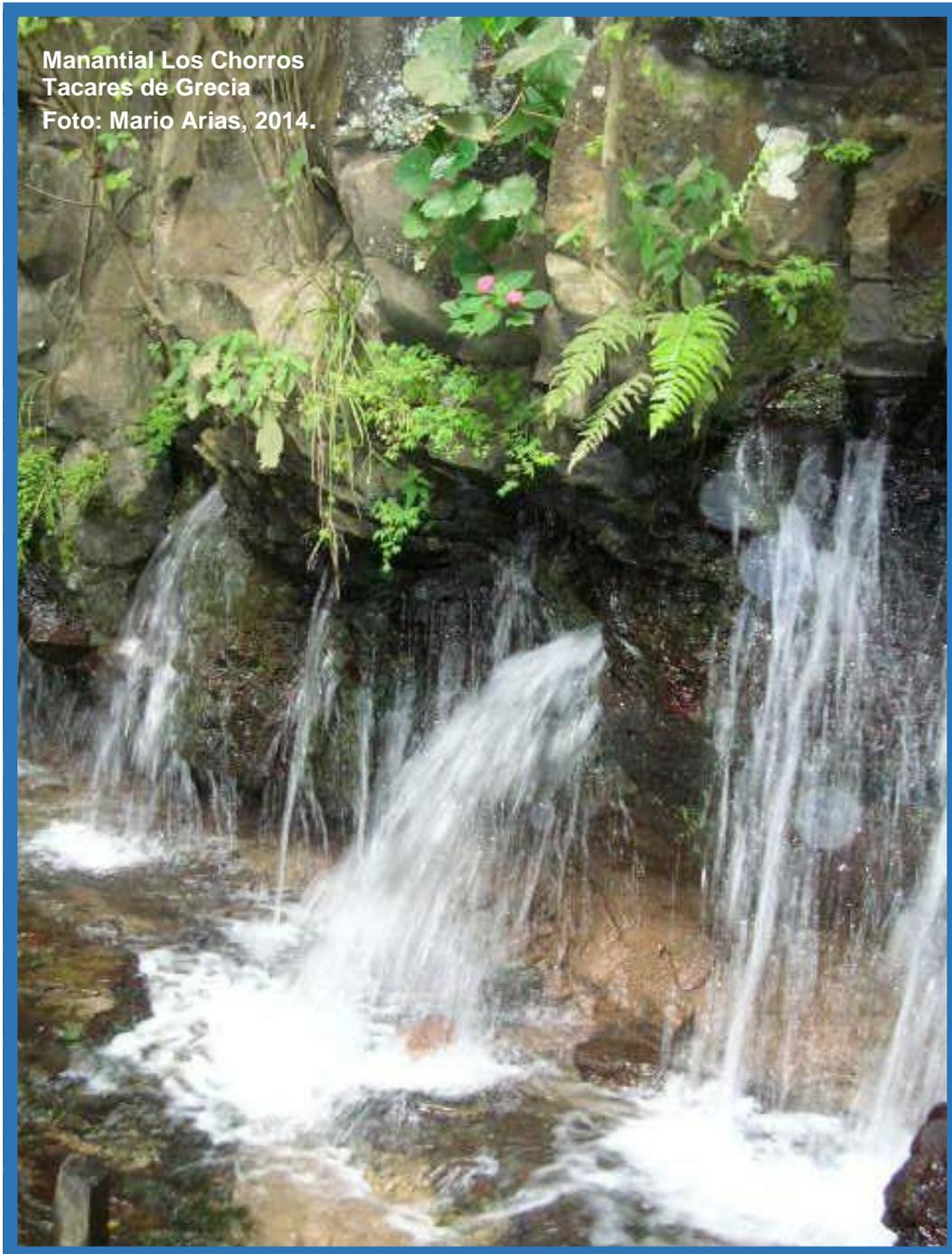




UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



ED-2873



Manantial Los Chorros
Tacares de Grecia
Foto: Mario Arias, 2014.

M
A
N
A
N
T
I
A
L
E
S

Mario Enrique Arias Salguero
2018

MANANTIALES

*“Agua de manantial, no hay
otra igual”.*

Proverbio español

*A los compañeros:
Ricardo, José Daniel, Juan, Carlos, colegas, y asistentes,
quienes a lo largo de estos años me han acompañado a visitar
tantos manantiales.*

Presentación

Manantiales, es una contribución al entendimiento de las fuentes de agua y del camino necesario para comprender su origen, con el fin de trasladar el conocimiento adquirido y su importancia a la sociedad.

En nuestro país, muchos de los entes encargados del abastecimiento público de agua potable aprovechan manantiales. La mayoría de ellos ubicado en regiones montañosas que captan acuíferos volcánicos fracturados, por ello; es necesario que estos entes comprendan la importancia de su origen, clasificación y medidas de protección efectiva que promuevan el mantenimiento de la calidad y cantidad del agua, reconociendo su valor como fuente de abastecimiento público de un alto porcentaje de nuestra población.

La comprensión de cada manantial, debe tomar en consideración la diversidad de condiciones hidrogeológicas de los acuíferos, tanto porosos como fracturados, y establecer soluciones técnicas basadas en el modelo conceptual hidrogeológico. Para ello, se requiere de una serie de estudios que sustenten dicho modelo establecido a partir del mejor criterio geológico posible, por lo tanto; es necesario la aplicación de nuevos enfoques basados en el conocimiento geológico, geomorfológico, estructural, litológico, geofísico e hidrogeoquímico del sitio de afloramiento de agua.

Manantiales, es un aporte del proyecto de Acción Social denominado: *La Cultura del Agua como instrumento para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico*, inscrito en la Universidad de Costa Rica, que enfoca uno de sus objetivos específicos a; *contribuir al fortalecimiento de la Cultura del Agua, por medio de la divulgación y capacitación con respecto a la situación de este recurso a nivel nacional, para que la información sea utilizada en la toma de decisiones.*

Con la intención de que este documento sea divulgado y utilizado por todos aquellos que lo requieran, se autoriza su reproducción, parcial o total, siempre y cuando se cite apropiadamente la fuente.

Índice

Contenido	Página
MANANTIALES	
Manantial	2
Clasificación de Manantiales	3
Ubicación, distribución y temporalidad	3
Medios porosos y medios fracturados	3
Litología	5
Tipo de descarga	6
Caudal	10
Tipo de captación	10
ESTUDIOS EN MANANTIALES	
Nuevas líneas de investigación	15
Aforos	17
Pruebas de infiltración	19
Protección de Manantiales	21
La Gestión del Riesgo en los Manantiales	24
CASOS DE ESTUDIO	
Manantial Los Chorros, Grecia	29
Manantial Celedonio, Cartago	34
Manantial Quebrada Bonita, Acosta	38
Manantial Monserrat, San Ramón	44
Manantiales Río Cuarto	48
Manantial de la Basílica, Cartago	51
Referencias	60



MANANTIALES

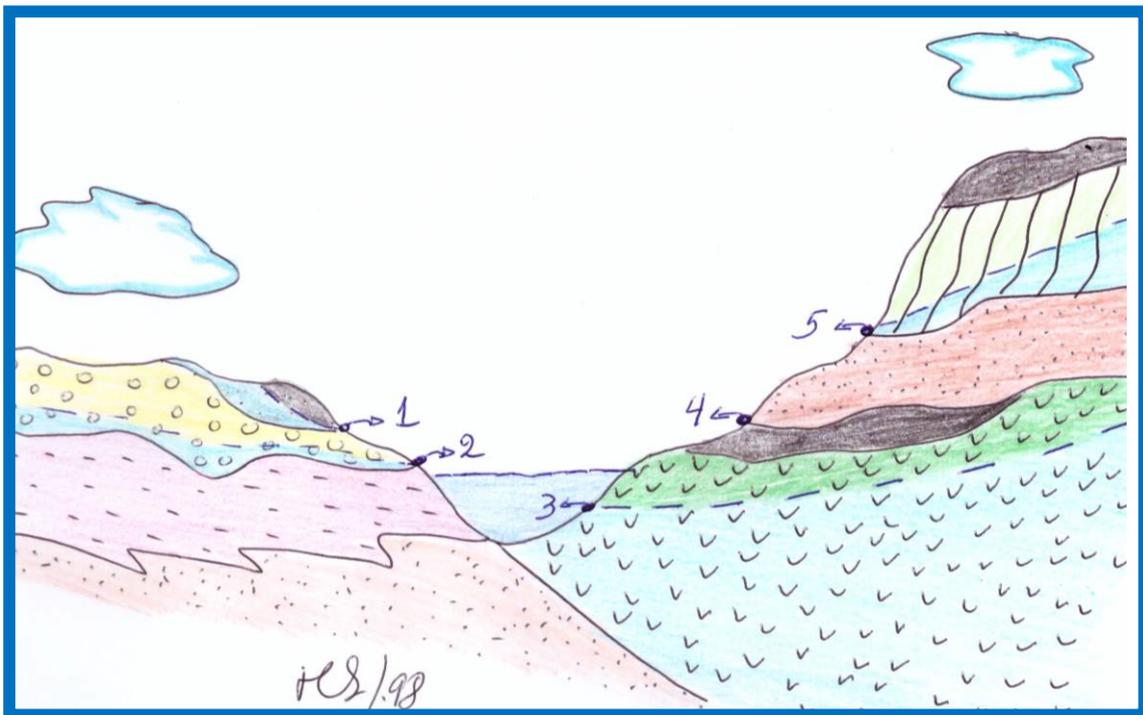
Nacimiento de las aguas cristalinas

Manantial

Es conocido como naciente, fuente, brote, ojo de agua. Es la salida o descarga natural del agua subterránea proveniente de un acuífero.

Agua Subterránea	Acuífero
Es el agua que se encuentra en los poros y fracturas de las rocas, la gran mayoría de ella es producto de la infiltración del agua de lluvia en el suelo, y en algunos otros casos por interacción de lagos y ríos con los reservorios del agua subterránea.	Es el reservorio de agua subterránea y consta de un estrato, formación o elemento geológico saturado que permite la circulación del agua por sus poros y fracturas, a partir de donde el ser humano la aprovecha para satisfacer sus necesidades por medio de pozos y manantiales.

El manantial puede estar constituido por uno o más afloramientos de agua y surgir tanto en superficie como por debajo de un nivel de agua de un río, lago o incluso del mar.



Dibujo que muestra diversos tipos de manantiales: 1: Manantial intermitente producto de un acuífero colgado. 2: Manantial de un acuífero libre en rocas tipo aluvión que descarga en el río. 3: Manantial de un acuífero confinado en lavas que descarga como flujo base del río. 4: Manantial de un acuífero semiconfinado en rocas tipo tobas. 5: Manantial en un acuífero libre en rocas tipo lavas fracturadas. Dibujo: Mario Arias, 1998.

Clasificación de Manantiales

Los manantiales se pueden caracterizar en función de su ubicación, origen, caudal, calidad, tipo de captación entre otros, veamos algunas de estas categorías.

Ubicación, distribución y temporalidad

Es la clasificación más sencilla, tal y como se detalla a continuación:

Ubicación	Distribución	Temporalidad
Ladera	Concentrado	Permanente
Fondo	Difuso	Intermitente (no permanente)

En los manantiales de ladera, el agua aflora hacia la superficie por efecto de la gravedad; mientras que en los manantiales de fondo, el agua aflora en forma ascendente hacia la superficie por efecto del confinamiento del acuífero, que está a una presión mayor a la atmosférica.

Si el afloramiento de agua es en un solo punto y sobre un área pequeña, se considera un manantial concentrado y cuando aflora el agua por varios puntos en un área mayor, es un manantial de tipo difuso.

La temporalidad del manantial, tiene que ver con el lapso en el cual el agua aflora en el sitio. Si el manantial mantiene caudal a lo largo de todo el año, se considera un manantial permanente. Por el contrario; si solamente aflora agua en algunos meses del año se considera intermitente.

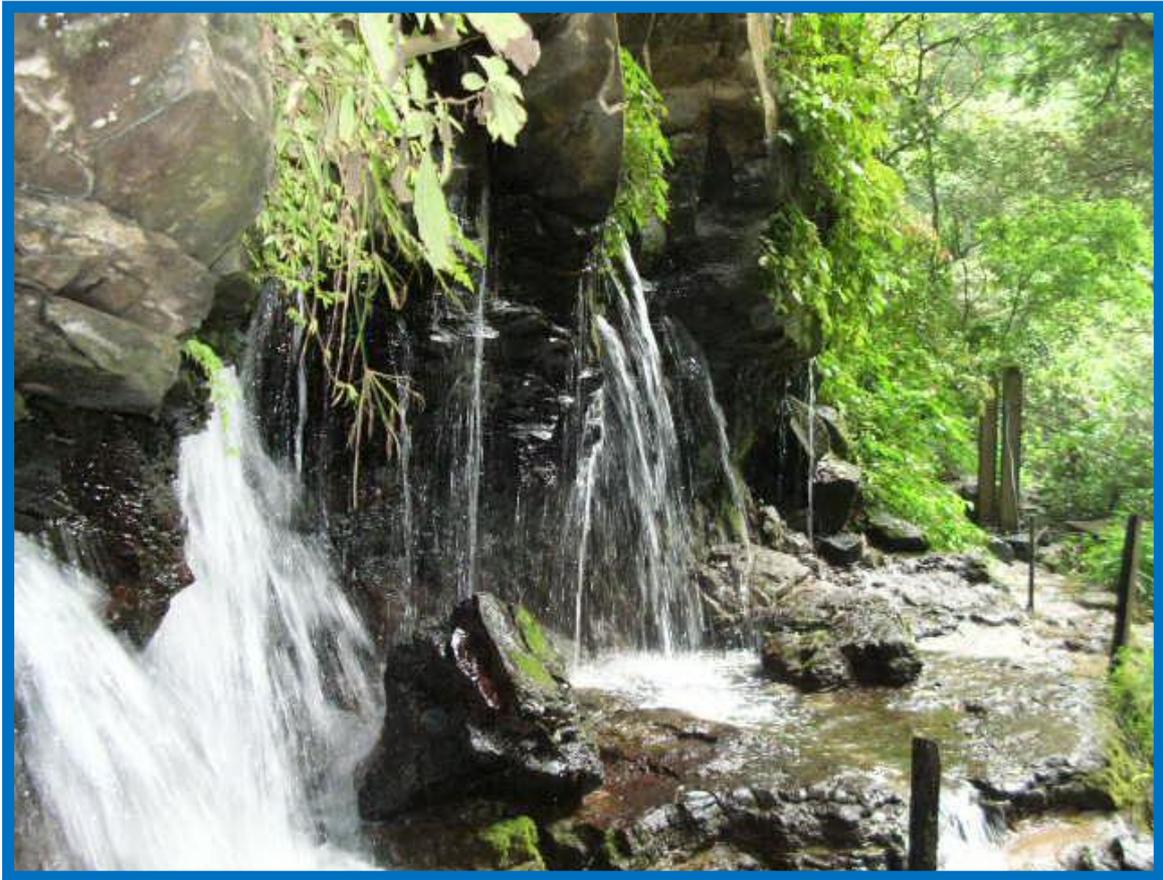
Medios Porosos y Medios Fracturados

Como el manantial es la descarga natural del agua subterránea que se almacena y viaja en el acuífero, una manera de clasificarlos es en función de cómo se moviliza dentro de los poros y/o fracturas de las rocas.

