiva de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.

En relación con la dirección del flujo subterráneo, la figura 4.3 es un mapa de líneas isofreáticas construido a partir de los datos recolectados. Para construir estas líneas se tomó la profundidad al nivel estático mencionado en el Anexo 1 y se correlacionó con la elevación del terreno, obtenida de mapas existentes y de esta manera se calculó la cota del nivel estático en cada pozo. No se dibujaron líneas isofreáticas en aquellos sitios en los que la densidad de información no era considerada adecuada como para llevar a cabo extrapolaciones de una manera razonablemente representativa. Solamente se logró dibujar estas líneas en el sector de la ciudad de Santa Cruz y el sector localizado al este de la misma, que es donde existe mayor densidad de pozos.

Puede verse que las líneas isofreáticas indican una dirección general del agua subterránea de sur a norte, siguiendo a grandes rasgos la pendiente general del terreno. Se puede apreciar que hay cierta distorsión de las isofreáticas en las cercanías de los ríos, indicando que estos ríos se comportan de una manera efluente.

El gradiente hidráulico medio calculado entre las isofreáticas de 55 msnm (metros sobre el nivel del mar) y 40 msnm es de $15/1714 = 0.009$ ó 0.9%

4.3.4 Parámetros hidráulicos de los acuíferos

Se cuenta con la información de pruebas de bombeo en pozos que penetran el acuífero aluvial. Específicamente se trata de una prueba ejecutada en diciembre de 1989 (Rodríguez, 1990) en el pozo conocido como No.2 del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ubicado en su plantel de Santa Cruz y una prueba de bombeo llevada a cabo en el mismo plantel en un pozo construido en noviembre de 1990 y que ocupa la sigla DI-223 en los archivos del SENARA (Rodríguez, 1990 b).

De acuerdo con esa fuente de información, en la prueba de bombeo de diciembre de 1989 se determinó un valor de transmisividad de $1260 \text{ m}^2/\text{d}$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.055, y en la prueba del pozo DI-223 se calculó una transmisividad de $2100 \text{ m}^2/\text{d}$, y al no detectarse ningún abatimiento en un pozo de observación ubicado a 100 m no fue posible determinar el coeficiente de almacenamiento.

El pozo DI-223 capta directamente una capa de grava y arena de 8.5 m de espesor ubicada entre 29 y 37.5 m a la que se enfrentó la rejilla. Además hay otra capa de gravas de 5 m de espesor ubicada entre 10 y 15 m que debe estar aportando agua indirectamente a través del empaque de grava. Si se considera como espesor acuífero la suma de estas dos capas se tendría un total de 13.5 m, que con la transmisividad determinada representa una permeabilidad media de 155 m/d.

4.4 Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

A fin de contar con un mapa de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se hizo uso del método conocido como G.O.D. (Foster y otros, 2002) para zonificar la cuenca bajo este punto de vista. En términos generales, este método considera tres factores: el grado de confinamiento hidráulico, el tipo de material de cobertura del acuífero u ocurrencia del sustrato y la profundidad al

nivel estático. A cada uno de esos factores se asigna un sub índice y el índice total de vulnerabilidad resulta del producto de esos sub índices. Con base en ese índice resultante se asigna una categoría de vulnerabilidad.

En el presente estudio se preparó un mapa para cada uno de esos factores y el índice de vulnerabilidad resultante se obtuvo mediante la multiplicación de esos tres mapas utilizando un sistema de información geográfica (SIG). Los datos básicos para la preparación de los mismos fueron tomados mayoritariamente de la información de los pozos contenida en los archivos del SENARA (Anexo 1), los cuales fueron complementados con observaciones de campo hechas durante las giras por el área. A continuación se hacen los comentarios de cada uno de esos mapas.

4.4.1 Grado de confinamiento hidráulico

El mapa correspondiente ocupa la figura 4.4. Se asignó un carácter de “Confinado” (factor 0.2) en aquellos sitios en los que existe una capa arcillosa relativamente plástica cuya base se encuentra a mayor profundidad que el nivel estático. Solo se identificó una reducida extensión al sureste de la ciudad de Santa Cruz.

La categoría “no confinado cubierto” (factor 0.6) se asignó a los sectores en los que el material de la zona no saturada puede producir cierto retardo en la infiltración, tal como sitios con una capa superficial de suelo, limos arenosos, y similares. Ocupa la mayoría del área de la cuenca, en la parte plana por la presencia de suelos de ese tipo y en las partes montañosas por la presencia de suelos residuales con esas características.

Se tomó como “acuífero no confinado o libre” (factor 1.0) los sectores en los que se reportan capas superficiales más permeables como arenas o gravas. Ocupa la parte central de la cuenca.

4.4.2 Tipo de material de cobertura (Ocurrencia del sustrato)

Los contactos entre las formaciones en el mapa geológico se definieron con base en estudios existentes y en observaciones de campo. En él se delimitan las unidades litológicas. Los contactos mostrados en el mapa de los tipos de material de cobertura se definieron con base en observaciones de campo y sobre todo con base en la información brindada por la información de los pozos recolectada en los archivos del SENARA. Es de esperarse que haya similitud entre estos dos mapas debido a que el material de cobertura que forma la zona no saturada está en estrecha relación con las unidades geológicas. Sin embargo, no se da una total igualdad porque el mapa de material de cobertura hace subdivisiones dentro de los tipos geológicos mostrados en el mapa geológico. Puede verse que prácticamente la totalidad del área formada por basaltos y por coluvios cuenta con un suelo residual originado en la meteorización de estas rocas, pero también puede verse que dentro de la unidad aluvial se pueden identificar cuatro categorías: suelos residuales o materiales finos comparables a éstos, arcillas, limos y arenas arcillosas y finalmente gravas o materiales comparables a ellas. Esta subdivisión es posible porque dentro del aluvión se encuentran áreas más arcillosas, o con más grava o con más o menos limo, y estas características son las que son tomadas en cuenta para sectorizar el área de estudio de acuerdo con las propiedades granulométricas. Como se mencionó, las observaciones de campo y la información de los pozos fue imprescindible para llegar a esta zonificación.

El mapa de este factor ocupa la figura 4.5. Las áreas con suelos residuales, primordialmente las partes montañosas de topografía abrupta, tienen un factor de 0.4. A los sectores en donde hay arcillas se les asigna un factor de 0.5, éstos ocupan la parte norte de la cuenca y un sector al sureste de la ciudad de Santa Cruz. Áreas con limos y arenas arcillosas llevan un factor de 0.6 y se localizan en la parte media de la cuenca. Finalmente, las áreas con presencia de gravas y materiales similares tienen un factor de 0.8 y representan una proporción muy baja dentro de la cuenca.

En el caso específico del área señalada como grava que se muestra al este de la ciudad de Santa Cruz en el mapa de Tipo de Material de Cobertura (u Ocurrencia del Sustrato), ésta se definió con base en la litología del pozo DI-237, que reporta una capa superficial de grava gruesa entre cero y 9 m de profundidad, con un nivel estático de 6 m. Esta área no se diferencia en el mapa geológico porque es parte de la unidad aluvial.

4.4.3 Profundidad al nivel estático

El mapa de la figura 4.6 muestra la distribución de los dos grupos que se definieron con base en la información existente. Las áreas con profundidades menores a los 5 m (factor 0.9) se localizan al noreste de Santa Cruz y en la parte norte de la cuenca. Los sectores con profundidades al nivel estático de entre 5 y 20 m representan la mayoría de la extensión de la cuenca, incluyendo toda el área montañosa y una buena parte de la planicie.

4.4.4 Mapa de vulnerabilidad integrado

Como se mencionó, la multiplicación de los tres mapas anteriores produjo el mapa de vulnerabilidad acuífera para la cuenca. Este mapa corresponde a la figura 4.7, y como puede verse en ella, resultaron cinco categorías de vulnerabilidad, desde despreciable hasta extrema. Estos dos límites del rango de categorías se presentan de manera muy localizada. La vulnerabilidad alta tiene también una presencia relativamente pequeña y le sigue en cobertura las áreas de vulnerabilidad media en la parte central de la cuenca. La categoría de baja vulnerabilidad es la que ocupa la gran mayoría del área de estudio, extendiéndose por toda la parte montañosa y por una importante fracción de la parte baja y más plana.

4.5 Calidad del agua y evidencias de contaminación

Para conocer las características de calidad del agua se recopiló la información disponible en los archivos de pozos de SENARA a fin de evaluar análisis efectuados en el pasado. Se encontraron únicamente cuatro pozos en los que se hubiera tomado muestras para su análisis físico químico. No se encontraron análisis bacteriológicos.

Como parte del presente estudio se tomaron muestras en cinco pozos para practicar en ellos análisis físico químicos y seis pozos para análisis bacteriológicos. Para la toma de las muestras para el examen bacteriológico se hizo un flameo previo utilizando un mechero de alcohol para desinfectar la salida del agua y las muestras se recolectaron en envases esterilizados. Los exámenes

bacteriológicos fueron llevados a cabo por el Laboratorio Químico y Clínico J&M y los análisis físico químicos fueron hechos por Laboratorios Lambda.

La elección de los pozos para su muestreo físico químico y bacteriológico se hizo considerando en primer lugar que fueran pozos que ya tenían un análisis previo y en segundo lugar que fueran pozos de abastecimiento público para aprovechar los resultados de una manera más abierta. Se encontró que algunos de los pozos con registros antiguos ya no existían debido a que eran pozos excavados que se sellaron cuando apareció el sistema de acueducto público. Por eso se muestrearon algunos pozos aunque no tuvieran análisis antiguos.

En cuanto a la ubicación de los pozos muestreados, se trató de que estuvieran ubicados en un lugar lo más representativo posible.

El cuadro 4.1 resume los resultados de los exámenes bacteriológicos. El cuadro 4.2 presenta los resultados de los análisis físico químicos, indicando los resultados antiguos y agregando los valores comprendidos en la norma de potabilidad (Decreto 25991-S). Los reportes de los laboratorios respectivos se adjuntan en el Anexo 2.