En los manantiales de medios porosos, el agua subterránea viaja preferencialmente entre los espacios vacíos e interconectados de las rocas porosas (sedimentarias y volcánicas tipo piroclastos como las tobas). En los manantiales de medios fracturados, el agua viaja preferencialmente entre las fracturas, independientemente del origen de estas, ya sea de enfriamiento (por ejemplo en rocas tipo ignimbritas), por diaclasamiento debido a esfuerzos tectónicos (por ejemplo en rocas tipo lavas) o por disolución (por ejemplo en rocas calizas).



Manantial en Medios Porosos. Grecia de Alajuela. Foto: Mario Arias, 2009.



Manantial en Medios Fracturados. Grecia de Alajuela. Foto: Mario Arias, 2014.

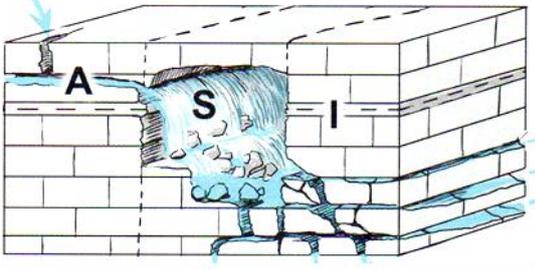
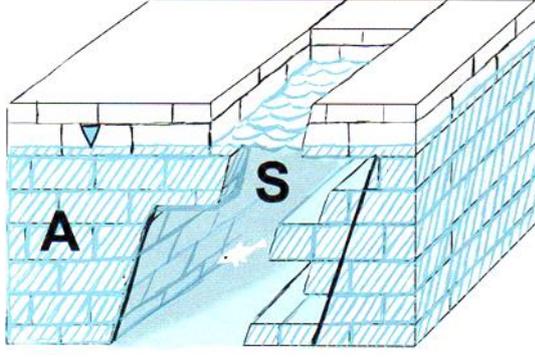
Litología

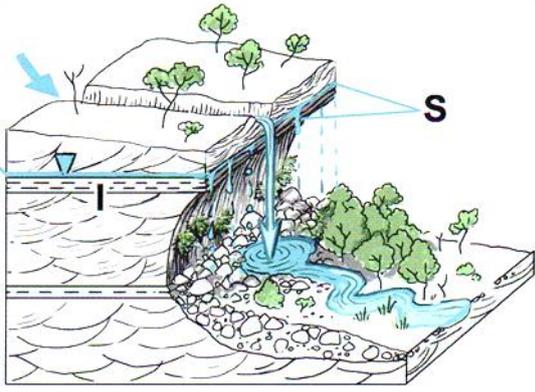
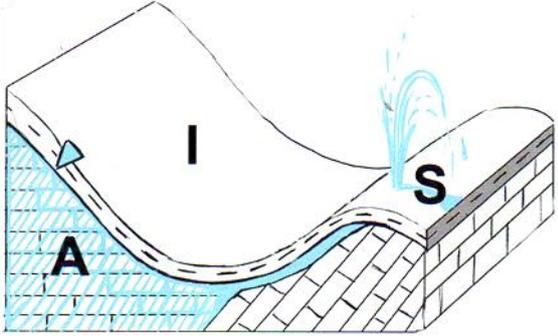
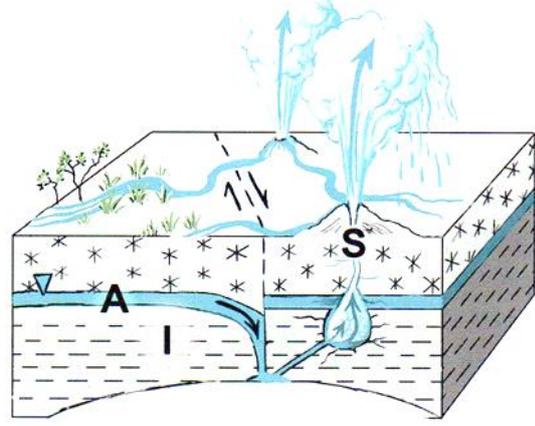
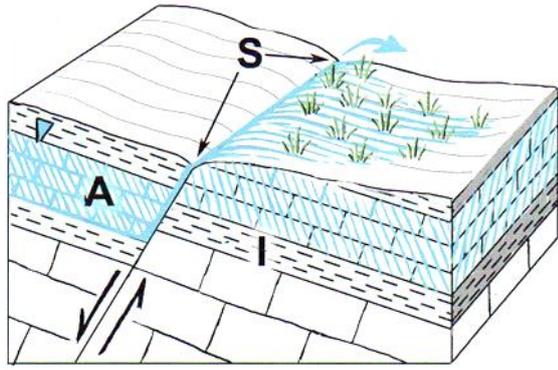
La clasificación en función del tipo de roca en que afloran, fue propuesta por Tolman en 1937, es meramente geológica y contempla los tres grandes tipos de rocas:

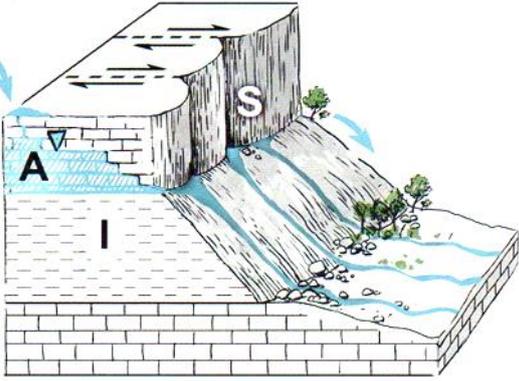
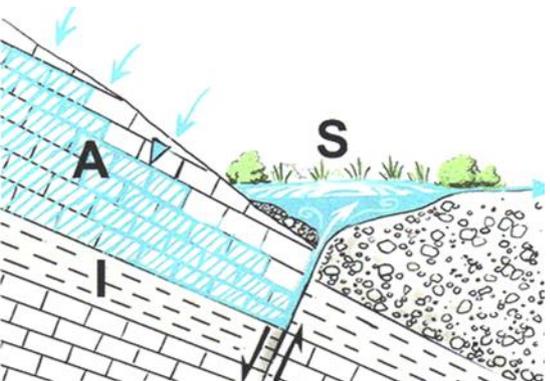
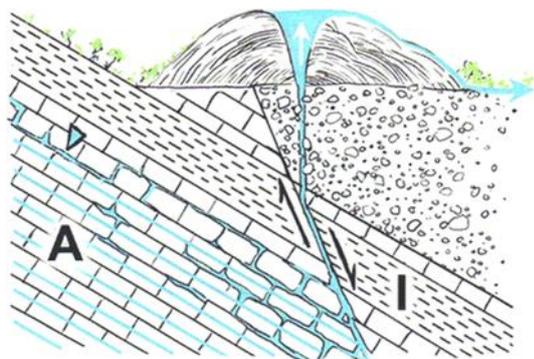
- Manantiales aflorantes en rocas sedimentarias: areniscas, calizas, aluviones, entre otras.
- Manantiales aflorantes en rocas plutónicas: para Costa Rica corresponderían principalmente a lavas producto de emisiones de los volcanes.
- Manantiales aflorantes en rocas metamórficas: poco frecuentes en nuestro país, a excepción de algunas cornubianitas que son malas productoras de agua.

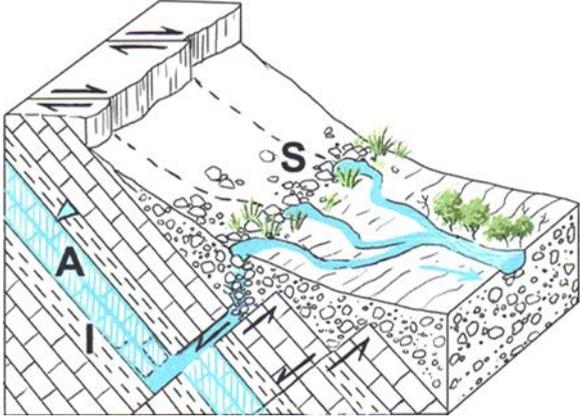
Tipo de Descarga

La clasificación de manantiales en función del tipo de descarga, contempla el contexto hidrogeomorfológico así como los micro-hábitats y ecosistemas. El objetivo de esta clasificación está orientado a la conservación y gestión de los ecosistemas de manantiales. La siguiente tabla detalla las características geológicas principales de cada tipo.

Tipo de manantial	Características geológicas principales	Dibujo
Caverna	Característicos de ambientes calcáreos, son los manantiales que emergen dentro de una caverna y no están directamente conectados con un flujo superficial.	
Expuesto	Cuevas, fracturas o sumideros donde el acuífero no confinado está expuesto cerca la superficie.	
Tubo	Flujo de fuente concentrado que brota de una pared de un acantilado, producto de un acuífero no confinado.	

<p>Jardines colgantes</p>	<p>El flujo por goteo, emerge generalmente horizontalmente a lo largo de un contacto geológico sobre la pared de acantilado producto de un acuífero no confinado.</p>	
<p>Fuente</p>	<p>Fuente artesiana con dióxido de carbono (CO₂) presurizado en un acuífero confinado.</p>	
<p>Geyser</p>	<p>Flujo explosivo de agua caliente de un acuífero confinado.</p>	
<p>Suamos (Helocrene)</p>	<p>Emerge como humedales de bajo gradiente; presenta a menudo fuentes indistintas o múltiples que nace desde acuíferos poco profundos y no confinados.</p>	

<p>Manantial en pendiente (Hillslope)</p>	<p>Emerge de acuíferos confinados o no confinados en una ladera (30-60 grados de pendiente); a menudo múltiples fuentes.</p>	
<p>Zona boscosa (Hypocrene)</p>	<p>Un manantial cubierto donde el flujo no llega a aflorar a la superficie, debido a una descarga muy baja y alta evaporación o transpiración.</p>	
<p>Piscinas (Limnocrene)</p>	<p>Acumulaciones en forma de piscinas, producto del surgimiento de agua por diversas estructuras geológicas, puede darse en acuíferos confinados o no confinados.</p>	
<p>Formación de cerros</p>	<p>Emerge de un montículo mineralizado, frecuentemente en sistemas magmáticos o de falla, pueden ser calientes y emitir cantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂).</p>	

<p>Canales de humedad (Rheocrene)</p>	<p>El agua que fluye, emerge en uno o más canales de transmisión.</p>	 <p>El diagrama ilustra un manantial en un terreno con una topografía que cambia. Se muestra un acuífero (A) que se eleva y luego desciende, creando un punto de salida (S) de agua a la superficie. Una capa impermeable (I) está presente debajo del acuífero. El agua fluye desde el acuífero hacia el manantial (S) y luego hacia la superficie. Se ven también flechas que indican el flujo de agua en el acuífero y en la superficie.</p>
--	---	---

Léase: A: acuífero, I: capa impermeable, S: manantial. Fuente: Springer & Stevens, 2009.

Otros parámetros geológicos que explican la existencia de manantiales, son:

- Cambios topográficos, que exponen en superficie el nivel de agua subterránea.
- Contactos entre diferente tipo de roca, en función de su porosidad, permeabilidad, grado de fracturamiento, que debido a las condiciones hidrogeológicas no permite que el agua siga almacenada o infiltrándose en las rocas.
- Estructuras geológicas como fallas y pliegues que facilitan el flujo de agua subterránea hacia la superficie.

Caudal

La clasificación según la cantidad de agua que descarga el manantial, fue propuesta por Meinzer en 1923 y está constituida por ocho grupos, según el siguiente cuadro.

Grupo	Caudal (Meinzer, 1923)	Caudal normalizado a l/s
Primero	Mayor a 2,80 m ³ /s	Mayor a 2800
Segundo	Entre 0,28 m ³ /s y 2,8 m ³ /s	Entre 280 y 2800
Tercero	Entre 28 l/s y 280 l/s	Entre 28 y 280
Cuarto	6,6 l/s y 28 l/s	Entre 6,6 y 28
Quinto	40 l/min y 400 l/min	Entre 0,66 y 6,6
Sexto	4 l/min y 40 l/min	Entre 0,06 y 0,66
Séptimo	0,5 l/min y 4 l/min	Entre 0,0083 y 0,06
Octavo	Menor a 0,5 l/min	Menor a 0,0083

Donde:

s = segundo
min = minuto
l = litro
m³ = metro cúbico

La fluctuación del caudal de un manantial depende de la cantidad de recarga por lluvia, la geometría de la zona de recarga y de los parámetros propios del acuífero (tipo de suelo, velocidad de infiltración del agua, tipo de acuífero entre otros), además del efecto de descarga artificial (pozos) y de la impermeabilización y/o deforestación en las zonas de recarga.

Tipo de Captación

La clasificación en función del tipo de captación del manantial depende del tipo de la fuente y de la calidad y cantidad de agua. El diseño de cada estructura tendrá características típicas, por ejemplo:

Cuando la fuente de agua es un manantial de ladera y concentrado, la captación propiamente dicha o protección del afloramiento de agua consta de una losa de concreto que cubre toda la extensión del área adyacente al afloramiento de modo que no exista contacto con el ambiente exterior, quedando así sellado para evitar la contaminación.



Fotografía de un manantial de ladera concentrado, en la cual se aprecia la estructura de captación. Manantial El Altar, Sarapiquí. Foto Mario Arias, 2012.

Si se considera como fuente de agua un manantial de fondo y concentrado, la estructura de captación podrá reducirse a una cámara sin fondo que rodee el punto donde el agua brota. Generalmente, la misma captación sirve para almacenar el agua y regular el caudal a utilizarse.

Si estamos en presencia de manantiales difusos, cercanos unos a otros, generalmente se construyen varias captaciones interconectadas hacia un tanque de recolección en el cual se trata el agua con cloración y se inicia la línea de conducción.



Fotografía de manantiales difusos de fondo, en la cual se aprecian varias captaciones de agua subterránea. Manantial Las Gemelas, Sarapiquí. Foto Mario Arias, 2012.

En función de la seguridad de la infraestructura de captación se utiliza la siguiente clasificación; implementada por el suscrito desde el año 2009:

- Muy bueno: la captación tiene malla de protección perimetral que limita el acceso gracias al candado. Se cuenta con rotulación preventiva y de vigilancia de la infraestructura. El área alrededor está limpia de basura. La captación es de cemento, está pintada, no presenta fugas, las tapas cuentan con candado. Se respeta el caudal ecológico, hay desviación de aguas pluviales.
- Bueno: tapa con candado, captación de cemento, sin fugas, desviación de aguas pluviales.

- Regular: captación de cemento con tapa.
- Malo: captación rústica sin seguridad.



**Fotografía de la captación del Manantial Santa Fe, Guatuso. Obsérvese la malla perimetral de protección, el enchape en cerámica de la captación e incluso se encuentra techada.
Foto Mario Arias, 2018.**



Fotografía de captación rudimentaria de un manantial en Cachí. Foto: Mario Arias, 2015.



Camino al Manantial Los Berros, Upala. Foto: Ricardo Pastrana, 2018.



Camino a los Manantiales Maleku, Guatuso. Foto: Ricardo Pastrana, 2018.

ESTUDIOS EN MANANTIALES

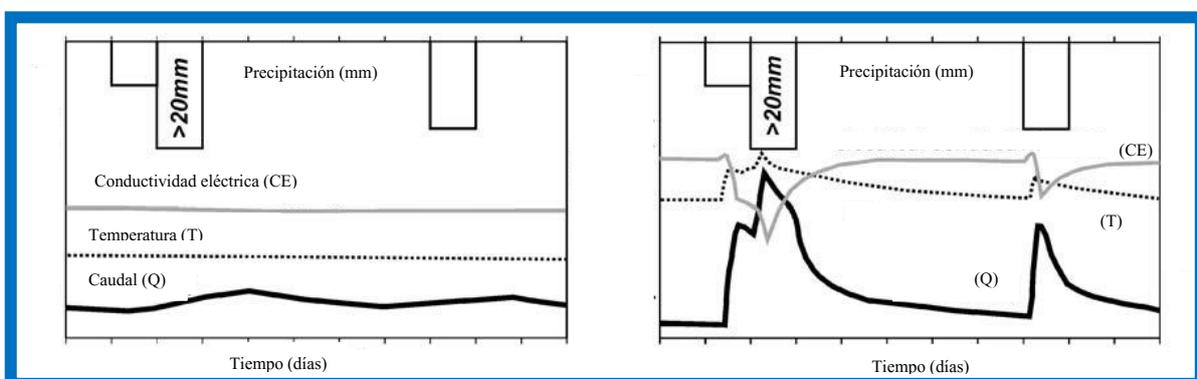
*Camina hasta la fuente para comprender su
origen.*

La comprensión de cada manantial, debe tomar en consideración la diversidad de condiciones hidrogeológicas de los acuíferos, tanto porosos como fracturados, y establecer soluciones técnicas basadas en el modelo conceptual hidrogeológico. Para ello se requiere de una serie de estudios que sustenten dicho modelo establecido a partir del mejor criterio geológico posible y no únicamente a partir de perforaciones exploratorias que en la gran mayoría de los casos son improcedente por el costo, acceso al sitio y trámites administrativos en los que se enfrascan las diversas instituciones estatales de nuestro país.

Nuevas líneas de investigación

En nuestro país, muchos de los entes encargados del abastecimiento público de agua potable aprovechan manantiales, la mayoría de ellos ubicado en regiones montañosas que captan acuíferos volcánicos fracturados y en los que las pruebas de bombeo y otros datos como el nivel piezométrico no están disponibles. Razón por la cual; el estudio y delimitación de las zonas de protección utilizando los métodos basados en datos hidráulicos de los acuíferos y modelos numéricos a partir del flujo de medios porosos, no deben ser aplicados técnicamente.

Por el contrario; es necesario considerar parámetros fisicoquímicos como: temperatura, conductividad eléctrica, iones mayores presentes en el agua, el grado de turbidez, los cuales son muy útiles para caracterizar mejor el contexto hidrogeológico del sistema acuífero. De igual manera; los hidrogramas de descarga en el manantial, pueden ser utilizados para caracterizar el tiempo de recarga, la variación temporal y su grado de vulnerabilidad.



Ejemplo hipotético de hidrograma de descarga de manantial. El primero muestra una baja vulnerabilidad del manantial y el otro una alta vulnerabilidad del manantial, debido a la rápida respuesta de los parámetros de conductividad eléctrica, temperatura y caudal con respecto a la recarga producto de la precipitación.

El hidrograma anterior, muestra como en uno de los manantiales, después de eventos intensos de precipitación, se mantienen homogéneos los valores de temperatura, conductividad eléctrica y caudal, evidenciando que la recarga es regional y no está influenciada por precipitaciones de corto periodo y alta intensidad. Por el contrario; el otro hidrograma, muestra una respuesta directa de los parámetros fisicoquímicos del agua del manantial en función del régimen de precipitación, evidenciando una recarga directa y por ende un grado de vulnerabilidad mayor.

El estudio del agua subterránea en los medio fracturados debe diferenciarse de los estudios hidrogeológicos tradicionales en medios porosos. Tanto la dirección del flujo del agua, así como la vulnerabilidad y riesgo de contaminación en ambientes volcánicos típicos de medios fracturados está influenciada por el grado, intensidad, espaciamiento y continuidad de las fracturas de la roca por la cual viaja el agua subterránea y eso; no se debe obviar.

Debido a la gran diversidad de condiciones geológicas e hidrogeológicas de los medios fracturados, no es posible delinear zonas de protección para los manantiales utilizando un único método, ni haciendo rotaciones del tubo de flujo de manera arbitraria. Por lo tanto; es necesario la aplicación de nuevos enfoques basados en el conocimiento geológico, geomorfológico, estructural, litológico, geofísico e hidrogeoquímico del sitio de afloramiento de agua.

Diversos autores a nivel internacional, entre ellos: Barton et al., (1999), Baumle; et al., (2001); Becker, et al., (2003); Berkowitz (2002); Bensson (1990); Bradbury (2002); Dubois (1991); Gentry & Burbey (2004); JamLaier (1975); Krasny et al., (2003); Lipfer et al., (2004); Maloszewski et al., (1999); Marechal (1998); Pochon & Zwahlen (2003); Pochon, et al., (2003, 2006 y 2008), Robinson & Barker (2000), han desarrollado metodologías para el estudio del agua subterránea en medios fracturados, considerando elementos como el flujo (a partir de trazados químicos o biológicos), vulnerabilidad hidrogeológica, descarga de manantiales y delimitación de zonas de protección de nacientes.

Se presentan a continuación, algunos de los estudios tanto clásicos como innovadores que hay que comenzar a implementar en los manantiales de nuestro país, no solo para comprender su funcionamiento, sino también para que sirvan como insumo en el proceso de gestión que desarrollan los diversos entes operadores de acueductos, en beneficio de la calidad y cantidad del recurso y en el mantenimiento y mejoras de la calidad de vida de los usuarios abastecidos.

Aforos

El conocimiento de la variación del caudal que produce un manantial, es de suma importancia en los estudios hidrogeológicos y para la gestión misma del ente operador del servicio de agua potable. De acuerdo con la calidad y la cantidad de los registros de caudales necesarios, las mediciones se pueden hacer de una manera continua o de una manera puntual e instantánea, las mediciones continuas de caudales requieren de la instalación de una estación medidora o de una estación registradora. Las mediciones aisladas, puntuales o instantáneas, se realizan en determinados momentos en que se desee conocer la magnitud del caudal producido por la fuente de agua. Existen diferentes métodos, y dentro de cada uno de ellos variaciones que dependen del cuerpo de agua que se va a medir, a continuación se describirá el procedimiento básico del aforo volumétrico por considerarse el de uso más común para cuantificar un manantial.

El aforo volumétrico con balde, es el método utilizado preferencialmente para la determinación del caudal en los manantiales, es funcional para pequeños y medianos caudales.

El aforo volumétrico consiste en medir el tiempo que dura el agua en llenar un recipiente de volumen conocido, para lo cual el caudal es fácilmente calculable con la siguiente ecuación: $Q=v/t$. El procedimiento de campo es muy sencillo:

- Una persona, debe utilizar un cronometro, otra persona debe mantener el recipiente de volumen conocido cerca de la salida del flujo de agua del manantial. Con una buena coordinación, se coloca el recipiente en el chorro de agua del manantial y simultáneamente se activa el cronometro. Este proceso finaliza en el momento en que el agua llegue a la marca del recipiente y se desactiva el cronometro inmediatamente.
- El resultado de este procedimiento es el caudal (Q) y se determina a partir de la razón entre: el volumen de llenado (v) dividido entre el tiempo de llenado (t). El mismo; debe ser repetido cinco veces, de esta manera se verifica si el flujo es constante o variable.
- Para su registro, se debe completar la siguiente tabla.

TABLA PARA AFORO VOLUMÉTRICO

Nombre del Acueducto: _____

Nombre del Manantial: _____

Nombre del Funcionario: _____

Fecha: _____ Volumen del recipiente: _____ litros

PRUEBA	TIEMPO DE LLENADO DEL RECIPIENTE
1	
2	
3	
4	
5	
Promedio (segundos)	

Caudal: $Q = v/t =$ _____ litros / _____ segundos = _____ l/s

Las fotografías siguientes ilustran del procedo de aforo de un manantial con el método volumétrico.

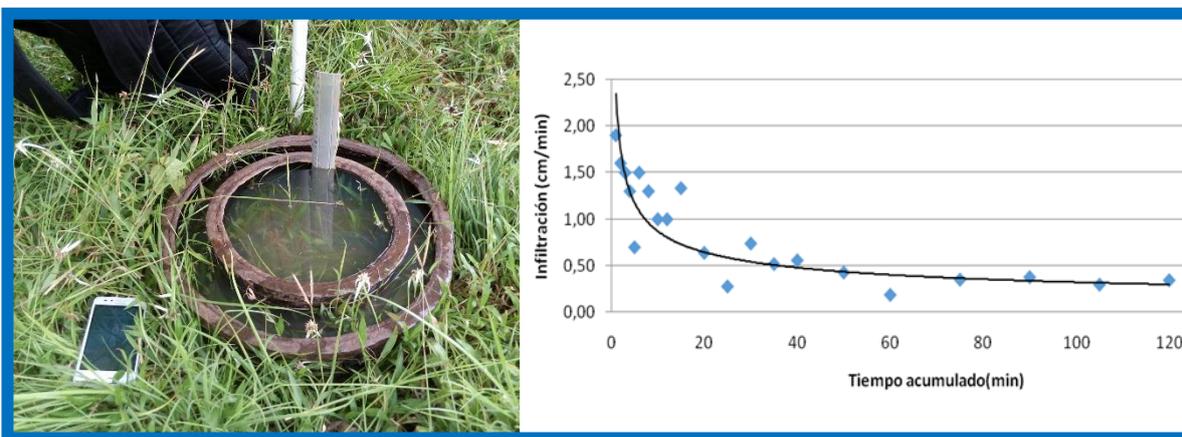


Fotografías del proceso de aforo de la Naciente La Poma. Foto: Ricardo Pastrana, 2018.

Prueba de infiltración

La infiltración es; el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cobertura vegetal, las propiedades del suelo, tales como porosidad y conductividad hidráulica y el contenido de humedad presente en él. Para determinar la infiltración de campo, se utilizan diferentes metodologías en función del objetivo. Como en gran medida el objetivo es determinar cuánto del agua de lluvia se recarga en el área de influencia del manantial, y cuál es la velocidad de un potencial contaminante que viaje en agua por el suelo hasta llegar al manantial, se utiliza la metodología de prueba de infiltración con doble anillo.

Este ensayo se realiza en el campo, generalmente algunos metros aguas arriba del manantial. Para tal efecto; se introducen los anillos en el suelo con una regla graduada y se agrega agua hasta una elevación de referencia. A partir de los tiempos establecidos en la tabla siguiente que se adjunta, se mide la altura de la columna de agua en el anillo interior. Así se obtiene la tasa de infiltración, que al graficarse se puede correlacionar y estimar ese valor de infiltración constante como la permeabilidad del suelo, asumiendo un gradiente hidráulico completamente vertical, debido al grado de saturación del medio.



Fotografía de una prueba de infiltración de doble anillo, y su respectiva gráfica en la cual muestra la velocidad de infiltración de agua en el suelo en función del tiempo de la prueba. Datos de la Fuente 1 de Bijagua en Upala. Foto Mario Arias, 2018.

El valor de la permeabilidad del suelo, es de gran utilidad para estimar la recarga potencial de agua al acuífero que alimenta ese manantial, así mismo; para estudios de tránsito de contaminantes, especialmente para el análisis del riesgo de contaminación por coliformes fecales producto de la instalación de tanques sépticos en las inmediaciones del manantial.