Con los resultados físico químicos se prepararon gráficos radiales para cada una de las muestras analizadas tanto en el presente trabajo como en tiempos anteriores. Estos gráficos se incluyen también en el Anexo 2.

Cuadro 4.1 - Resumen de análisis bacteriológicos en la cuenca Diríá

Parámetro	DI-198 UCR	DI-236 Guayabal	DI-375 E. Moreno	DI-373 UNED	DI-90 Arado	DI-386 AyA No.2
Recuento total aerobio UFC/ml	8	6	420	2100	16	31
N.M.P. Coliformes totales/100 ml	<2	<2	79	4,5	<2	<2
N.M.P. coliformes fecales/100 ml	<2	<2	11	<2	<2	<2
N.M.P. Escherichia coli/100 ml	<2	<2	6,8	<2	<2	<2

El agua potable no debe tener coliformes fecales y no debe tener Escherichia Coli. Puede verse que el pozo DI-375 no cumple con esa norma de potabilidad. Este pozo es del tipo excavado, y aunque se encuentra bien cubierto con tapa de concreto, está cerca de 20 m aguas abajo de una casa de habitación que cuenta con tanque séptico, y esta podría ser la razón de su calidad de agua.

Cuadro 4.2 - Resumen de análisis físico químicos en la cuenca Diríá

Parámetro	12/01/1979		03/11/1990			03/11/1009		024/11/1971		Norma recomend.	Norma máx admisible
	DI-198 UCR	DI-198 UCR	DI-236 Guayabal	DI-375	DI-375 E. Moreno	DI-373 UNED	DI-90 Arado	DI-223 AyA plantel	DI-35		
pH	7,2	6,59	6,86	7,1	6,71	6,81	6,95		7,5	6,5 a 8,5	
Turbidez	1,7	< 0,1	0,11	0,41	<0,1	0,47	0,53	0,9	3,7	1	5
Color	0	< 0,1	<0,1	0	<0,1	<0,1	<0,1	0		1	15
Conductividad eléctrica		330	403	364	502	447	422	330	300	400	
Sólidos totales		228	252		328	348	292				
Sólidos disueltos		228	252		328	348	292				1000
Sólidos suspendidos		< 6	<6		<6	<6	<6	0	0		
Alcalinidad (FF, CaCO ₃)	0	<1	<1		<1	<1	<1	0	0		
Alcalin. total (RM, CaCO ₃)		180	209	240	283	219	241	168			
Dureza total (CaCO ₃)	170	169	203	244	273	233	222	167	156	400	
Dureza carbonatos (CaCO ₃)	170	169	203	244	203	219	222	167	156		
Dureza no carb. (CaCO ₃)	2	<1	<1	0	<1	14	<1	0	0		
Calcio	38,8	43,4	54,6	57,9	62,6	59,4	56,2	38	34	100	
Magnesio	17,5	14,6	16,1	23,8	28,3	20,5	20	17	17	30	50
Cloruros	6,9	3,6	5,4	4,3	5,4	7,2	5,4	7	3	25	250
Sulfatos	24	2,7	7,5	5,3	8,5	8,5	2,4	0	20,2	25	250
Sílice	20	74,5	73,2		85,9	89,4	67,6				
Amonio		<0,01	<0,01		<0,01	<0,01	<0,01			0,05	0,5
Hierro	0,07	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,1	0,06	0		0,3
Nitratos (NO ₃)		5	7,8		4,9	20,9	1,1	9,5		25	50
Fluoruros	0,12							0	0,22		0,7
Aluminio								0	0	0,2	
Bicarbonatos	209,7			304				205			
Dureza de Magnesio	73			99				71	71		
Dureza de Calcio	97			144,8				96	85		
Plomo	0								0		0,01
Dióxido de carbono											
Zinc									0,4		3

Todas las concentraciones en mg/l
Sin fecha indicada: julio y agosto 2010

Turbiedad, pH y color en sus unidades específicas

Conduct. Eléctrica en $\mu\text{S/cm}$

El pozo DE-373 (UNED Santa Cruz) muestra cierto contenido de coliformes totales pero no tiene coliformes fecales, en otras palabras, no hay contaminación fecal y por lo tanto no está fuera de norma. Pero el hecho de que haya coliformes de otro tipo que pueden llegar hasta el pozo está indicando que el pozo es vulnerable a ser alcanzado por coliformes del tipo fecal si se instalan elementos como tanques sépticos en las cercanías.

El pozo DI-386, ubicado en el plantel de AyA en Santa Cruz se encuentra libre de coliformes, lo que sugiere que el área de protección que se tiene para estos pozos es adecuado.

En relación con la calidad físico química, los parámetros analizados se encuentran dentro de las normas de potabilidad en todos los pozos muestreados.

4.6 Cálculos de la recarga a los acuíferos

Existen varios métodos para el cálculo de la recarga a los acuíferos de una cuenca. Algunos se basan en el análisis de la descarga de los ríos (flujo base) y otros en una estimación de las entradas de agua. En el presente estudio se ha elegido un método basado en el proceso de entrada de agua en el suelo y su posterior análisis para determinar cuánta de esa agua se convierte en recarga. El procedimiento se puede dividir en dos fases: cálculo de la precipitación que infiltra y balance de humedad de suelos. Para el cálculo de la precipitación que infiltra se utilizó la metodología propuesta por Schosinsky y Losilla (2000) y Schosinsky (2006). Para hacer el balance de humedad de suelos se utilizó el razonamiento propuesto por Penman-Grindley. A continuación se hará una descripción de los procesos involucrados en cada uno de estas dos fases.

4.6.1 Cálculo de la precipitación que infiltra

En esta etapa del estudio fue imprescindible la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) para la creación de los mapas y para llevar a cabo la interacción entre ellos. El método involucra y relaciona cuatro variables: la pendiente del terreno, el tipo de cobertura vegetal, el valor de infiltración básica del suelo y la precipitación promedio mensual.

- **Pendiente del terreno**

El método define un coeficiente K_p para cada categoría de pendiente. Para obtener un mapa de pendientes del terreno se trabajó con base en un modelo de elevación digital, en el que se agruparon los valores de pendientes en los rangos requeridos por el método de análisis. Debido a que el procesamiento digital es muy preciso, la cantidad de áreas que resultan en cada intervalo es extremadamente alta, al tiempo que se visualizan unos sectores sumamente pequeños. Lo anterior hace que el mapa de pendientes así obtenido sea prácticamente inmanejable en términos prácticos, tal y como se ve en la figura 4.8, la cual es el mapa mencionado en el que puede apreciarse visualmente la dificultad que representaría trabajar sobre él. Debido a esta circunstancia se optó por aplicar un proceso de filtrado digital a la imagen original para agrupar los sectores más pequeños y abundantes y anexarlos a áreas más grandes y definidas. El resultado no fue suficiente y entonces se procedió a continuar con este agrupamiento y “limpieza” del mapa por métodos manuales. El razonamiento fundamental fue el de eliminar varios sectores pequeños que se encontraban aislados pero compensando esta pérdida de área con el agrupamiento de otros de la misma categoría que se encontraban cercanos entre sí guardando la ubicación y proporción de las áreas de una manera razonable.

El mapa de la figura 4.9 es el mapa de pendientes resultante que se utilizó para el presente trabajo, en él se muestran los coeficientes K_p correspondientes. Las pendientes más altas dominan el paisaje y se localizan en la parte sur de la cuenca y cerca de su lindero noreste.

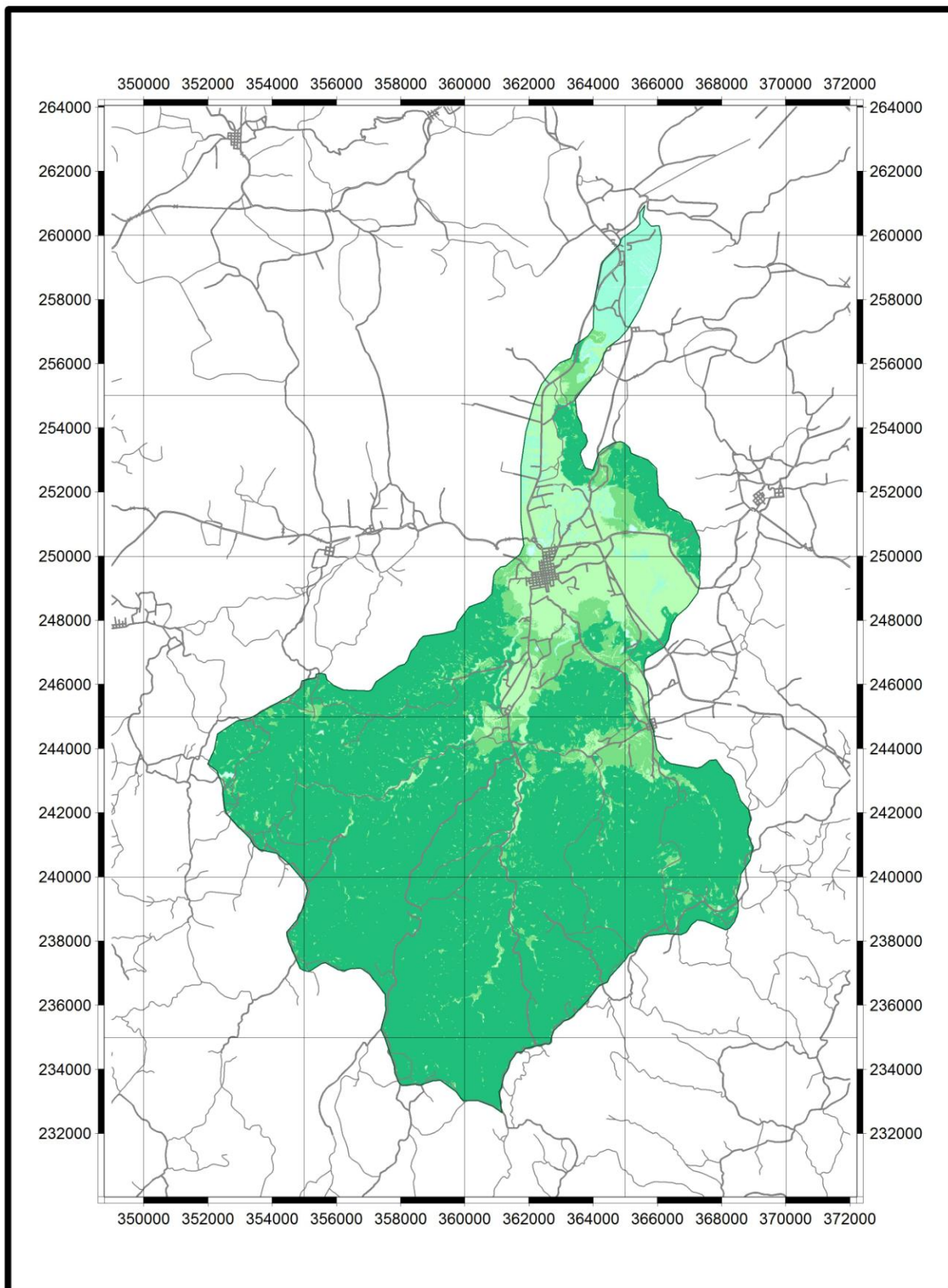


Figura 4.8 – Mapa original de las categorías de pendientes en la cuenca Diria.
Nótese la alta cantidad de sectores resultantes.

Las pendientes “promedio” se encuentran entre los sectores de pendientes más altas y las pendientes “algo plano”, y las áreas de pendiente “plano” ocupan una menor extensión al norte de la cuenca.

- **Tipo de cobertura vegetal**

Se definieron los dos tipos de cobertura vegetal de la figura 4.10 y a cada una el método le asigna un coeficiente Kv. Dentro de los bosques se incluyen no sólo árboles grandes sino plantas de menor tamaño, y dentro de los pastizales pueden estar incluidas áreas con tacotal u arbustos menores.

La delimitación de las áreas cubiertas por cada uno de esos tipos fue hecha con base en mapas existentes, fotografías aéreas recientes y observaciones de campo. Debe tenerse en mente que esta delimitación podría hacerse de una manera más detallada, pero considerando el tamaño de la cuenca fue necesario tomar ciertas generalizaciones en aras de contar con un mapa práctico y manejable. En la figura 4.10 se indican los valores de Kv correspondientes.

- **Velocidad de infiltración básica del suelo**

Para conocer las características físicas e hidráulicas de los terrenos superficiales se hicieron pruebas de infiltración in situ y se tomaron muestras del suelo para su análisis de porosidad, gravedad específica, capacidad de campo y punto de marchitez. La ubicación de los sitios de prueba se hizo tomando en cuenta las categorías de terreno desde un punto de vista geomorfológico, ya que se vio que cada grupo de éstos tenía características similares. Para ello se definieron inicialmente los sitios de prueba sobre el mapa, considerando una distribución lo más homogénea posible. Una vez en el campo, se reubicaron algunos de los sitios definidos inicialmente debido a condiciones de acceso.

La cantidad de sitios de prueba se definió considerando la extensión relativa de cada grupo geomorfológico. Al menos se hicieron dos pruebas y muestreos en las categorías de terreno de menor extensión y se llegó a hacer hasta cuatro pruebas en los de mayor presencia relativa. Las limitaciones que se encontraron para la realización de las pruebas se comentan en lo relativo a cada cuenca de estudio.

Esta característica fue obtenida de pruebas hechas directamente sobre el terreno. En la cuenca del río Diríá se llevaron a cabo nueve pruebas de infiltración por el método del doble anillo, que consiste básicamente en agregar agua a anillos metálicos clavados en el terreno y medir directamente la velocidad de infiltración. El proceso se repite varias veces (eventos) hasta alcanzar una tasa de infiltración prácticamente constante, señal de que el terreno se encuentra saturado. La fotografía 4.1 presenta el detalle de instalación de los anillos.

Hasta donde fue posible, los sitios de prueba se distribuyeron en las unidades geomorfológicas por considerar que cada una de ellas tiene sus propios parámetros hidráulicos en superficie. La fotografía 4.2 presenta una prueba de infiltración en los terrenos referidos como llanura aluvial entre las unidades geomorfológicas.



Fotografía 4.1 – Detalle de la instalación de los anillos para un prueba de infiltración.



Fotografía 4.2 – Prueba de infiltración D1, área de llanura aluvial.

En la fotografía 4.3 se muestra el sitio de una prueba de infiltración en suelos formados sobre las rocas basálticas del Complejo de Nicoya. En ella puede apreciarse una delgada capa de suelo sobre un horizonte de cerca de un metro de espesor de basaltos fracturados, los que a su vez se encuentran sobre basaltos densos cerca del borde inferior de la fotografía.



Suelo

Basalto fracturado

Basalto denso

Fotografía 4.3 – Prueba de infiltración D3. Suelo delgado sobre basalto fracturado.

En este trabajo se llama “evento” al proceso de infiltración o descenso del agua una altura prefijada, la cual va de 0.2 a 1 cm. Cada vez que el nivel del agua descende esa cifra prefijada se toma nota del tiempo que se requirió para que ocurriera ese descenso, se agrega agua e inmediatamente se inicia otro evento. Para cada evento se calcula la velocidad de infiltración, que por ser obtenida bajo condiciones de saturación se iguala a la conductividad hidráulica (permeabilidad). El cuadro 4.3a contiene un resumen de los resultados de cada prueba, indicándose también el tipo de material probado y otras características que se discutirán más adelante.

Cuadro 4.3a - Resumen de los resultados de las pruebas de infiltración y análisis de suelos

Sitio	X	Y	fc cm/min	Material	CC%	PM%	Defmáx %	D.A. g/cm3	D.P. g/cm3	Porosidad %
D1	362410	251928	0,02	Aluvión bajo	35	31	4	1,19	2,34	49
D2	361589	246154	0,15	Aluvión alto	31	28	3	0,99	1,92	48
D3	360281	242447	0,12	Suelo basaltos	35	30	5	1,09	2,53	57
D4	363805	237830	0,1	Suelo basaltos	42	39	3	1,11	2,45	55
D5	362195	239131	0,21	Suelo basaltos	45	39	6	0,97	2,39	59
D6	358665	238766	0,12	Suelo basaltos	38	33	5	0,89	2,34	62
D7	363792	243774	0,15	Aluvión alto	38	35	3	0,89	2,34	62
D8	362275	248781	0,04	Aluvión bajo						
D9	365248	248151	<0,04	Aluvión bajo						
Promedio ---->					38	34	4	1,02		

Notas: *fc* = capacidad de infiltración

CC = capacidad de campo

PM = punto de marchitez

Defmáx = déficit de humedad máxima

D.A = densidad aparente

DP = densidad de partículas

Porosidad = $((DP-DA)/DP)*100$

El Anexo 3 contiene los datos recolectados en cada una de las nueve pruebas hechas en esta cuenca además de un gráfico de las variaciones de la velocidad de infiltración para cada prueba, en el que se anota el valor final o capacidad de infiltración en cm/min.

Debido a que hay variaciones muy pequeñas en la capacidad de infiltración dentro de cada tipo de material se decidió definir un valor promedio para cada uno de estos tipos. Los valores asignados se pueden ver en el cuadro 4.3b. El método empleado para el cálculo de la precipitación que infiltra no utiliza directamente el valor de la capacidad de infiltración, sino que define un coeficiente *Kfc* en función de esa capacidad de infiltración. En el cuadro 4.3b se presentan también los valores de *Kfc* resultantes para cada tipo de terreno. En la cuenca Diría no fue posible realizar pruebas de infiltración en las áreas de coluvio por razones de acceso, el valor indicado en el cuadro 4.3b resulta de las pruebas hechas en la cuenca Andamojo.

Cuadro 4.3b – Valores promedio de capacidad de infiltración (fc) y valores de *Kfc* de cada tipo de material del terreno.

Unidad	fc prom. (cm/min)	fc prom. (mm/d)	<i>Kfc</i>
Aluvión alto	0,15	21,6	0,094
Aluvión bajo	0,03	4,32	0,004
Coluvio	0,35	50,4	0,316
Serranías	0,12	17,28	0,035

La figura 4.11 es un mapa con la ubicación de los puntos de prueba de infiltración y muestreo de suelos y con la zonificación de suelos resultante de esas pruebas. Las unidades de terreno mostradas en ese mapa son las cuatro unidades que se mencionan en el cuadro 4.3b.

Este mapa tiene una alta semejanza con el mapa geomorfológico, tal y como era de esperarse según se comentó en el capítulo de geomorfología. En el cuadro 4.3b y en la figura 4.11 la unidad aluvial se sub dividió en dos partes: sector de aluvión alto y sector de aluvión bajo. Esto se hizo así porque en las partes altas del relleno aluvial se encontraron valores más altos de capacidad de infiltración debido muy probablemente a que en estos sectores las partículas del suelo son de una mayor granulometría, resultando en una mayor capacidad de infiltración.

Los análisis de suelos para la determinación de sus propiedades físicas (CC, PM, DA, DP) fueron hechos por el Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Los reportes se incluyen en el Anexo 4.

• **Precipitación y temperatura**

Se ha tomado como dato representativo para la cuenca la precipitación y temperaturas registradas en la estación meteorológica No. 74053, operada por el Instituto Meteorológico Nacional.