**TABLA PARA LA PRUEBA DE INFILTRACION
METÓDO DE DOBLE ANILLO**

Fecha: _____ Lugar: _____

Código de la Prueba: _____ Coordenadas: _____

Características del suelo: _____

Tiempo	Diferencia tiempo	Lectura (cm)	Cambio lectura (cm)	Lectura acumulada (cm)	Infiltración (cm/h)
0					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
8					
10					
12					
15					
20					
25					
30					
35					
40					
50					
60					
75					
90					
105					
120					

Investigador: _____ Proyecto _____

Protección de Manantiales

La protección del agua subterránea, se realiza de una manera diferenciada en función de la escala de trabajo, sea a nivel de acuífero o a nivel de manantial. En el primer caso, lo que corresponde es la elaboración del mapa de vulnerabilidad, mientras que en el caso de manantiales lo que procede es la determinación de los tubos de flujo y delimitación de las zonas de protección.

La zona de protección de un manantial, puede ser definida como el área de captura de la recarga (tubo de flujo), es decir; el perímetro en el que la recarga al acuífero será captada por el manantial de abastecimiento de agua en consideración.

La delimitación de los perímetros de protección de los manantiales puede ser realizada utilizando una amplia variedad de métodos, cuya selección dependerá fundamentalmente del contexto hidrogeológico y de la disponibilidad de los datos, algunas de estas metodologías son:

El método analítico, descrito por varios autores (Tood, 1980; Fetter 1994; Mc Whorter & Sunada, 1999; recopilado y ejemplificado en Vargas 2002). Se aplica dependiendo del régimen de acuífero (ya sea libre o confinado) y se calcula el ancho máximo de la zona de captura (tubo de flujo) en el sentido perpendicular a la dirección de flujo del agua subterránea, así como el punto de no retorno de aguas abajo del manantial en sentido de la dirección de flujo. Los modelos analíticos están basados en la ecuación del flujo del agua en medios porosos, por eso están limitados por varias hipótesis que restringen su uso en condiciones hidrogeológicamente complejas, incluyendo la necesidad imperiosa de datos hidráulicos del acuífero que abastece al manantial, no estando disponibles en muchos de los casos; por ejemplo cuando se está en presencia de acuíferos fracturados o cuando se captan manantiales de acuíferos colgados muy superficiales.

El método de las isócronas, utiliza como criterio el tiempo de tránsito y evalúa el tiempo que un contaminante ideal (el agua) tarda en llegar al manantial que se desea proteger. Esta evaluación pretende definir zonas alrededor de las captaciones, para que el resultado de una actividad potencialmente contaminante tarde en llegar a la misma, un tiempo que permita su degradación o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal en la fuente de suministro a la población, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables.

La metodología de distancia arbitraria de radio fijo, es muy útil en casos donde se requiera dar una atención inmediata ante una contaminación inminente. En el artículo 31 de la Ley de Aguas, declara *“como reserva a favor de la Nación, las tierras que circundan los sitios de captación o tomas surtidoras de agua potable, en un perímetro no menor de doscientos metros de radio”*. En el artículo 149, de esta misma ley., se establece la prohibición de destruir, tanto en los bosques nacionales como privados, los árboles situados a menos de setenta metros de los manantiales que nazcan en cerros o a menos de cincuenta metros de los que nazcan en terrenos planos. Por su parte; la Ley Forestal en el artículo 33 señala como áreas de protección *“las áreas que bordean nacientes permanentes, definidas en un radio de cien metros medidos de modo horizontal”*.

Entre las ventajas de esta metodología arbitraria están:

- Existe en nuestro país, la norma jurídica que regula los radios de protección.
- Permite una atención inmediata ante una contaminación inminente.
- No requiere estudio técnico del sitio.
- El costo económico de su aplicación es mínimo.

Por su parte, las desventajas de su aplicación son:

- No es una medida regulatoria basada ni en la ciencia, ni en la técnica.
- No toma en consideración las características propias de cada manantial (origen, caudal).
- Delimita zonas que no necesariamente permiten una protección efectiva ante la contaminación y/o reducción del caudal.
- Tiende a generar conflictos por el uso del suelo, especialmente aguas abajo de la naciente.

El método hidrogeomorfológico, es recomendado para acuíferos volcánicos, con manantiales someros (Losilla, 1992). La definición del área de protección se basa en la divisoria de la cuenca hidrográfica donde se encuentra el manantial. En ella, se asume que los límites de la cuenca hidrográfica coinciden con los límites de la cuenca hidrogeológica. Con esta metodología, se sigue la curva de elevación topográfica más baja del manantial a ambos lados del mismo, hasta cruzar un río importante considerado como influente; a partir de esto se sigue por la divisoria de las sub-cuencas hasta unirse en su parte superior.

En la práctica; se recomienda hacer varias subdivisiones dentro de la zona de captación, ellas son:

El área interna de máxima protección es la zona operacional, que comprende un área pequeña de tierra alrededor del mismo manantial. No se debería permitir actividades que no estén relacionadas propiamente con la extracción de agua, e incluso estas actividades deberán estar celosamente evaluadas y controladas para evitar la posibilidad de que contaminantes alcancen directamente la zona de captación del manantial. La especificación de la dimensión de ésta área es arbitraria.

La zona de protección interna, tiene como objetivo la prevención de la contaminación patogénica de las captaciones de aguas subterráneas y es basada en la distancia equivalente a un tiempo de flujo horizontal específico. El tiempo empleado en nuestro país es de 70 a 100 días, mismo que corresponde al tiempo de persistencia de organismos patógenos en la zona no saturada de tipo granular y fracturada respectivamente (Losilla & Rodríguez, 1994).

La zona de protección exterior que puede ser definida para una fuente individual es su área de captura de la recarga en un acuífero libre (tubo de flujo). Este es el perímetro en el que toda la recarga del acuífero (proveniente de la precipitación y/o cursos de agua superficiales) será captada por la fuente de abastecimiento de agua en consideración. Las áreas de captura de la recarga son muy importantes no solo para la protección de la calidad sino también en términos de manejo del recurso, y en situaciones de explotación intensiva del agua subterránea se podrían usar como áreas de conservación (o reserva) del recurso para abastecimiento de agua potable.

Los factores clave que determinan la geometría de la envolvente de las zonas de captura de los manantiales son el régimen de recarga del acuífero y las condiciones de borde; sus formas pueden variar desde muy simples hasta altamente complejas. Las formas más complejas pueden ser el resultado de interacciones río-acuífero variables, límites geológicos o variaciones laterales en las propiedades hidráulicas. Por ejemplo, en los casos en que las fuentes de abastecimiento están localizadas a una gran distancia de los bordes del acuífero y/o cuando el caudal de extracción es pequeño, el gradiente hidráulico es pronunciado y la transmisividad es alta, se delimitan zonas de protección largas y angostas.

La Gestión de Riesgo en los Manantiales

Los sistemas de acueductos basados en la captación de manantiales presentan una serie de características que los hacen especialmente vulnerables, entre ellas: gran extensión geográfica, ubicación de muchos de sus componentes en zonas de amenaza natural, condiciones de diseño poco flexibles, la necesidad de funcionamiento continuo y de brindar el servicio de calidad.

La ubicación geográfica y tectónica de nuestro país, condiciona la existencia permanente de amenazas naturales, que junto con las antrópicas deben ser caracterizadas para gestionar su riesgo a partir del nivel de exposición.

Los sismos y erupciones volcánicas, así como los deslizamientos, tsunamis, flujos de lodo (lahares), las mismas inundaciones y los procesos erosivos son eventos geológicos de ocurrencia reiterada a lo largo de la historia del país. Los sistemas de agua potable en general, presentan diferente grado de afectación en función de la amenaza que los impacta, entre ellos:

Efectos de un terremoto:

- Destrucción parcial o total de las estructuras de captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y distribución (terremoto de Limón, 1991).
- Ruptura de tuberías de conducción y distribución, daños en las uniones entre tuberías o con tanques, con la consiguiente pérdida de agua (terremoto de Sámara, 2012).
- Modificación en la calidad del agua debido a deslizamientos asociados al terremoto.
- Variación (disminución) de caudal de las captaciones (pozos y manantiales).
- Cambio de sitio de salida de aguas de manantiales y/o cambio del nivel freático (terremoto de Cinchona, 2009).
- Daños por inundación costa adentro por impacto potencial de tsunamis.

Efectos de una erupción volcánica:

- Destrucción parcial o total de la infraestructura en las áreas de influencia directa de los flujos, generalmente restringidas al cauce de los drenajes que nacen en el volcán.

- Obstrucción por las cenizas en obras de captación, desarenadores, tuberías de conducción, floculadores, sedimentadores y filtros (volcán Turrialba, 2016).
- Modificación de la calidad del agua en captaciones superficiales y en reservorios abiertos por caída de ceniza.
- Contaminación de ríos, quebradas y pozos en zonas de depositación de lahares.

Efectos de un deslizamiento:

- Cambio de las características fisicoquímicas del agua que dificultan su tratamiento.
- Destrucción parcial o total de las obras de captación y conducción ubicadas sobre o en la trayectoria de deslizamientos activos.
- Contaminación del agua en las áreas de captación superficial en zonas montañosas.
- Taponamiento de los sistemas de alcantarillado por acumulación de lodo y piedras.



Fotografía que muestra la afectación en la estructura de captación de uno de los manantiales de la ASADA Patate, producto del movimiento del suelo. Foto: Ricardo Pastrana, 2018.

Efectos de una inundación:

- Destrucción total o parcial de captaciones localizadas en ríos y quebradas.
- Daños en estaciones de bombeo cercanas a cauces (Puerto Jiménez, 2016).
- Pérdida de captación por cambio de cauce del afluente.
- Contaminación del agua en las cuencas captadas.
- Falla de tuberías expuestas en pasos de ríos y quebradas.

Efectos de un huracán:

- Falla de tuberías debido a torrentes en pasos expuestos, tales como ríos y quebradas.
- Ruptura y desacoples de tuberías en zonas montañosas, debido a deslizamientos y torrentes de agua.
- Ruptura y daños en tapas de tanques y reservorios.



Afectación al techo de la estructura que resguarda al clorador de una naciente en Bijagua, producto de la caída de un árbol por efecto de las ráfagas de viento generadas por la Onda Tropical Nate. Foto: Mario Arias, 2018.

Efectos de la sequía:

- Disminución del caudal de agua superficial y subterránea.
- Acumulación de materia sólida en los sistemas de alcantarillado.
- Introducción de agua marina en acuíferos costeros, por efecto de regímenes de bombeo inapropiados en los pozos (acuíferos costeros de Guanacaste, 2016).

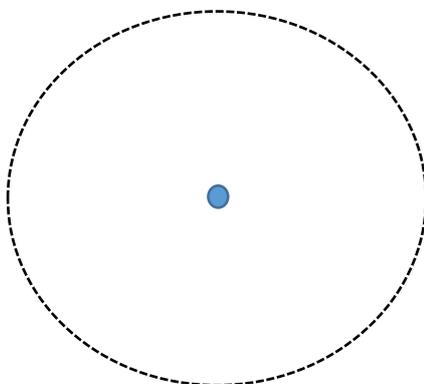
Efecto de amenazas antrópicas:

- Vandalismo de la infraestructura.
- Contaminación del agua (pozo AB-1089 contaminado con hidrocarburos, Barreal de Heredia, 2004).
- Incendios en infraestructura cercanas (Químicos Holanda en Limón, 2006).

Otras afectaciones comunes a todas estas amenazas son: los impactos indirectos debido a la suspensión de caminos, servicios eléctricos y comunicaciones. La necesidad de suministro de agua mediante camiones cisterna, con la consiguiente pérdida de calidad y aumento de costos.

Por este motivo, es indispensable el análisis de las amenazas naturales y antrópicas en las inmediaciones del manantial y su impacto en el sistema de acueducto. Desde el año 2009, estamos utilizando una guía de caracterización de manantiales, que incluye la identificación de las fuentes potenciales de contaminación en un radio de 100 m del manantial, tal y como se observa en el siguiente cuadro.

Determine la distancia al manantial de: cultivos, bosques, pastos, infraestructura u otros dentro de los 100 m de radio establecidos como zona de protección en la Ley Forestal.



Describa si el manantial presenta alguna amenaza antrópica o natural:

Presente y describa fotos del manantial

Por su parte; el reglamento de agua potable vigente (decreto 38924-S) incluye una guía de inspección del proceso de vigilancia de la calidad del agua, estando una de las fichas de campo enfocadas a los manantiales, en la cual se identifican algunos de los factores de riesgo en función de la infraestructura.



ASADA Medio Queso, 2018



ASADAS de Upala, 2018



ASADAS San Ramón, 2018



ASADA Rincón de la Vieja, 2018



Conferencia de Prensa en AyA, 2017



Consejo Municipal de San Ramón, 2018

Fotos: Diario Extra, 2017 y Ricardo Pastrana, 2018.

CASOS DE ESTUDIO

Trasladar el conocimiento al auditorio social.

MANANTIAL LOS CHORROS, GRECIA

Con el objetivo de comparar las características hidrogeológicas de los nacientes F1 y F2 dentro del área del Parque Recreativo Municipal Los Chorros en Tacares de Grecia, se realizó en el año 2013, una medición estadística de la orientación y rumbo de las fracturas de las rocas en las inmediaciones de cada manantial. Esto debido a que el agua subterránea que aflora en estas nacientes viaja por las fracturas de las rocas y por lo tanto; si se conoce la orientación preferencial de dichas estructuras se puede conocer la dirección de flujo del agua subterránea.

Naciente F1

El afloramiento donde se encuentra el manantial presenta dimensiones aproximadas de 30 m de ancho por 10 m de alto. La roca, está constituida por una colada de lava andesítico-basáltica, la cual en su parte basal es masiva de baja a medianamente fracturada; mientras que su parte superior está compuesta por una autobrecha de la misma composición, esta colada se ha asociado al miembro Colima Superior.



Naciente F1: Manantiales permanentes, difusos, de ladera, tipo tubo en el parque Los Chorros, donde el agua aflora en las zonas de contacto (línea roja) entre las rocas permeables en la parte superior (lavas fracturadas) y rocas poco permeables en la parte inferior (tobitas arcillitizadas). Foto: José Daniel López, 2013.