Cuadro 4.4 – Datos climáticos promedio mensuales. Estación Santa Cruz No.74053
 Lat. 10°17' N Long. 85°25' O Altitud 54 m. Período 1995 - 2007

Mes	Lluvia mm	Tem. máx °C	Tem. mín °C	Tem. media °C	Viento km/h	Hum. relat. %
Mz	7,0	35,0	23,7	29,4	13,0	58
Ab	34,2	35,6	24,1	29,9	10,8	62
My	213,3	33,8	23,6	28,7	7,0	78
Jn	215,2	32,1	23,0	27,6	5,5	85
Jl	152,3	32,1	22,7	27,4	6,9	82
Ag	201,9	32,3	22,5	27,4	5,7	84
Se	337,5	31,6	22,5	27,1	4,6	89
Oc	409,4	31,2	22,5	26,9	4,9	88
No	125,2	31,4	22,1	26,8	7,0	82
Di	9,8	31,9	22,0	27,0	10,1	72
En	0,9	32,9	22,3	27,6	13,2	64
Fe	2,5	33,7	23,2	28,5	13,4	58
Anual	1709,2	32,8	22,9	27,8	8,5	75

La figura 4.12 es un hietograma promedio mensual para la estación recién mencionada. Tanto en esa figura como en el cuadro 4.4 el mes de inicio es marzo, por considerarse que es un mes seco previo al inicio de la estación lluviosa, y por lo tanto los suelos se encuentran con menor contenido de humedad. Este aspecto se comentará más adelante en lo relativo al balance de humedad de suelos.

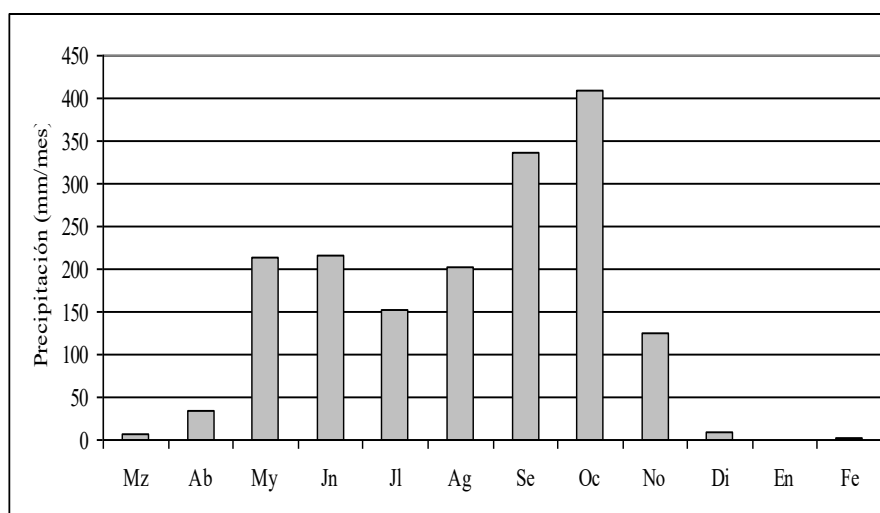


Figura 4.12 – Precipitación promedio mensual, estación Santa Cruz
 Período 1995 – 2007 (Datos: IGN)

Para calcular la cantidad de lluvia que infiltra, el método utilizado define un “coeficiente de infiltración” (C), el cual es una proporción que afecta a la lluvia junto con la retención que ejerce el follaje. El coeficiente C es la suma de los coeficientes Kp, Kv y Kfc que se describieron

anteriormente. En el presente estudio se produjo un mapa de categorías del terreno a partir de la suma digital de esos tres mapas con la finalidad de contar con sectores de diferente valor de C para posteriormente efectuar el balance de humedad de suelos y el cálculo de la recarga.

El mapa resultante dividía la cuenca en 25 sectores, cada uno con su propio valor de C. Estos valores iban de 0.240 a 0.690. En aras de hacer los cálculos de una manera práctica y manejable se creyó conveniente hacer grupos de sectores con valores similares y para esto se definieron intervalos o rangos, asignando el promedio de los valores de cada rango como valor representativo de ese rango o intervalo. De esta manera resultaron siete grupos, que son las siete categorías del terreno que se muestran en el mapa de la figura 4.13, en la cual se presenta el valor de C para cada categoría. Cada categoría está representada por una letra del alfabeto de la A a la G. Se puede ver en esa figura que aún con esta simplificación el mapa resultante es bastante complejo.

Debe tenerse en mente que dos o más sitios de la cuenca pueden tener un mismo valor de C, pero no necesariamente las mismas condiciones de pendiente, vegetación o capacidad de infiltración, ya que el coeficiente C es una suma de estos tres, por eso es que por ejemplo, hay sitios del sector montañoso con el mismo valor de C que sitios de la llanura.

4.6.2 Balance de humedad de suelos y cálculo de la recarga

Como se mencionó, el balance de humedad de suelos y el cálculo de la recarga se basó en el método de Penman-Grindley y se hizo a una escala mensual. De manera esquemática, el procedimiento de cálculo toma la lluvia que infiltra cada mes y la relaciona con el grado de humedad que hay en el suelo. Si la cantidad de agua infiltrada supera la capacidad de campo se da recarga y el agua que queda retenida en el suelo se ve sujeta a procesos de evapotranspiración, la recarga ocurre solo cuando hay un excedente de agua después de llenar la capacidad de campo.

El balance de humedad y el cálculo de la recarga toma en cuenta el coeficiente C, la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez (PM), la densidad aparente del suelo (DA) y la profundidad de raíces (PR).

El coeficiente C acaba de ser comentado. La CC y el PM presentan valores muy similares a través de toda la cuenca, por lo que se decidió usar valores promedio para cada uno de ellos para la totalidad de la cuenca. Esos valores promedio se mencionan en la fila inferior del cuadro 4.3a.

En relación con la PR, debe diferenciarse los sectores con vegetación tipo bosque y sus tipos relacionados y los sectores con pastizales y sus tipos relacionados. De acuerdo con estudios anteriores (Rodríguez, 2009) complementados con observaciones de campo se asignó una PR de 100 mm a los sectores con pastizales y similares y de 750 mm a las áreas boscosas y similares.

Como paso siguiente se sobrepuso el mapa de las siete categorías de C (Figura 4.13) al mapa de tipos de vegetación (Figura 4.10), de lo que resultaron los catorce tipos de categorías del terreno que se identificaron con las letras de la H a la U y que pueden verse en el mapa de la figura 4.14. Como puede verse, resulta un mapa aún más heterogéneo que el de la figura 4.12. Cada uno de estas categorías de terreno tiene los valores de PR, de C, y de área que se señalan en las columnas 3, 4 y 5 del cuadro 4.5. El “código procesal” de la columna 2 es una clave utilizada en el procesamiento de los datos que indica la profundidad de raíces (mm) en la parte entera y el valor de C en la parte decimal, este código no toma parte en los cálculos.

Cuadro 4.5 - Características de los sectores y resultados de la recarga

Categoría de terreno según Figura 4.14	Código procesal	Prof. de raíces (mm)	Valor de C	Area (m ²)	Recarga (mm)	Recarga (m ³ /año)	Recarga (l/s) prom
H	100,267	100	0,267	46736775	364,0	17012186	539
I	100,317	100	0,317	24143850	438,2	10579835	335
J	100,369	100	0,369	7156125	515,5	3688982	117
K	100,407	100	0,407	2107350	571,9	1205193	38
L	100,525	100	0,525	1161000	747,2	867499	28
M	100,606	100	0,606	66375	867,5	57580	2
N	100,656	100	0,656	5400	941,8	5086	0
O	750,267	750	0,267	1939950	175,8	341043	11
P	750,317	750	0,317	106957125	247,4	26461193	839
Q	750,369	750	0,369	2194650	323,1	709091	22
R	750,407	750	0,407	399600	378,5	151249	5
S	750,525	750	0,525	1863900	550,3	1025704	33
T	750,606	750	0,606	11700	668,3	7819	0
U	750,656	750	0,656	7875	741,1	5836	0
TOTAL				194751675	7530,6	62118298	1970

Para cada una de esas 14 categorías de terreno se llevó a cabo un cálculo de la recarga potencial, iniciando desde la precipitación que infiltra hasta obtener la recarga misma. El procesamiento se hizo mediante una hoja electrónica, de la cual se presenta un ejemplo en el cuadro 4.6. El ejemplo aquí mostrado corresponde con la categoría de terreno H.

Una vez que se calculó la lámina de recarga para cada categoría de terreno (columna 6 del cuadro 4.5), se multiplicó este valor por el área de cada categoría para obtener el volumen de recarga en m³/mes que ocupa la columna 7 de ese cuadro. En la columna 8 se ha escrito el mismo volumen mensual de recarga expresado como un caudal continuo en litros/segundo (l/s) para efectos de una mejor visualización de las magnitudes.

De acuerdo con estos cálculos, la recarga potencial promedio anual en la cuenca Diríá alcanza una cifra del orden de los 62.11 millones de metros cúbicos, equivalente a un caudal continuo de 1970 l/s. La categoría de sector que más aporta es el P (42.5% de la recarga total), seguido por el H (27.3%), el I (17.0%) y el J (5.9%). Los restantes representan un 7.3% del total.