Naciente F2

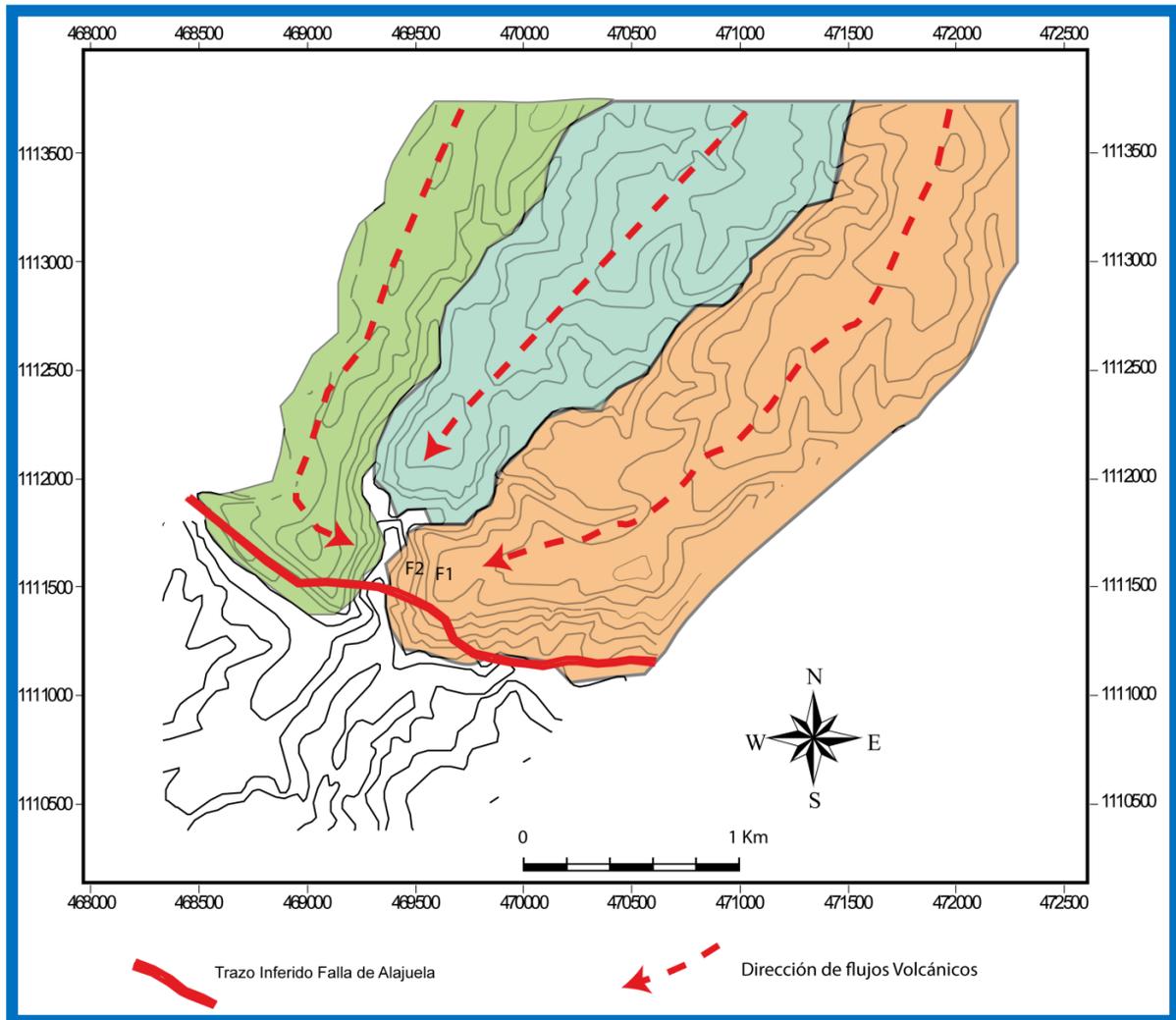
A diferencia del manantial anterior, el agua brota en una autobrecha, también correlacionada con el miembro Colima Superior, el afloramiento presenta dimensiones de 4 x 3 m, y tiende a colapsar con facilidad debido a que el afloramiento de agua tiende a “lavar” la escasa matriz de suelo que soporta a los clastos; debido a esto el agua a veces puede tender a salir con sedimentos y de color café claro.



Naciente F2, agua aflorando en el contacto de la autobrechas de la lava, con una capa inferior de tobita impermeable. Foto: Juan Vargas, 2013.

Ambos manantiales, se encuentran en la misma unidad geomorfológica, conformada por pendientes de entre unos 15° a 25°. Esta unidad se ha originado producto de la actividad volcánica, que generó coladas y otros depósitos con orientación SW.

A partir del mapa local de la geología, se evidencia que el agua subterránea en ambas nacientes (F1 y F2) se desplaza por medio de una misma colada de lava andesítico-basáltica, compuesta por una parte masiva de por lo menos 4 m de espesor, esta parte masiva está limitada por una autobrecha de colada.



Mapa que muestra los diferentes frentes de coladas de lava en el parque Recreativo Municipal Los Chorros. Obsérvese que tanto la fuente F1 y F2, son producto de la misma colada de lava.

En ambas nacientes, el agua tiende a aflorar debido a un contacto entre la colada de lava con un depósito de tobita arcillitizada poco permeable y de baja transmisibilidad (de acuerdo a lo visto en campo) que subyace a la colada y juega el papel de acuícludo en el área.

En general, el análisis de fracturas ha determinado que hay una tendencia de las mismas a poseer una dirección de rumbo aproximada Este – Oeste con buzamientos que presentan inclinaciones muy altas, superiores a los 80°. Esto condiciona, al menos en el sector de afloramiento del manantial, la dirección del flujo del agua, que aunado a la morfología de las coladas, evidencia que también la dirección de flujo del agua en la zona de afloramiento de estas nacientes (F1 y F2) es en dirección de este a oeste.

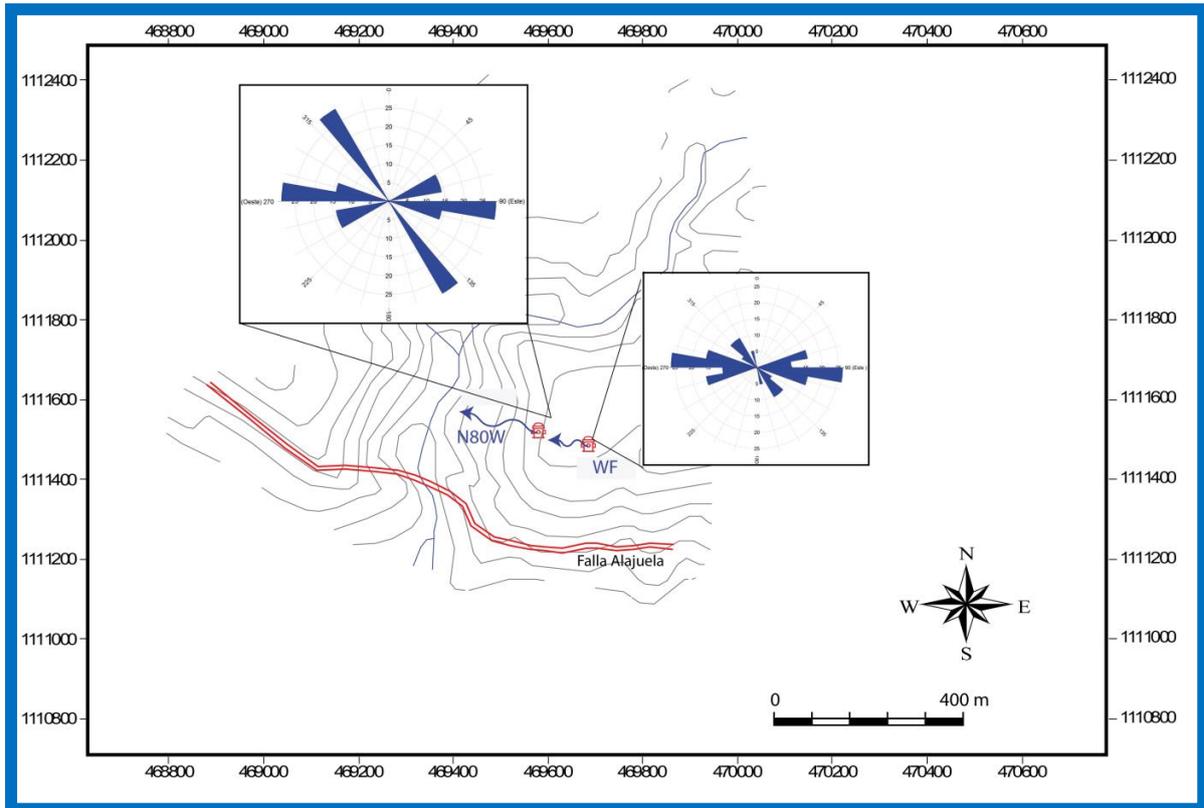


Figura 10: Mapa de rumbos de la zona de estudio, se presentan las direcciones de flujo de agua de las nacientes y los rumbos de las fracturas medidas, expresados en diagramas de rosas.

Las fracturas analizadas presentan una dirección paralela a la Falla de Alajuela, además de presentar un movimiento siniestral, lo que coincide con los desplazamientos observados en los ríos y quebradas de la zona.

En general; el análisis del macizo rocoso determinó que los sectores estudiados son muy semejantes con un espaciado de fracturas superior a los 40 cm, lo que genera poca densidad de fracturas, pero que es compensado por la continuidad de las mismas (que son métricas) y por su apertura que puede llegar a ser de hasta 5 cm.

Al comparar las características de los manantiales investigados en el Parque Municipal Recreativo Los Chorros, se obtiene la siguiente tabla resumen.

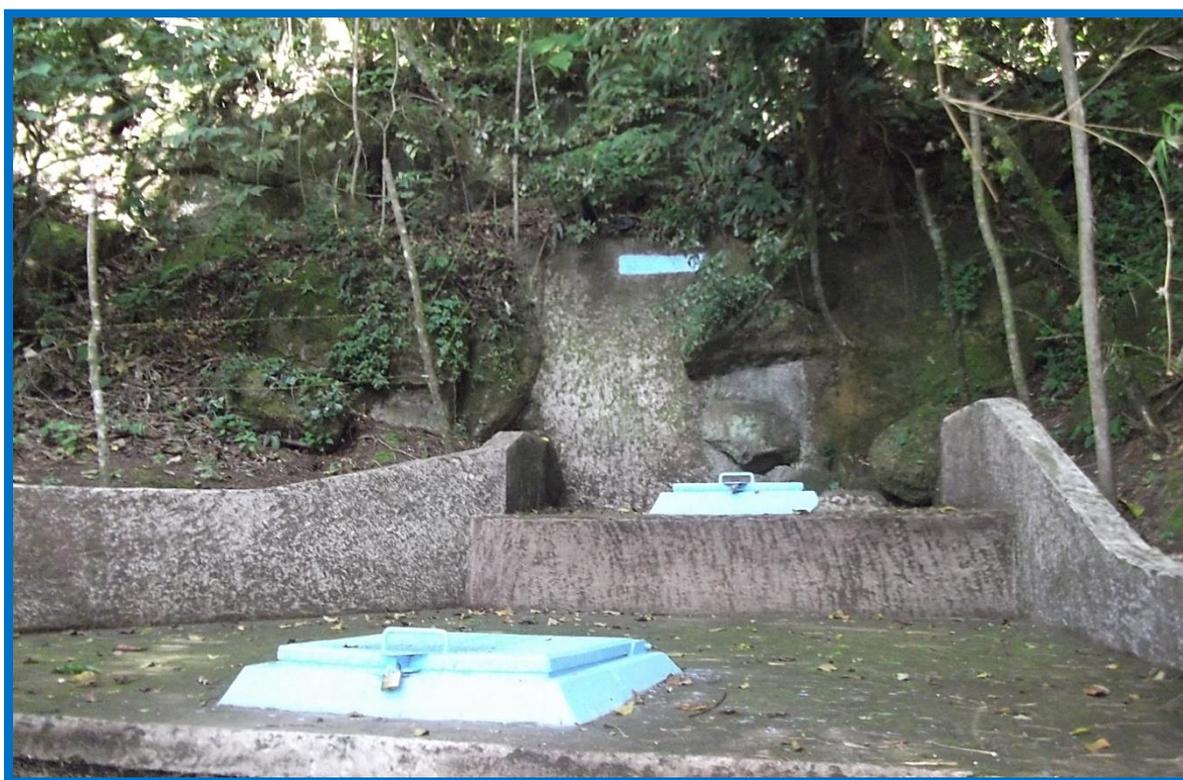
Resumen de las características de las nacientes F1 y F2.

	Naciente F1	Naciente F2
Unidad Geomorfológica	Laderas volcánicas moderadamente disectadas	Laderas volcánicas moderadamente disectadas
Litología	Lavas masivas y brechas andesíticas basálticas.	Brechas monomicticas andesíticas basálticas.
Unidad Geológica	Formación Colima Superior	Formación Colima Superior
Acuífero	Colima	Colima
Capa subyacente	Tobita arcillitizada	Tobita arcillitizada
Rumbo de Fracturas	101° (Aprox. Este- Oeste)	97°(Aprox. Este- Oeste)
Ángulo de Buzamiento	89	82
Espaciado de Fracturas	50 cm	40 cm
Continuidad de Fracturas	4 m	2 m
Abertura de Fracturas	2-5 mm	2-3 mm
Rugosidad de Fracturas	Plano-Rugosa	Plano-Rugosa
Relleno	Sin relleno	Sin relleno/suelo

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se concluye que ambas nacientes descargan agua proveniente de un mismo flujo local proveniente del Acuífero Colima, el cual se desplaza por el medio fisurado de una misma colada de lava con orientación SW y que por efecto de la Falla de Alajuela, el frente de ésta toma la dirección Este-Oeste, lo cual se ve reflejado en la geomorfología y en el análisis estadístico de las fracturas.

MANANTIAL CELEDONIO, CARTAGO

En el año 2016, se realizó un estudio de reconocimiento geológico del Manantial Celedonio, siendo captado por el acueducto municipal de Cartago, que permite el suministro de agua potable para las poblados más cercanos a dicha captación, adicionalmente parte del agua es utilizada en labores de riego para los campos de cultivos agrícolas ubicados alrededor de la misma. Esta naciente presenta la particularidad de que durante los meses de invierno es recurrente observar un cambio en las condiciones de coloración y turbidez del agua captada, principalmente después de los periodos de lluvias intensas, situación por la cual surgió la necesidad de investigar el causante de dichos cambios en las condiciones del agua.



Captación del manantial Celedonio, localizado en el Alto de Chinchilla en Cartago, obsérvese, al fondo, el afloramiento de rocas tipo lavas. Foto: Mario Arias, 2016.

Con el fin de realizar un reconocimiento general de la zona de captación, se evaluaron aspectos como la geología y los principales usos de suelo existentes en las zonas circundantes, además del levantamiento de datos correspondientes a las principales unidades de roca observadas en la zona, incluyendo la recolección de muestras para su posterior análisis petrográfico con el fin de determinar el tipo de roca aflorante, su composición y grado de alteración, entre otros aspectos. De igual manera, se procedió a realizar la toma de muestras de agua tanto en la zona de la captación como en algunas exposiciones de nivel freático que se ubicaron en el borde del cauce del río Chinchilla, esto con el objetivo de analizar desde el punto de vista bacteriológico y físico químicos la calidad del agua y posibles elementos que estén asociados con el cambio en la coloración y turbidez del agua. Adicionalmente al trabajo de campo, se llevó a cabo la búsqueda y consulta de información geológica disponible para el área de estudio, así como también la revisión de algunos registros de pozos cercanos a la zona en procura de obtener una mejor comprensión de las principales litologías que componen dicha área.

El área cercana a la naciente Celedonio, se caracteriza geológicamente por la presencia de dos diferentes litologías que corresponden básicamente con un amplio depósito tipo lahar, mismo que se halla aflorando de manera extendida tanto en la parte norte del área de estudio, como también en el extremo sur de la misma. La segunda litología que se encuentra en la zona corresponde con una sección de coladas de lava de composición andesítica-basáltica, las cuales se caracterizan por presentar significativas variaciones en su grado de alteración, estas se encuentran aflorando en la parte central del área de estudio.



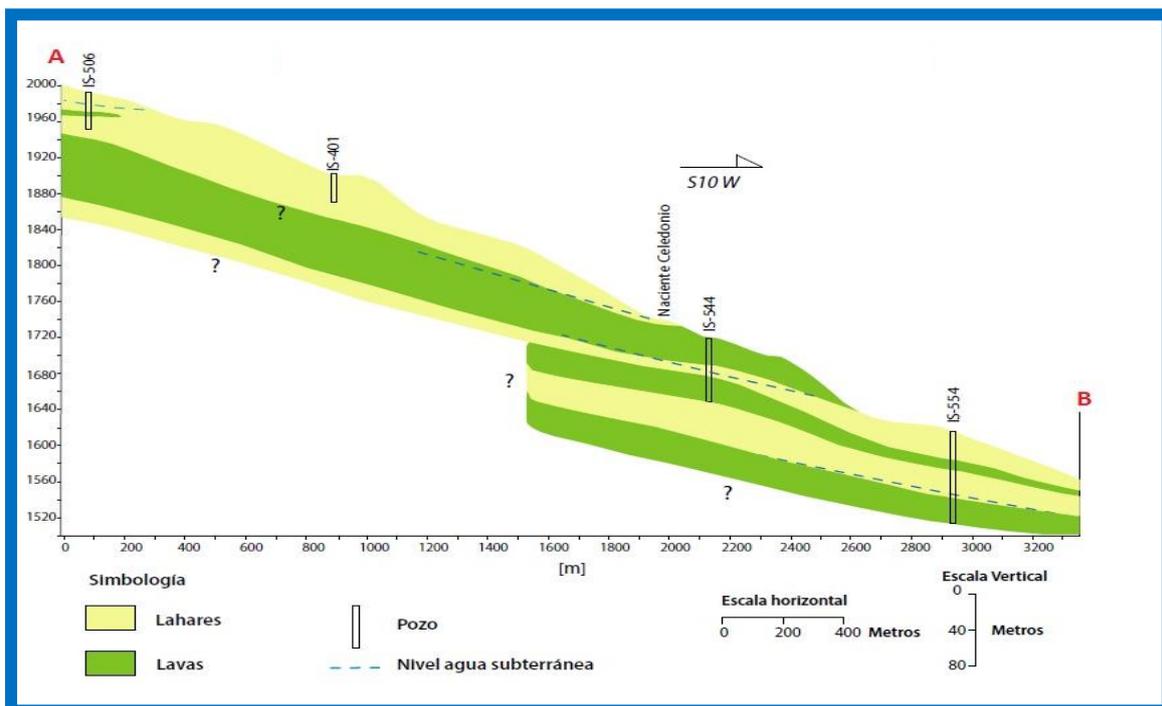
**Colada de lava andesítico-basáltica
aflorante en la cuesta La Chinchilla. Foto
David Araya, 2015.**



**Depósito lahárico aflorando en el cauce del
río Chinchilla. Foto David Araya, 2015**

Del análisis petrográfico realizado en las secciones delgadas de roca se comprueba el alto porcentaje de minerales de plagioclasa existente, tanto la matriz como en fenocristales. La plagioclasa es un feldespato de la serie calco-sódica que presenta solución sólida de los términos extremos: albita ($6\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{Na}_2\text{O}$) y anortita ($4\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}$). Las plagioclasas de composición intermedia se denominan oligoclasa ($10 < \text{An} < 30$), andesina ($30 < \text{An} < 50$), labradorita ($50 < \text{An} < 70$) y bitownita ($70 < \text{An} < 90$). Los términos ricos en sodio son más frecuentes en rocas ácidas, mientras que los más cálcicos lo son en rocas básicas. Este mineral en particular tiende a alterarse en arcillas e incluso en caolinita cuando hay presencia de agua.

Desde el punto de vista hidrogeológico se determinó la existencia de al menos tres diferentes niveles saturados de agua, asociados con diferentes coladas de lava caracterizada por su moderada permeabilidad y porosidad aparente, las cuales son influenciadas por la presencia de un alto grado de fracturas. Estos niveles acuíferos se encuentran intercalados por depósitos de lahares, los cuales por su alta composición arcillosa se pueden considerar como acuitardos.



Perfil hidrogeológico que muestra el sistema acuífero multicapa y los tres niveles saturados en las inmediaciones del Manantial Celedonio.

De acuerdo con las observaciones de campo y del análisis de registros de pozos se deduce que el manantial Celedonio es alimentado por el nivel acuífero más superficial, y su existencia se explica por la presencia de un cambio litológico entre el depósito lahárico superficial y las secuencias de lavas, originando un cambio en las condiciones de permeabilidad y porosidad de las rocas y exponiendo con ello el nivel de agua subterránea en superficie en la zona de la naciente.

A partir de los análisis químicos de agua realizados en los dos sitios (toma de la naciente captada y en el margen del río Chinchilla) se desprende que se trata de la misma agua y que se caracteriza por ser juvenil con muy poco enriquecimiento químico, pues los valores de conductividad eléctrica son propios de agua de lluvia, indicando así una recarga rápida y directa de la precipitación. Así mismo; la concentración de otros elementos químicos es muy baja, indicando el poco contacto con ellos, específicamente en lo que se refiere a dureza, calcio, sodio, magnesio y potasio.

Con relación a la problemática presentada durante la época de invierno con el cambio en la coloración del agua de la naciente, los resultados de los análisis microbiológicos y químicos para las muestras de agua no evidenciaron ninguna concentración anómala de los componentes químicos que pudiera influir en las condiciones de coloración del agua.

Como conclusión del estudio, se plantea una hipótesis que establece que el causante posible del cambio en la coloración del agua del manantial Celedonio puede estar asociada a la diferenciación en el grado de alteración de las lavas que componen el primer nivel acuífero en la zona, ya que tanto por las observaciones realizadas en el campo así como; la información recabada en los registros de pozos, se logró evidenciar que dichas secuencias lávicas presentan un horizonte con mayor grado de alteración hacia la parte superior de la colada.

Además, considerando una recarga directa y rápida, así como un nivel de agua somero, la presunción planteada es que durante los períodos de lluvias intensas se genera una fluctuación con ascenso del nivel de agua subterránea, el cual entraría en contacto directo con el nivel de mayor alteración en la roca, causando a su vez una mayor incidencia de los procesos de disolución de algunos componentes asociados propiamente a la alteración de los minerales constituyentes de la roca y ocasionando con ello, dicho cambio en la coloración del agua. Esta situación se podría ver reflejada en los valores de turbidez y color aparente, que sobrepasan los valores de referencia del Reglamento de Calidad de Agua Potable.

MANANTIAL QUEBRADA BONITA, ACOSTA

Este manantial se encuentra localizado en el poblado de Zoncuano, cantón de Acosta. En el año 2016, a solicitud de los miembros de la Asociación Administradora de Acueductos y Alcantarillados Comunales (ASADA) se realizó una inspección con fines de generar información base que les permitiera iniciar diversos procesos para la regulación administrativa ante las diferentes dependencias institucionales.

Para la fecha de vista, el estado físico de la captación del manantial Quebrada Bonita, se considera como regular; se caracterizó por tener una estructura de cemento sin pintar y con tapas de cemento sin la presencia de candados, la captación propiamente no cuenta con un dispositivo perimetral o malla protectora que impida el ingreso de animales a la zona de la captación, tampoco se observó algún tipo de rotulación preventiva o informativa en la zona del manantial. El área alrededor de la captación se encontró limpia sin presencia de basura, destaca únicamente la presencia de una cobertura de musgo sobre la estructura de la captación debido a las condiciones de humedad existentes en la misma.



Captación Manantial Quebrada Bonita. Foto: Ricardo Pastrana, 2016.

En el área circundante al manantial destacan principalmente dos usos de suelo que corresponden en primer lugar con zonas de cobertura boscosa, las cuales se hallan

extendidas hacia la parte norte y sur de la captación, y en segundo lugar con zonas de potrero dedicadas al desarrollo de actividades ganaderas, estas se encuentran extendidas hacia el sector oeste-noroeste y este de la captación.

La distribución del agua se realiza por gravedad, por medio de un tubo de PVC de 2 pulgadas el cual lleva el agua hasta un tanque de almacenamiento de plástico de 500 litros.

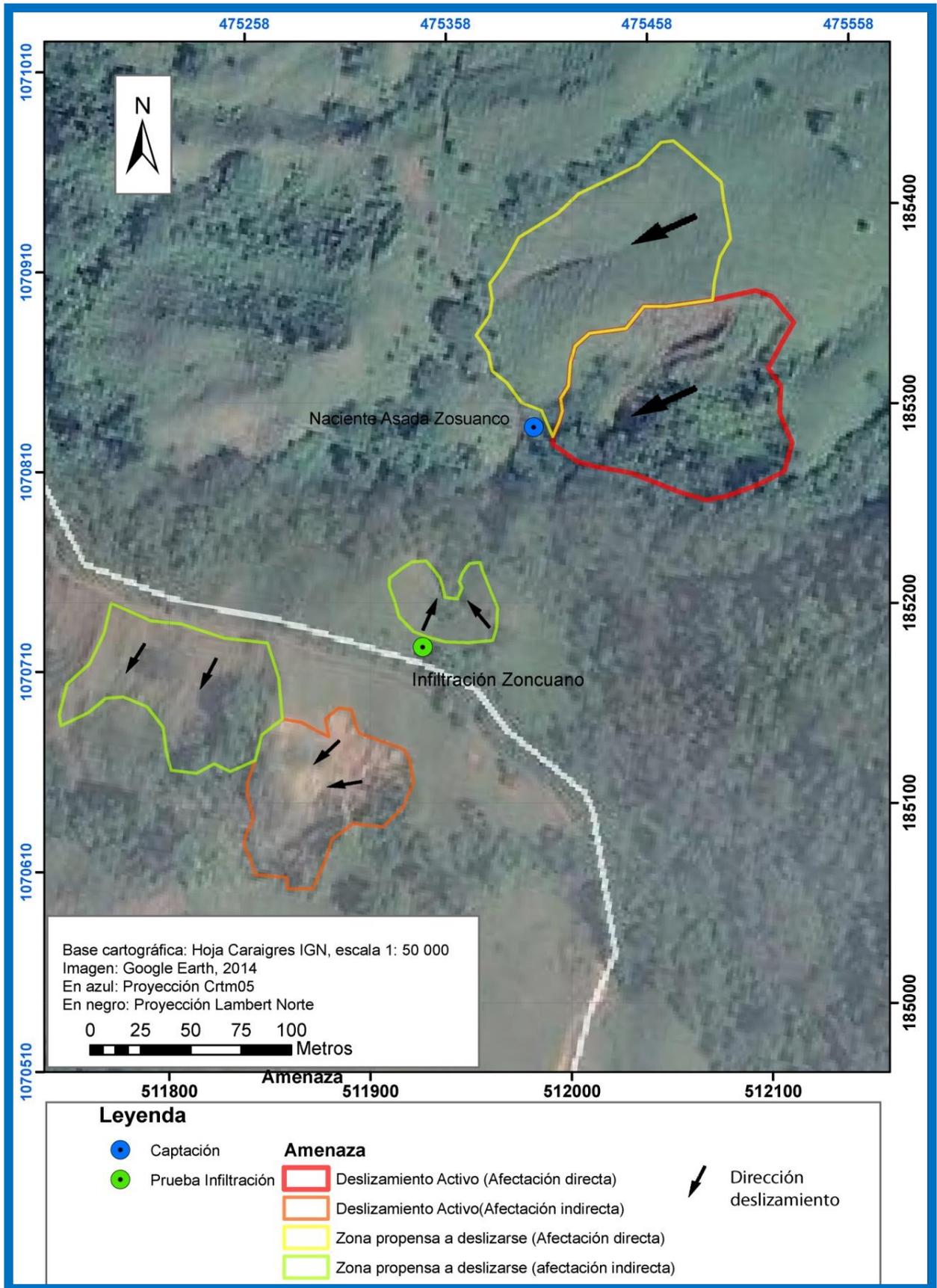
El agua que se capta es incolora y no posee olor, además no arrastra sedimentos (por lo menos en la fecha de la visita). En ese momento, la ASADA no contaba con estudios físico-químicos, ni bacteriológicos que indiquen la calidad del agua, situación que es de suma importancia si se considera que dicha agua no es clorada. Previo al diagnóstico realizado, tampoco se tenía cuantificación de la cantidad de agua que sale del manantial.