4.7 Estimación de la extracción actual y balance de aguas

El cálculo preciso de la cantidad de agua subterránea que se extrae por medio de pozos es algo complejo debido a que es difícil encontrar un patrón de uso de todos los pozos. En el presente trabajo se ha hecho una estimación de la magnitud de esta cifra con base en los caudales reportados en la información de los pozos del Anexo 1 y suponiendo un tiempo de bombeo diario para cada uso ahí reportado. Las horas de bombeo diarias estimadas y el volumen para cada uso se ven en el cuadro 4.7

Cuadro 4.6 - Ejemplo de cálculo de la recarga

Lugar = Sectores tipo H de la cuenca Dirιά
(Datos en letra *cursiva y negrita*)

Densidad ap. (g/cm ³)=	1,02
CC (%) =	38
PM (%) =	34
hi (%) =	34
Prof. Raíces (m) =	0,1
C =	0,267

CC (mm) =	38,76	Capacidad de campo
PM (mm) =	34,68	Punto de marchitez
hi suelo (mm) =	34,68	Humedad inicial
defmax =	4,08	CC-PM

Mes	EVAPOTRANSPIRACIÓN					PRECIP. QUE LLEGA AL SUELO			
	Temp. Máxima (°C)	Temp. Mínima (°C)	Temp. Media (°C)	mm/d Ra	Hargreaves (mm) ETP	Cfo = 0,12		Retención follaje/mes	
						P (mm)	(p)(Cfo)	(mm/mes) Retenc.	(mm/mes) P al suelo
Mz	35	23,7	29,4	474,3	172,4	7	0,8	5,0	2,0
Ab	35,6	24,1	29,9	471	174,6	34,2	4,1	5,0	29,2
My	33,8	23,6	28,7	480,5	163,7	213,3	25,6	25,6	187,7
Jn	32,1	23	27,6	459	144,0	215,2	25,8	25,8	189,4
Jl	32,1	22,7	27,4	474,3	150,8	152,3	18,3	18,3	134,0
Ag	32,3	22,5	27,4	480,5	156,0	201,9	24,2	24,2	177,7
Se	31,6	22,5	27,1	459	142,5	337,5	40,5	40,5	297,0
Oc	31,2	22,5	26,9	455,7	137,7	409,4	49,1	49,1	360,3
No	31,4	22,1	26,8	408	127,1	125,2	15,0	15,0	110,2
Di	31,9	22	27,0	400	129,2	9,8	1,2	5,0	4,8
En	32,9	22,3	27,6	409,2	138,7	0,9	0,1	0,9	0,0
Fe	33,7	23,2	28,5	397,6	136,7	2,5	0,3	2,5	0,0
Totales:					1773,4	1709,2	205,1	217,0	1492,2

Mes	P.I.	RECARGA			ETR		H.F
	Precipitación que infiltra (mm/mes)	Humedad inicial	Humedad después de Pi (Teórico) Hi + Pi	Recarga. Excedente sobre CC después de Pi	Humedad para ETR después de recargar	ETR	Humedad final después de la ETR, no menor a PM
Mz	0,5	34,68	35,2	0,0	35,2	22,57	34,7
Ab	7,8	34,68	42,5	3,7	38,8	174,59	34,7
My	50,1	34,68	84,8	46,0	38,8	163,69	34,7
Jn	50,6	34,68	85,2	46,5	38,8	144,04	34,7
Jl	35,8	34,68	70,5	31,7	38,8	150,77	34,7
Ag	47,4	34,68	82,1	43,4	38,8	155,96	34,7
Se	79,3	34,68	114,0	75,2	38,8	142,45	34,7
Oc	96,2	34,68	130,9	92,1	38,8	137,67	34,7
No	29,4	34,68	64,1	25,3	38,8	127,15	34,7
Di	1,3	34,68	36,0	0,0	36,0	40,58	34,7
En	0,0	34,68	34,7	0,0	34,7	0,00	34,7
Fe	0,0	34,68	34,7	0,0	34,7	0,00	34,7
Tot:	398,4		814,6	364,0		1259,5	

Cuadro 4.7 – Estimación de las horas de bombeo y de la extracción de los pozos según el uso

Uso	Horas diarias de bombeo	Observaciones	Volumen extraído (m ³ /d)
Abast. público	12	Horas de bombeo de los pozos de AyA en Santa Cruz (com. verbal)	5810
Doméstico	2	Caudales de 0.5 a 1 l/s, familias de 5 personas	194
Dom. y riego	12	Jornadas comunes de riego	449
Industrial	12	Jornadas comunes de trabajo	109
Riego	12	Jornadas comunes de riego	734
Varios	8	Instalaciones deportivas y similares	144

Con esas consideraciones resulta un volumen diario de extracción de 7440 m³/d, equivalente a 2.71 millones de m³/año. Si se expresa esa cifra en términos de un caudal continuo se tendría un caudal de 86 l/s.

Comparando la recarga potencial calculada (62.11×10^6 m³/año) con la extracción estimada (2.71×10^6 m³/año) se tendría una diferencia del orden de 59.4×10^6 m³/año, ó un caudal continuo equivalente de 1880 l/s.

5. CUENCA DEL RÍO ANDAMOJO

En el análisis de la cuenca del río Andamojo se seguirá el mismo formato de trabajo utilizado para la cuenca del Diríá debido a que las actividades desarrolladas son las mismas. Por esta razón se omitirán detalles principalmente en lo referente a las metodologías empleadas y se hará referencia a lo ya descrito para la cuenca Diríá.

5.1 Geomorfología

En la cuenca del río Dirá se diferenciaron cuatro unidades geomorfológicas, tal y como se muestran en el mapa de la figura 5.1. A continuación las principales características de cada una de ellas.

5.1.1 Llanura aluvial

Forma la parte central y de menor elevación de la cuenca. Se caracteriza por su poca pendiente y su relieve plano. Formada por procesos de depositación de materiales durante las crecidas de los ríos.

5.1.2 Coluvios

Ocupan una proporción muy baja en la totalidad del área de la cuenca. Formados por la depositación de materiales arrastrados desde las serranías, por lo que están ubicados a los pies de éstas.

5.1.3 Serranías y suelos residuales y denudacionales

Ocupan los terrenos de relieve más abrupto y fueron formados por la erosión de las rocas pre existentes, que fundamentalmente se trata de basaltos. Ocupan una importante proporción del área de la cuenca.

5.1.4 Meseta estructural

Ocupa una proporción muy importante dentro de la cuenca, y se localiza en el sector suroeste de la misma, confinando a las áreas de llanura aluvial. Se originó por la erosión de las rocas volcánicas basálticas, en donde la erosión diferencial produjo un relieve no tan abrupto como el de las serranías sino que puede verse una pendiente más baja con frecuentes oscilaciones en el terreno.

En el mapa geomorfológico se presenta un sector denominado Llanura de inundación marina, y se trata de un área predominantemente formada por manglar, de relieve muy plano y de muy baja elevación. En un sentido estricto, esta área no es tomada como acuífero o como terreno utilizable.

5.2 Marco geológico

En esta cuenca se pueden distinguir las mismas tres unidades que se describieron para la cuenca del río Diríá: Formación Complejo de Nicoya, Coluvio y Depósitos Fluviales Cuaternarios. La distribución de estas tres unidades en la cuenca de estudio puede verse en el mapa de la figura 5.2

5.3 Condiciones hidrogeológicas

5.3.1 Presencia de acuíferos

De manera similar a lo que ocurre en la cuenca del río Diríá, en la cuenca Andamojo se han formado acuíferos en la unidad de depósitos cuaternarios y en la formación Complejo de Nicoya, y de igual manera, los acuíferos principales están albergados en la primera. Los caudales máximos reportados en pozos que captan estos materiales llegan a 11 l/s.

Al igual que en el caso de la cuenca Diríá, el acuífero formado en los basaltos se limita a un horizonte superior meteorizado y fracturado. Los caudales reportados por los pozos que lo captan indican valores máximos de hasta 4.5 l/s, aunque la gran mayoría reporta cifras de entre 1 y 3 l/s.

5.3.2 Presencia de pozos

De acuerdo con los archivos de pozos del SENARA, se cuenta con cerca de 119 pozos registrados en esta cuenca, y solo de 33 pozos se tiene un registro litológico. El agua se usa con fines de abastecimiento público, abrevadero, doméstico, riego y en una pequeña proporción para uso industrial.

La información disponible para cada pozo se incluye en el Anexo 1. En la figura 5.3 puede verse la ubicación de los pozos dentro de la cuenca y de algunos ligeramente fuera de ella.

5.3.3 Niveles de agua subterránea y direcciones de flujo

La profundidad al agua subterránea se encuentra entre menos de un metro en algunos sitios a 45 m en los de mayor profundidad. El nivel de agua está más cerca de la superficie en la parte baja y central de la cuenca, le siguen las áreas montañosas y por último, es en el sector cercano al borde sur de la cuenca en donde la profundidad es mayor. Este tema de la profundidad al agua subterránea será retomado en el capítulo relativo a la vulnerabilidad acuífera a la contaminación.

La figura 5.3 es un mapa que muestra las líneas isofreáticas en la cuenca de estudio, construidas con base en la información brindada por los registros de los pozos. En ese mapa puede verse que de las isofreáticas se deduce que la dirección del agua subterránea va hacia la parte central de la cuenca corriendo desde los cerros. Resulta también de estas líneas que los ríos Andamojo y sus afluentes que corren por la planicie se comportan como ríos efluentes, lo que explica su caudal permanente.

Al igual que se hizo en la cuenca Diriá, no se dibujaron las líneas isofreáticas en aquellas áreas en las que la información no era suficientemente densa o si se había inconsistencias en los datos.

El gradiente subterráneo en la llanura aluvial va de 0.016 (1.6%) en el sector norte y más alto hasta 8.6×10^{-4} (0.08%) cerca del extremo suroeste y más cercano a la costa.

5.4 Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

El método utilizado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación fue el mismo método G.O.D. empleado en la cuenca Diriá. La descripción del mismo y la metodología empleada en la elaboración de los datos fueron comentados en el capítulo 4.4. referente a la cuenca Diriá.

En la cuenca Andamojo se prepararon los mapas homólogos a los que se hicieron para la cuenca Diriá. La figura 5.4 es el mapa de confinamiento hidráulico, la figura 5.5 es el mapa de tipo de cobertura de acuífero (ocurrencia del sustrato) y los sectores de distinta profundidad al nivel estático se delimitan en el mapa de la figura 5.6. A cada uno de los sectores de esos mapas se le asignó el índice correspondiente.

En el mapa de tipo de cobertura del acuífero se aprecia un sector como formado por grava dentro de la formación de basaltos. Esta zona de grava se definió con base en la litología del pozo VI-146, que reporta una capa superficial de 10 metros de espesor de “rocas detríticas heterogéneas” que sobreyace a basaltos. Por su ubicación dentro de la unidad de basaltos, se interpretó que se trataba de basaltos fracturados tipo “cascajo”, que hidráulicamente y para los fines del método G.O.D. se comportan como gravas. En otras palabras, no se trata de una grava aluvial, sino de un área formada en su superficie por basaltos muy fracturados que se comportan como gravas desde un punto de vista hidráulico. En el mapa geológico no se distingue esta zona de grava porque es parte de la misma formación de basaltos.

El mapa de vulnerabilidad integrado ocupa la figura 5.7, en donde puede verse que hay dos sectores aislados con vulnerabilidad alta en las partes medias-bajas de la cuenca, un eje central de vulnerabilidad media que corresponde con la franja plana y de menor elevación y una gran proporción de terreno de vulnerabilidad baja en los sectores de topografía más abrupta. El área de manglar no se ha evaluado con el método G.O.D., sino que se le ha asignado una vulnerabilidad extrema considerando su condición especial.

5.5 Calidad del agua y evidencias de contaminación

Se hicieron muestreos de agua para análisis físico químicos y bacteriológicos en tres pozos, centrandó la atención en pozos de abastecimiento público. Por esta razón se muestrearon los pozos de las Asociaciones Administradoras de Acueductos (ASADAS) de Paraíso, Venado y Río Seco. La ubicación de estos pozos se muestra en el mapa de la figura 5.3.

El cuadro 5.1 presenta los resultados de los análisis físico químicos, las tres muestras son de aguas que están dentro de las normas de potabilidad para los parámetros analizados.

Cuadro 5.1 – Resumen de los análisis físico químicos en la cuenca del río Andamojo

Parámetro	VI-21	VEN		Norma potabilidad Recom – Máx. admisible
	ASADA Paraíso	ASADA Venado	ASADA Río Seco	
pH	6,85	6,89	6,6	Rango 6.5 a 8.5
Turbidez	0,27	2,6	0,19	1 – 5
Color	<0,1	<0,1	<0,1	1 – 15
Conductividad eléctrica	285	386	303	400 -
Sólidos totales	252	304	264	
Sólidos disueltos	252	304	264	- 1000
Sólidos suspendidos	<6	<6	<6	
Alcalinidad (FF, CaCO ₃)	<1	<1	<1	
Alcalinidad total (RM, CaCO ₃)	166	218	165	
Dureza total (CaCO ₃)	145	147	159	400 -
Dureza carbonatos (CaCO ₃)	145	147	159	
Dureza no carbonatos (CaCO ₃)	<1	<1	<1	
Calcio	32,1	29,3	36,1	100 -
Magnesio	15,6	17,8	16,6	30 – 50
Cloruros	5,4	7,2	5,4	25 – 250
Sulfatos	3,1	4,4	5,1	25 – 250
Sílice	73,5	91,5	77,9	
Amonio	<0,01	0,11	<0,01	0.05 – 0.5
Hierro	<0,01	0,46	<0,01	- 0.3
Nitratos (NO ₃)	0,98	0,12	10,8	25 – 50

Todas las concentraciones en mg/l Turbiedad, pH y color en sus unidades específicas Conduct. Eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$

En relación con la calidad bacteriológica, se tomaron muestras de tres pozos, dos de ellos corresponden a los pozos de dos ASADAS consideradas en el cuadro 5.1 y el tercer pozo es un pozo excavado particular, identificado como LT. No se tomó una muestra del pozo de la ASADA de Paraíso porque no era posible conseguir una muestra sin clorar.

El cuadro 5.2 resume los resultados, en donde puede verse que solamente el pozo LT muestra un contenido de coliformes fecales y de *Escherichia coli* fuera de las normas de potabilidad. Este pozo es del tipo excavado, y aunque se encuentra bien protegido en su estructura propiamente dicha, está muy cerca de instalaciones en donde existe un tanque séptico y derrames de agua al suelo. Muy probablemente se trata de una condición local.

Cuadro 5.2 - Resumen de análisis bacteriológicos en la cuenca Andamojo

Parámetro	VEN	VI-15	LT
	ASADA Venado	ASADA Río Seco	Las Tuquitas
Recuento total aerobio UFC/ml	0	0	63
N.M.P. Coliformes totales/100 ml	<2	<2	33
N.M.P. coliformes fecales/100 ml	<2	<2	33
N.M.P. Escherichia coli/100 ml	<2	<2	7,8

5.6 Cálculos de la recarga a los acuíferos

Los cálculos de recarga en la cuenca Andamojo se hicieron con la misma metodología ya expuesta y comentada en lo relativo a la cuenca Diríá.

5.6.1 Cálculo de la precipitación que infiltra

Al igual que se hizo para la cuenca Diríá, se prepararon mapas de pendientes, de cobertura vegetal y de zonificación de suelos con base en la capacidad de infiltración del terreno. A las categorías resultantes en los dos primeros se les asignó un índice de acuerdo con el método y en el tercer mapa se asignó un valor del índice “fc” a cada sector resultante.

El mapa de pendientes que resultó originalmente contenía una gran cantidad de sectores que hacían el manejo del mismo prácticamente imposible. La figura 5.8 es este mapa, en el que se puede ver la gran complejidad. Debido a esta situación se optó por simplificar este mapa siguiendo el mismo procedimiento empleado en la cuenca Diríá. El mapa resultante, y que sirvió de base para los cálculos ocupa la figura 5.9.

El mapa de cobertura vegetal resultante corresponde a la figura 5.10.

Se hicieron siete pruebas de infiltración in situ y se tomó igual cantidad de muestras de suelo para análisis de CC, PM, DA, DP y porosidad. Las fotografías 5.1 y 5.2 son ejemplos de estas pruebas. La ubicación de los sitios de prueba y muestreo se pueden ver en el mapa de la figura 5.11, y los resultados de laboratorio se presentan en el cuadro 5.3a.

El Anexo 3 presenta los datos de campo de cada prueba de infiltración con un gráfico de los resultados y el Anexo 4 contiene los reportes del laboratorio de suelos.



Fotografía 5.1 – Prueba de infiltración A5. Suelos residuales sobre basaltos de la meseta estructural.



Fotografía 5.2 – Prueba de infiltración A7. Suelos sobre la unidad de relleno aluvial.

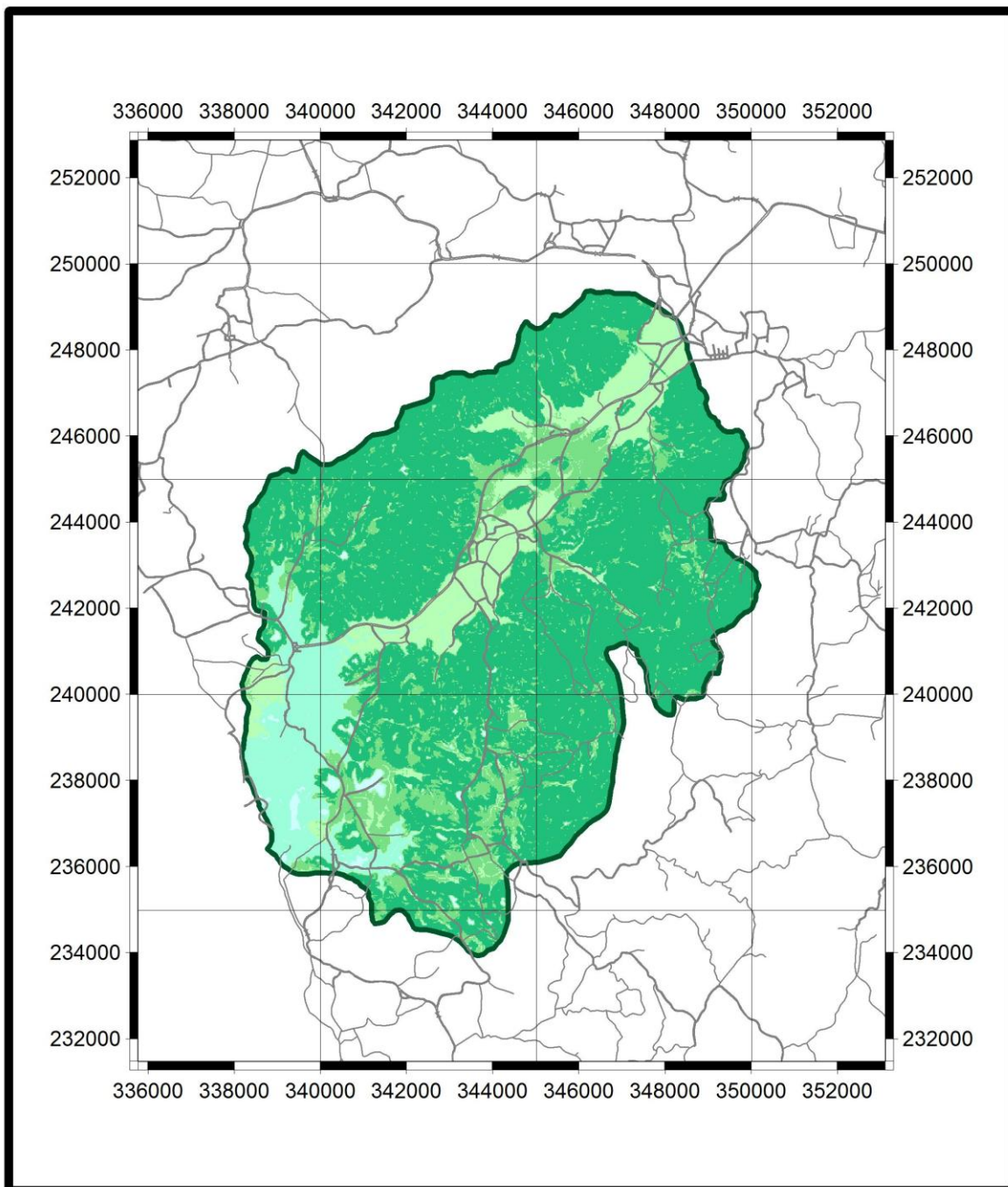


Figura 5.8 – Mapa de pendientes original, con una gran cantidad de sectores según la pendiente.