Sin embargo; uno de los elementos más preocupantes en este manantial, fue el referente a las amenazas potenciales a las que está expuesto. Siendo estas netamente naturales y relacionadas con la existencia de deslizamientos y/o caída de material sobre la estructura de la captación, situación que según lo mencionado por el señor presidente de la ASADA ya ha ocurrido en ocasiones anteriores.

Algunos de los factores que incrementan el riesgo a la generación de deslizamientos en el área son:

- Topografía abrupta, con pendientes fuertes que suelen superar los 25° de inclinación.
- Suelos con espesores mayores a los 2,5 m.
- Rocas muy meteorizadas y fuertemente fracturadas.
- Uso de suelo no conforme para las condiciones del medio, pues según la pendiente del terreno este debería ser utilizado para la conservación y uso boscoso.

Las amenazas producto de deslizamientos que se encuentran cercanas a la naciente se han clasificado en dos: deslizamientos activos y zonas propensas a deslizarse. Estos a su vez se han diferenciado de acuerdo a su grado de afectación en indirecta o directa. La siguiente figura muestra la distribución de las amenazas por deslizamiento, cercanas a la naciente.



Mapa de amenazas por deslizamientos para el Manantial Quebrada Bonita, captado por la ASADA Zoncuanco.

Deslizamiento Activo (Afectación directa)

Este se ubica hacia la parte norte–noroeste del manantial. El área afectada se ha calculado en aproximadamente 9 241 m² con una dirección de flujo de movimiento en masa hacia el suroeste, en dirección al manantial. El deslizamiento está compuesto por suelo y bloques de roca de tamaños que varían desde los métricos a decimétricos.

El deslizamiento puede y ha llegado a afectar la naciente y captación de forma directa, debido a que el manantial se localiza a los pies de este deslizamiento, pudiendo generar el sepultamiento de toda la captación y un cambio en la zona en donde emana el agua.



Deslizamiento activo, aguas arriba del Manantial Quebrada Bonita. Foto: José Daniel López, 2016.

Deslizamiento Activo (Afectación indirecta)

Ubicado a 300 metros al sur del manantial, presenta un área aproximada de 4 793 m². En sí, este deslizamiento no presenta una amenaza directa a la captación debido a que forma parte de la microcuenca de otra quebrada, por lo que la caída de material no generaría problemas para la naciente, sin embargo; si el deslizamiento continúa puede llegar a afectar el camino principal, lo que limitaría el acceso al Manantial Quebrada Bonita.



Deslizamiento activo, afectación indirecta al manantial, pero la corona pone en riesgo el camino de acceso. Foto: José Daniel López, 2016.

Zona propensa a deslizarse (Afectación directa)

Ubicada hacia el norte del manantial, localizada junto al deslizamiento de mayor amenaza para la captación, presenta un área de aproximadamente 8 971 m². Factores como: pendiente fuerte, escasa cobertura vegetal y cercano a un deslizamiento activo, indicios de movimientos de tierra de tipo reptación (movimiento de suelo lento y superficial), abonados a fenómenos extraordinarios, como lo son lluvias fuertes o continuas, o incluso un sismo con una intensidad alta en la zona, pueden disparar esta masa de tierra generando un deslizamiento, cuyo material caería directamente sobre el Manantial Quebrada Bonita.



Zona propensa a deslizarse con afectación directa al manantial. Obsérvese la fuerte pendiente así como los efectos de la reptación del suelo. Foto: José Daniel López, 2016.

Zonas propensas a deslizarse (Afectación indirecta)

Localizadas en sectores aledaños al camino principal que permite el ingreso a la naciente, se han delimitado dos unidades que presentan condiciones de reptación y que eventualmente podrían convertirse en deslizamientos.

La primera unidad se localiza a 300 m al suroeste de la captación, presenta un área de 5 396 m², con una dirección probable a deslizarse hacia el suroeste, podría provocar el colapso del camino principal a la naciente. La segunda unidad se localiza a 100 m al suroeste de la captación, presenta un área de 1 571 m², con una dirección probable a deslizarse hacia el noreste, podría provocar la interrupción del paso que llega a la naciente, además de algún tipo de represamiento sobre la Quebrada Bonita.

En este caso de estudio, el interés es poner en evidencia que la principal amenaza al manantial es la presencia de un deslizamiento, el cual puede llegar a sepultar la infraestructura de la captación.

Para prevenir parcialmente esto, es necesario promover un cambio de uso de suelo, buscando la reforestación por lo menos a 200 m alrededor de la naciente, principalmente al norte y noreste de la misma.

También, se debe establecer un protocolo de prevención, mitigación y atención de emergencias en caso de la caída importante de material sobre la naciente. Y es importante, en caso de una emergencia, tener identificada alguna otra naciente o flujo de agua que pueda captarse mientras se restablece el servicio.

MANANTIAL MONSERRAT, SAN RAMÓN

Como caso de estudio para la determinación de la zona de protección, se ha utilizado el Manantial Monserrat, en San Ramón. En el año 2017, se aplicaron varias metodologías con el fin de determinar cuál era la más adecuada según las características de la zona.

Por ser un sector montañoso compuesto por coladas de lava fracturada, de moderada pendiente se optó por combinación de la metodología hidrogeomórfológica con la metodología de isócronas de 100 y 500 días y ensayar el método analítico.

En primera instancia se realizó el cálculo de la zona de protección por medio del método analítico, utilizando para ello los valores mostrados a continuación, los cuales han sido determinados en el estudio específico de este manantial.

Valores utilizados al momento de realizar el cálculo por medio de la metodología analítica.

Parámetros Requeridos	Valores	Unidad	Origen de los valores
Q	1036,8	m ³ /d	Aforo de la naciente en época lluviosa
L	50	m	Mapa de isofreáticas
K	2,4	m/d	Prueba de infiltración en campo
H1	1080	m	Mapa de isofreáticas
H2	1075	m	Mapa de isofreáticas
H1 ²	1166400	m	H1 al cuadrado
H2 ²	1155625	m	H2 al cuadrado

Léase:

K= Conductividad hidráulica del medio (m/d).

Q= Caudal (m³/d).

L= Longitud entre dos puntos de observación del nivel freático, obtenido del mapa de equipotenciales (m).

H1 = Elevación mayor del nivel freático (m).

H2 = Elevación menor del nivel freático (m).

Introduciendo los valores mencionados en las ecuaciones correspondientes de la esta metodología, se obtuvieron los siguientes resultados para el método analítico:

- Largo del tubo de flujo aguas arriba: 36,57 m.
- Ancho del tubo de flujo: 2 m a cada lado del manantial.
- Punto de no retorno: 0,36 m aguas abajo del manantial.

Tal y como se preveía, debido a las condiciones del manantial en medios fracturados, se considera que los valores obtenidos son insuficientes, y por ello se optó por incorporar las metodologías de protección conocidas como hidrogeomorfológica y de isocronas.

Para el cálculo de isócronas se utilizó la ecuación correspondiente para determinar la velocidad de un contaminante bacteriano en función de la permeabilidad (k), el gradiente hidráulico (i) y la porosidad.

Además se determinaron las distancias aguas arriba de la naciente Monserrat a las cuales un contaminante bacteriano no debería afectarla, tal y como lo detalla el cuadro siguiente.

Valores necesarios y resultados obtenidos para la metodología de Isocronas en el Manantial Monserrat.

Datos del manantial Monserrat	
Caudal (l/s)	12
Caudal (m ³ /d)	1036,8
Gradiente hidráulico zona saturada(i)	0,09
Permeabilidad (k)(m/d)	2,4
Porosidad zona no saturada(n)	0,35
Porosidad porcentual (n %)	35
Espesor zona no saturada a la fuente (m)	1
Resultados	
Distancia (m) mínima para tiempo tránsito mayor o igual a 70 días	43,2
Distancia mínima (m) para tiempo tránsito o igual a 100 días	61,7
Distancia (m) para tiempo tránsito o igual a 500 días	308,5

Finalmente se delimitó un área de protección generando un polígono con base en la metodología hidrogeomorfológica, que permitió establecer el Tubo de Flujo con un área de 25 571,33 m², esta zona de protección posee una forma tubular con rumbo aguas arriba del manantial (Noroeste); su perímetro se ha conformado con base en la topografía de la zona, así como el establecimiento de la dirección de flujo de agua tanto subterránea, como superficial, mapa de amenazas y uso de suelo.

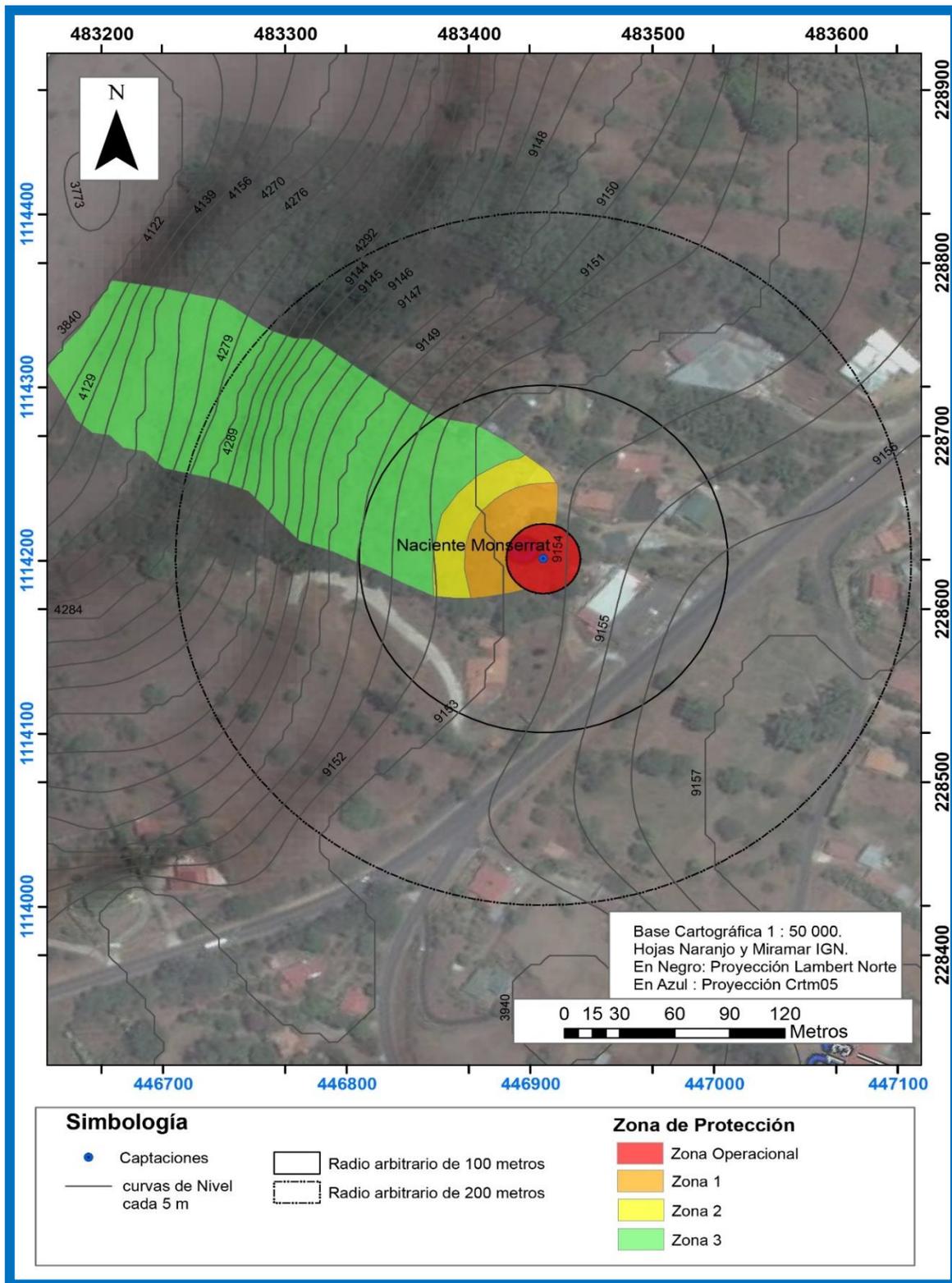
Con respecto a las subdivisiones internas del Tubo de Flujo, se ha definido así:

- Un radio arbitrario de 20 m considerado como la zona de operación y mantenimiento del manantial (color rojo).
- Zona 1 de coloración naranja, la cual es definida por distancias inferiores a la isócrona de 70 días.

- Zona 2 (de color amarillo), definida por distancias inferiores a la isócrona de 100 días.
- Zona 3 (color verde) que corresponde con las distancias menores a la isócrona de 500 días y que se ha culminado en la divisoria de aguas con base en la metodología hidrogeomorfológica.

Es importante rescatar que; este caso se ha comprobado la invasión de infraestructura urbanística dentro de las zonas de protección arbitrarias establecidas en nuestra legislación, incumpliendo lo establecido en Ley Forestal, artículo 33 inciso a), que señala como *“áreas de protección las áreas que bordean nacientes permanentes, definidas en un radio de 100 metros medidos de modo horizontal si el terreno es quebrado”*. Y en este caso particular, por el uso para abastecimiento poblacional de esta naciente, también se viola lo regulado en la Ley de Aguas, artículo 31 que declara como reserva a favor de la Nación *“las tierras que circundan los sitios de captación o tomas surtidoras de agua potable, en un perímetro no menor de 200 metros de radio”*.

En la siguiente figura, se marcan la zona de protección técnica (Tubo de Flujo), además las zonas de protección arbitrarias según la Ley Forestal (radio de 100 m) y Ley de Aguas (radio de 200 m).



Ejemplo de aplicación en el manantial Monserrat (San Ramón), de las metodologías de radios de protección del tipo arbitrario (ley de Aguas y ley Forestal), así como delimitación del tubo de flujo utilizando la metodología hidrogeomorfológica y sectorización de uso del suelo a partir del tiempo de tránsito de contaminantes.