Cuadro 5.3a – Resultados de las pruebas de infiltración y de los análisis de suelo

Sitio	X	Y	fc cm/min	Material	CC%	PM%	Defmáx %	D.A. g/cm ³	D.P. g/cm ³	Porosidad %
A1	348175	247900	0,01	Aluvión	30	11	19	1,34	2,61	49
A2	344675	245700	0,35	Coluvio	36	30	6	1,03	2,48	58
A3	343500	242275	0,007	Aluvión	35	28	7	1,28	2,62	51
A4	343875	240875	0,06	Suelo basalto	38	33	5	0,91	2,45	63
A5	345000	238625	0,04	Suelo basalto	38	34	4	1,08	2,53	57
A6	341025	236025	0,01	Suelo plataforma	38	34	4	0,89	2,48	64
A7	339925	238775	0,01	Aluvión	38	34	4	1,12	2,6	57
				Promedios	37	34	4	1.05		

Notas: CC = capacidad de campo PM = Punto de marchitez Defmáx = déficit de humedad máxima
D.A. = densidad aparente D.P. = densidad de partículas Porosidad = $((DP-DA)/DP)*100$
Los promedios no incluyen al sitio A1 por considerarse anómalo

Para cada tipo de terreno se definió un valor promedio representativo de fc, y para cada uno de esos valores se calculó el índice Kfc según lo indica el método de cálculo. En el cuadro 5.3b se pueden ver los valores asignados de fc y los correspondientes índices Kfc.

Cuadro 5.3b – Valores promedio de capacidad de infiltración (fc) y valores de Kfc de cada tipo de material del terreno.

Unidad	fc promedio (cm/min)	fc promedio (mm/d)	Kfc
Llanura aluvial	0,01	1,44	0,001
Serranías	0,05	7,2	0,007
Meseta estructural	0,01	1,44	0,001
Coluvio	0,35	50,4	0,316

En la figura 5.11 se muestra también la zonificación resultante del terreno de acuerdo con el factor Kfc. Las categorías de terreno ahí mostradas son las que se mencionan en el cuadro 5.3b.

En relación con las condiciones meteorológicas, específicamente en lo que se refiere a precipitación y temperatura, se indagó en el IMN acerca de estaciones cercanas a la cuenca Andamojo y se concluyó que la más cercana es la estación Santa Cruz, la misma que se utilizó en los cálculos hechos en la cuenca Diríá. Por lo tanto, esta estación se utilizará también en la cuenca del río Andamojo.

El mapa de zonificación del terreno de acuerdo con el coeficiente C fue preparado sumando digitalmente los mapas de los índices de pendiente (Kp), vegetación (Kp) y capacidad de infiltración (Kfc) que se mencionaron recientemente. Al igual que sucedió con la cuenca Diríá, resultó una cantidad de 25 sectores, cada uno con su valor de C. En este caso los valores iban de 0.24 a 0.64. Después de agrupar estos sectores en categorías de valores similares resultaron seis categorías de terreno, y al igual que en la cuenca Diríá, se asignó a cada categoría un valor representativo de C que resultó del promedio de los sectores incluidos en cada categoría. La distribución de esas seis categorías de terreno se presenta en el mapa de la figura 5.12, indicándose aquí también el valor de C asignado a cada categoría.

5.6.2 Balance de humedad de suelos y cálculo de la recarga

La variabilidad de la CC y del PM es muy poca en las muestras de suelo analizadas, y por esta razón se utilizaron cifras promedio para cada una de ellas. Esos promedio están en la fila inferior del cuadro 5.3a. Los valores de PR son los mismos que se utilizaron para Diriá.

El mapa de las seis categorías de C (figura 5.12) se sobrepuso mediante técnicas digitales al mapa de los tipos de cobertura vegetal (figura 5.10) y de ahí resultaron once tipos de categorías del terreno que se designaron con las letras G a la Q y cuya distribución se muestra en la figura 5.13. En el cuadro 5.4 se pueden ver los valores de PR, de C y de extensión o área para cada una de las once categorías de terreno.

Cuadro 5.4 – Características de las categorías de terreno y resultados de los cálculos de recarga

Tipo de sector	Código procesal	Prof. de raíces (mm)	Valor de C	Area (m ²)	Recarga (mm)	Recarga (m ³ /año)	Recarga (l/s equivalente)
G	100,261	100	0,261	37623375	345,7	13006401	412
H	100,319	100	0,319	10390950	431,9	4487851	142
I	100,367	100	0,367	8955225	503,2	4506269	143
J	100,466	100	0,466	554850	650,2	360763	11
K	100,566	100	0,566	8550	798,7	6829	0
L	750,261	750	0,261	51382800	119,5	6140245	195
M	750,319	750	0,319	3767625	193,1	727528	23
N	750,367	750	0,367	2311875	258,8	598313	19
O	750,466	750	0,466	949275	403,0	382558	12
P	750,566	750	0,566	741150	548,6	406595	13
Q	750,616	750	0,616	33975	621,4	21112	1
TOTAL				116719650	4874,1	30644465	972

Utilizando la misma metodología que se empleó en la cuenca Diriá, se procedió a calcular la recarga potencial en cada una de esas once categorías de terreno. Los resultados están en las tres últimas columnas de cuadro 5.4, tanto en lámina de recarga (en mm) como en volumen anual. Este último se obtuvo de multiplicar la lámina de recarga por el área respectiva. En la última columna se expresa el valor de la recarga en un caudal equivalente en l/s, lo que puede facilitar la visualización de los resultados.

Del cuadro 5.4 resulta que el volumen promedio de recarga anual es de $30.64 \times 10^6 \text{ m}^3$.

La categoría de sector que más influye en la recarga es la categoría G (42.4%), le sigue la L (20.0%) y luego la H y la I (14.6% cada una). El resto de categorías aportan un 8.4%.

Herrera (1980) hizo un análisis manual de un hidrograma originado en un limnógrafo colocado en el río Andamojo específicamente bajo el puente de la calle entre Río Seco y Florida. En esa ocasión el período de registro fue de julio a noviembre de 1979 y determinó un volumen de flujo base de $32.7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Proporcionalmente esta cifra es más alta que la determinada en el presente estudio ya que el limnógrafo no estaba colocado a la salida de la cuenca. Entre otros factores, las diferencias pueden ser debidas al margen de error de uno u otro método de cálculo o a diferencias entre la precipitación de ese año específico en relación con el promedio utilizado en el presente trabajo.

5.7 Estimación de la extracción actual y balance de aguas

Utilizando los mismos supuestos descritos para la cuenca Diriá, y con base en los caudales reportados de los pozos de la cuenca de estudio, se hizo una estimación del volumen anual de agua subterránea extraído por medio de pozos. Los resultados se muestran en el cuadro 5.7.

Con esas consideraciones resulta un volumen diario de extracción de 5725 m³/d, equivalente a 2.09 millones de m³/año. Si se expresa esa cifra en términos de un caudal continuo se tendría un caudal equivalente de 66 l/s.

Si se compara la recarga potencial calculada (30.64x10⁶ m³/año) con la extracción estimada (2.09x10⁶ m³/año) se tendría una diferencia del orden de 28.5x10⁶ m³/año, ó un caudal continuo equivalente de 905 l/s.

Cuadro 5.7 – Estimación de las horas de bombeo de los pozos y volumen extraído anualmente según el uso

Uso	Horas diarias de bombeo	Observaciones	Volumen diario extraído prom. (m ³ /día)
Abast. público	12	Horas de bombeo de los pozos de AyA en Santa Cruz	2697
Abrevadero	4	Media jornada laboral promedio	58
Doméstico	2	Caudales de 0.5 a 1 l/s, familias de 5 personas	446
Doméstico y riego	12	Jornadas comunes de riego	2365
Industrial	12	Jornadas comunes de trabajo	432
Varios	8	Instalaciones deportivas y similares	115

6. CUENCA DEL RÍO NIMBOYORES

En la cuenca del río Nimboyores solamente se contemplaron los aspectos de vulnerabilidad acuífera a la contaminación y de calidad del agua subterránea.

6.1 Vulnerabilidad acuífera a la contaminación

La metodología utilizada para la determinación de la vulnerabilidad es la misma que se empleó en las dos cuencas mencionadas anteriormente y que se describió en el sub capítulo 4.4.

De la misma manera que se mencionó, se prepararon mapas de los factores Grado de confinamiento, tipo de cobertura del acuífero (ocurrencia del sustrato) y de profundidad al nivel del agua subterránea. Esos mapas ocupan las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 respectivamente.

En relación con el grado de confinamiento, se consideró “no confinado cubierto” (factor 0.6) en los sectores en los que el material de la zona no saturada puede producir cierto retardo en la infiltración, tal como sitios con una capa superficial de suelo, limos arenosos, y similares. Los sectores de “acuífero no confinado o libre” (factor 1.0) son los sectores en los que se reportan capas superficiales más permeables como arenas, gravas o rocas muy fracturadas.

En relación con el tipo de material de cobertura (ocurrencia del sustrato), las áreas con suelos residuales, primordialmente las partes formadas por basaltos, tienen un factor de 0.4. A los sectores en donde hay arcillas se les asigna un factor de 0.5, y las áreas con limos y arenas arcillosas llevan un factor de 0.6.

Con la profundidad al nivel del agua se asigna un valor de 0.9 a los sectores con profundidad al agua menor a los 5 metros y de 0.8 si esa profundidad está entre 5 y 20 m.

El mapa de vulnerabilidad final se obtuvo de la multiplicación de los tres mapas recién mencionados y ocupa la figura 6.4. En esa figura se puede ver que resultaron tres categorías de vulnerabilidad:

- Vulnerabilidad baja: representa la mayoría de la extensión de la cuenca.
- Vulnerabilidad media: ocupa el sector central de la cuenca.
- Vulnerabilidad alta: representada por solo dos sectores de menor tamaño, localizados al este y al sur del pueblo de Cartagena.

6.2 Calidad del agua subterránea e indicios de contaminación

Se tomaron muestras de agua para sus análisis físico químicos y bacteriológicos en un pozo de abastecimiento público (ASADA del pueblo de Lorena) y en un pozo particular (pozo Mario Ruiz). Los resultados del análisis físico químico se resumen en el cuadro 6.1, donde se ve que todos los parámetros analizados se encuentran dentro de las normas de potabilidad.

Cuadro 6.1 – Resumen de los análisis físico químicos, cuenca Nimboyores.

Parámetro	BE-173	MR	Norma potabilidad
	ASADA Lorena	Mario Ruiz	Recom – Máx. admisible
pH	7,2	6,69	Rango 6.5 a 8.5
Turbidez		2,1	1 – 5
Color		<0,1	1 – 15
Conductividad eléctrica	450	404	400 -
Sólidos totales		344	
Sólidos disueltos		344	- 1000
Sólidos suspendidos		<6	
Alcalinidad (FF, CaCO ₃)		<1	
Alcalinidad total (RM, CaCO ₃)		225	
Dureza total (CaCO ₃)		219	400 -
Dureza carbonatos (CaCO ₃)		219	
Dureza no carbonatos (CaCO ₃)		<1	
Calcio	47,1	51,4	100 -
Magnesio	21,7	22	30 – 50
Cloruros		5,4	25 – 250
Sulfatos		4,9	25 – 250
Sílice		74,9	
Amonio		<0,01	0.05 – 0.5
Hierro		<0,01	- 0.3
Nitratos (NO ₃)	1	5,1	25 – 50
Sodio	16,2		
Azufre	1		

Todas las concentraciones en mg/l Turbiedad, pH y color en sus unidades específicas Conduct. Eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$

En el Anexo 2 se incluyen los reportes de los laboratorios.

En relación con la calidad bacteriológica, el cuadro 6.2 resume los resultados de los exámenes practicados a las dos muestras tomadas. Ambas se encuentran dentro de las normas de potabilidad.

Cuadro 6.2 - Resumen de análisis bacteriológicos en la cuenca Nimboyores

Parámetro	MR Mario Ruiz	BE-173 ASADA Lorena
Recuento total aerobio UFC/ml	17	0
N.M.P. Coliformes totales/100 ml	<2	<2
N.M.P. coliformes fecales/100 ml	<2	<2
N.M.P. Escherichia coli/100 ml	<2	<2

Se hace la aclaración de que no fue fácil conseguir pozos representativos para hacer muestreos y análisis de agua, ya que muchos de los pozos excavados no se encuentran en uso desde que se cuenta con un sistema de acueducto.

7. CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

- **Aspectos técnicos y de diagnóstico**

Los acuíferos principales se encuentran comprendidos dentro de las unidades aluviales ubicadas en las partes bajas y planas de las cuencas. Los sectores montañosos formados por basaltos no parecen contener acuíferos capaces de brindar caudales altos, sin embargo, el hecho de que exista un horizonte superior permeable en estos basaltos sobre rocas densas, ha de estar favoreciendo la existencia de un flujo sub superficial importante originado por la infiltración del agua de lluvia en las partes montañosas que desciende siguiendo aproximadamente la pendiente del terreno y llega a recargar a los acuíferos aluviales en las áreas del pie de las serranías.

Los ríos principales son efluentes, lo que significa que una proporción importante de la recarga se descarga a través de ellos. Es posible que a finales de las épocas lluviosas, cuando los niveles de agua subterránea se encuentran en su mayor elevación, alguna proporción del agua que potencialmente se calculó como recarga en los capítulos anteriores no pueda ingresar al acuífero aluvial por razones de espacio.

La calidad físico química del agua subterránea se encuentra dentro de las normas de potabilidad en todas las muestras que se tomaron. Sin embargo, la calidad bacteriológica se ve afectada de manera negativa por las condiciones prevalecientes en los alrededores de algunos de los pozos analizados. Este tipo de contaminación se considera local debido al relativamente corto período de vida de las bacterias en el subsuelo.

De acuerdo con Foster y otros (2002), las escasas áreas de vulnerabilidad extrema son susceptibles a la mayoría de los contaminantes presentando un impacto rápido, por lo tanto deben evitarse las actividades que generen cualquier tipo de contaminante. Los sectores de vulnerabilidad alta son vulnerables a contaminantes que no son fuertemente absorbidos o que son fácilmente transportados, por lo que la actividades que los produzcan deben ser restringidas. Las áreas de vulnerabilidad media son vulnerables a algunos contaminantes solo sin son descargados

o lixiviados de manera continua y finalmente los sectores de baja vulnerabilidad podrían verse afectados por contaminantes conservativos que se descarguen en una forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo.

En la cuenca Diríá no se cuenta con información de caudales de los ríos como para hacer un análisis de flujo base, y por lo tanto los resultados de los cálculos de la recarga que se hicieron en el presente trabajo no pueden ser comparados con este otro método. Sería recomendable la instalación de una estación de aforos periódicos con su respectivo limnógrafo debidamente calibrado en la parte baja de la cuenca. Tentativamente se recomienda considerar para su instalación un punto del río Diríá localizado en el camino que une a Bernabela con Hacienda Jirona, en las coordenadas aproximadas 364400/257750. Con los datos históricos y continuos de caudales que se puedan recolectar en esta sección del río se podría hacer un análisis del flujo base y calcular la recarga por este método.

En relación con la cuenca Andamojo, en el sub capítulo 5.6.2 se hace referencia a un análisis del flujo base del río Andamojo hecho en un estudio anterior y se compara con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Se comentan las posibles causas de la discrepancia entre los resultados. No se hizo un nuevo análisis de este flujo base debido a que no se cuenta con los datos originales de caudal que originaron el hidrograma que se analizó en ese estudio anterior.

- **Limitaciones de los mapas generados**

Los mapas generados se han construido con base en la interpretación de la información existente y con base en observaciones de campo. En trabajos de este tipo es imposible dejar de extrapolar valores a partir de los datos puntuales existentes, lo cuales en muchos casos no se encuentran con la densidad que se hubiera deseado. Esta generalización hace que el grado de precisión de las líneas que separan las diferentes categorías de terreno en cualquiera de los aspectos analizados dependa de la densidad de información con la que se contaba al momento de hacer estos mapas. Por eso, estos límites entre sectores no pueden tomarse como líneas invariables sino que deben considerarse más bien zonas de transición entre un tipo y otro, que están sujetas a revisión conforme se cuente con mayor información específica.

- **Relación de los resultados con la tabla del SENARA de usos del terreno según la vulnerabilidad**

Al referir los resultados de este estudio con la tabla de vulnerabilidad del SENARA vigente a la fecha de preparación de este trabajo, se puede ver que no hay contradicción entre ambos. En el presente estudio aplican las mismas restricciones y recomendaciones que se indican en la tabla de vulnerabilidad del SENARA.

- **Áreas adecuadas para la construcción de pozos**

Con base en las características hidráulicas de las formaciones rocosas se puede decir que los sitios más adecuados para la construcción de pozos de mayor producción se localizan dentro de las unidades aluviales. La ubicación de pozos futuros para el desarrollo debería tomar en cuenta esa condición como primer requisito. Como segunda fase se podrían hacer análisis específicos en un sector determinado utilizando otros métodos como la prospección geofísica o perforaciones exploratorias a fin de determinar los mayores espesores de capas potencialmente más productoras como las formadas por gravas y arenas.

Con la información de pozos disponible a la hora de la preparación de este trabajo se trató de identificar los sitios de mayor espesor acuífero dentro de la unidad aluvial en las cuencas de Diríá y de Andamojo. La información no es tan densa como se hubiera deseado, pero con esos datos existentes se logró visualizar al menos una primera sectorización de estas áreas. Estos sectores se señalan en los respectivos mapas de líneas isofreáticas hechos para cada una de esas dos cuencas.

La definición de esas áreas tomó también en cuenta la condición de que estas áreas no estén ubicadas inmediatamente aguas abajo de los centros de población, ya que los mismos podrían llegar a ser fuentes potenciales de contaminación, sobre todo por el efecto de los tanques sépticos.

REFERENCIAS

- Alvarado, ME. 1984. "Complejo de Nicoya" en Sprechmann P. (ed.) "Manual de Geología de Costa Rica. Volumen 1: Estratigrafía". Editorial Universidad de Costa Rica. Montes de Oca.
- Foster S, Hirata R, Gomes D, D'Elia M, París M. 2002. "Protección de la calidad del agua subterránea". Banco Mundial. Washington.
- Dengo, G. 1962. "Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica". Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica. San José.
- Herrera, J. 1980. "Hidrogeología de la cuenca del río Andamojo (Segunda Parte)". Informe parcial de la segunda etapa. Proyecto de Investigación de Aguas Subterráneas en la Península de Nicoya. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas (SENAS, hoy SENARA). Departamento de Hidrogeología.
- Rodríguez HV. 1990. "Pruebas de bombeo en pozos AyA Santa Cruz". Dirección de Estudios y Proyectos, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. San José.
- Rodríguez HV. 1990 b. "Reporte sobre pruebas de bombeo de noviembre de 1990 en el pozo DI-223 Santa Cruz (Pozo AyA-BID No.1)". Dirección de Estudios y Proyectos, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. San José.
- Rodríguez HV. 2009. "Diagnóstico de la vulnerabilidad a la contaminación de cuatro acuíferos aluviales costeros del cantón de Santa Cruz, provincia de Guanacaste. Costa Rica". Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento. Dirección de Investigación y Gestión Hídrica. San José.
- Schosinsky 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. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Montes de Oca.
- Schosinsky G. 2006. "Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos". Revista Geológica de América Central, 34-35; 13-20. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Montes de Oca.

ANEXO 1

Datos de los pozos de las tres cuencas de estudio
Fuente: Archivos SENARA

ANEXO 2

Reportes de los análisis bacteriológicos y físico químicos
de pozos en las tres cuencas de estudio.

Gráficos radiales de las características físico químicas
de las aguas analizadas.

Análisis bacteriológicos: Laboratorio J&M
Análisis físico químicos: Laboratorios Lambda

ANEXO 3

Datos y gráficos de las pruebas de infiltración en
las tres cuencas de estudio.

ANEXO 4

Reporte de los análisis de las propiedades físicas de los suelos.

Laboratorio de Recursos Naturales, Centro de Investigaciones
Agronómicas, Universidad de Costa Rica.