MANANTIALES RÍO CUARTO

En el año 2014, se realizó el estudio para determinar las zonas de captura de quince manantiales ubicadas en distrito de Río Cuarto del cantón de Grecia, provincia de Alajuela, resultando beneficiadas las siguientes ASADAS y manantiales respectivos:

- Santa Isabel (Nicolás Rodríguez, La Culebra, La Flor, Mil Amores, Pata de Gallo).
- Santa Rita (Nicrodal, La Flor, Papo Brenes).
- Río Cuarto (La Sopera F1, Roger Bolaños F2, Finca González F3).
- El Crucero (Crucero).
- La Tabla (Tabla, La Flor).
- Colonia Toro (Pozo Azul).

La selección de la metodología utilizada para la delimitación de las zonas de captura y establecimiento de las zonas de protección, dependió de la disponibilidad de los datos y del contexto hidrogeológico. Por este motivo se empleó la metodología hidrogeomorfológica para la delimitación de la zona de captura y la metodología de isócronas para la demarcación de las zonas de protección alrededor de cada manantial, la cual fue normalizada con los radios arbitrarios establecidos en la legislación vigente (Ley Forestal y Ley de Aguas).

Dentro de la zona de captura de cada manantial, se representó tres zonas de protección:

La primera (Z1): debe ser el área operacional o zona de protección interna de carácter absoluto, su forma debe ser circular aguas arriba del manantial y su extensión está limitada por la zona de captura definida previamente, en ella se debe prohibir todo tipo de actividad antrópica, debe ser protegida con una cerca perimetral y promover la reforestación con especies nativas de la zona, solamente se deben permitir las actividades propias para la operación de la naciente.

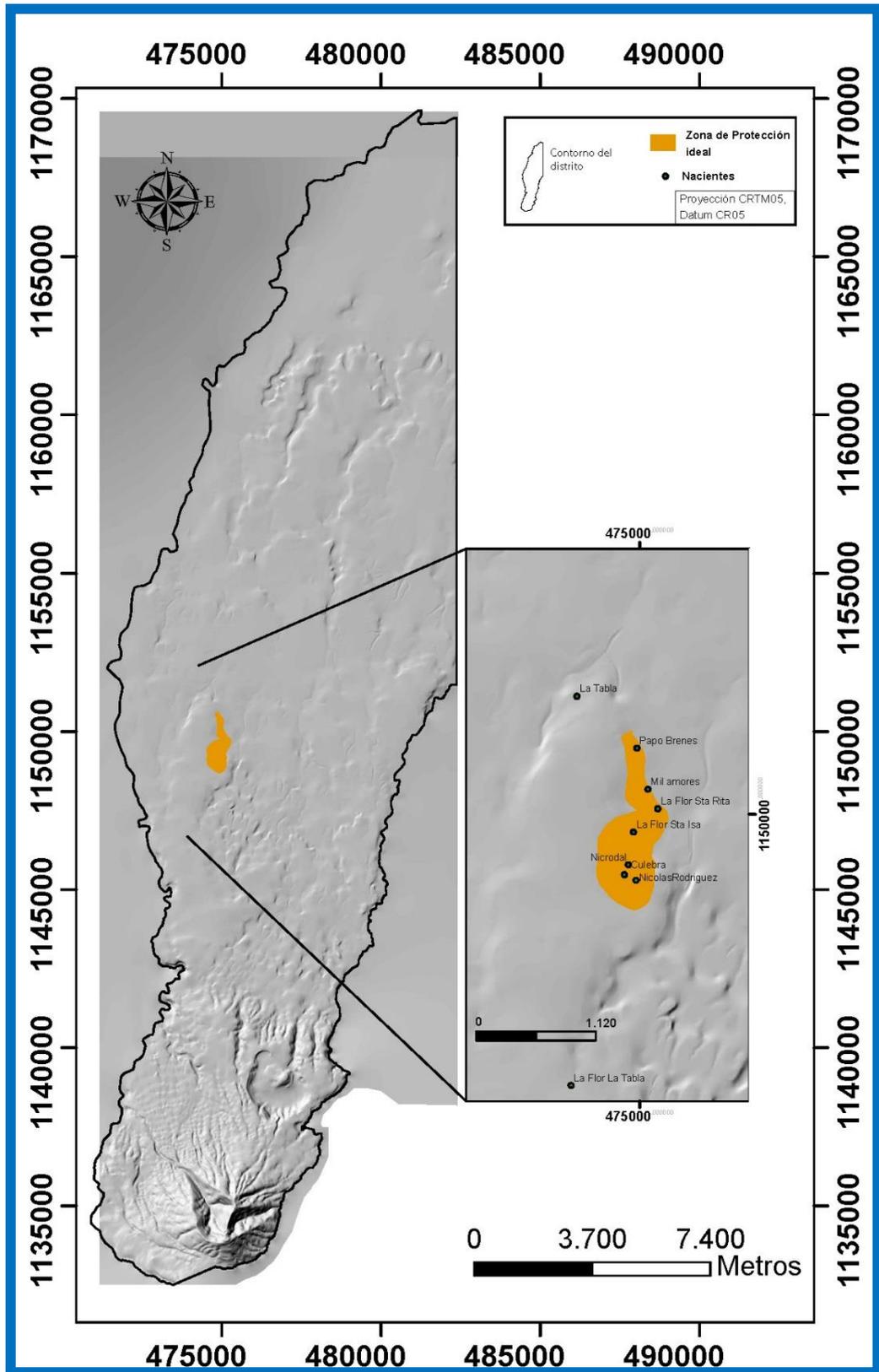
La zona de protección Z2, es denominada también como zona de inspección sanitaria que corresponde con el área de protección externa del manantial, en ella solamente se debe permitir el uso de suelo forestal.

La zona de protección Z3, se debe considerar como el límite de la zona de captura del manantial, donde toda la recarga del acuífero, ya sea por infiltración de agua de lluvia o de flujos de escorrentía superficial será captada por la naciente, en esta zona; se debe favorecer el uso forestal y restringir el tipo de actividades antrópicas, posterior a un estudio técnico específico, se podría permitir solamente aquellas prácticas que no generen algún tipo de contaminación o impermeabilización del suelo, por ejemplo actividades recreativas o turísticas de muy bajo impacto.

En los sectores aledaños y por fuera de las zonas de captura de los manantiales estudiados, se deben restringir las actividades de desarrollo urbanístico futuro, en función de la densidad de población y el área de construcción, así como las actividades agrícolas sobre todo por el uso de agroquímicos en las plantaciones de piña.

En el caso de las nacientes pertenecientes a las ASADAS de Santa Rita y Santa Isabel, estas se encuentran en una importante zona de descarga del acuífero La Flor (acuífero definido en un estudio realizado en el año 2013), por lo que esta zona es de mucha importancia no solo por el aporte de agua al consumo humano, sino a nivel ecológico por la presencia de un pantano que cobija gran cantidad de organismos, como ranas, aves, entre otros. Además; este sector juega un papel importante a nivel hídrico en el distrito, al ser el punto donde nacen muchas quebradas y ríos que lo atraviesan. El hecho de que muchas de las zonas de protección de las nacientes se intercepten entre ellas, indica que todo el sector es importante desde el punto de vista de flujo subterráneo del agua con diferentes direcciones. Debido a estas razones, se recomendó crear una zona de protección conjunta que resguarde todas estas nacientes al mismo tiempo.

Esta zona de protección ideal se propone con base en criterios hidrogeomorfológicos y en las características hidrogeológicas de la zona, y corresponde propiamente con un frente de colada. Su objetivo es la preservación hídrica y ecológica de este sector. Es importante indicar que el área propuesta corresponde con 0,76 km², la cual representa tan solo el 0,29% del área total de Río Cuarto. Por otro lado, si se aplicara estrictamente los 200 m de radio para los siete manantiales de ambas ASADAS, correspondería con un área de 0,88 km². Si bien es cierto; es un área mayor, no necesariamente estará protegiendo efectivamente el agua subterránea, debido al carácter circular de las zonas de protección y más bien estaría potencialmente generando conflictos por el uso del suelo entre los administradores de las ASADAS y los dueños de las propiedades en las cuales se encuentran los manantiales.



Zona de protección idealizada para las nacientes de las ASADAS de Santa Isabel y Santa Rita, en el contexto Río Cuarto.

MANANTIAL DE LA BASÍLICA, CARTAGO

En el año 2014, se realizó un estudio integral para conocer el acuífero productor que brinda agua a La Pilita de la Basílica de Nuestra Señora de Los Ángeles. Este estudio, contempló los siguientes elementos.

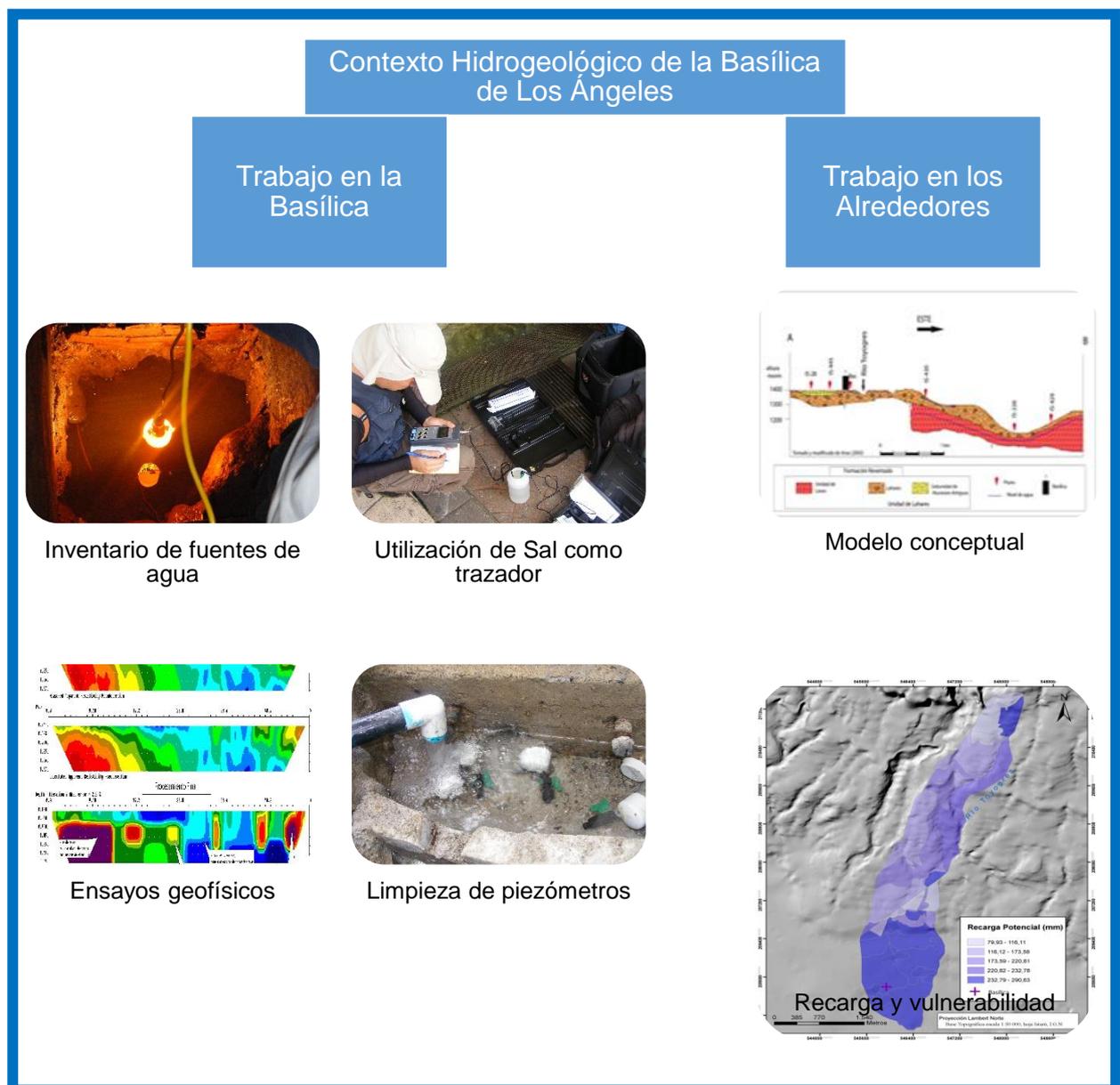


Diagrama de la metodología utilizada para conocer el acuífero productor que brinda agua a La Pilita de la Basílica de Nuestra Señora de Los Ángeles, Cartago.

En este documento, se detalla únicamente lo referente al Manantial de la Basílica y es precisamente la historia del hallazgo de la imagen de la Virgen de los Ángeles, el primer referente en qué; dependiendo de la adaptación, se cita la existencia de un manantial. A continuación algunos extractos de diversas versiones escritas y representaciones gráficas.

“En el 2 de agosto de 1635, una joven mulata llamada Juana Pereira, iba a recoger leña como de costumbre, y se encontró una pequeña estatua, de una muñeca con un bebe en brazos en medio del bosque, *sobre una roca, cerca de un manantial*, en el lugar llamado la Puebla de los Pardos”...

http://es.wikipedia.org/wiki/Virgen_de_los_%C3%81ngeles_%28Costa_Rica%29

“...La joven se encuentra en *una piedra, donde nace un manantial de agua cristalina*, una pequeña muñequita como de barro con un niño en sus brazos, impresionada y admirada la toma en sus manos y se la lleva para su humilde hogar y la guarda en un pequeño cofrecillo...” <http://lanegritadelosangeles.blogspot.com/2008/07/historia-en-la-maana-del-2-de-agosto.html>

“Nos narra la tradición que por la mañana del 2 de agosto..., se lleva tamaña sorpresa, se encuentra *sobre una piedra donde nace un manantial de agua cristalina*, una pequeña muñequita...“(Oreamuno, 1996).

“Cuenta la historia que la indígena Juana Pereira se encontraba recogiendo trozos de leña junto un arroyo de la ciudad de Cartago, en el centro de Costa Rica, cuando divisó la pequeña estatua posada *en una roca*, que recogió y llevó a su casa...” <http://www.taringa.net/posts/info/1147104/Aparicion-Virgen-de-los-Angeles.html>

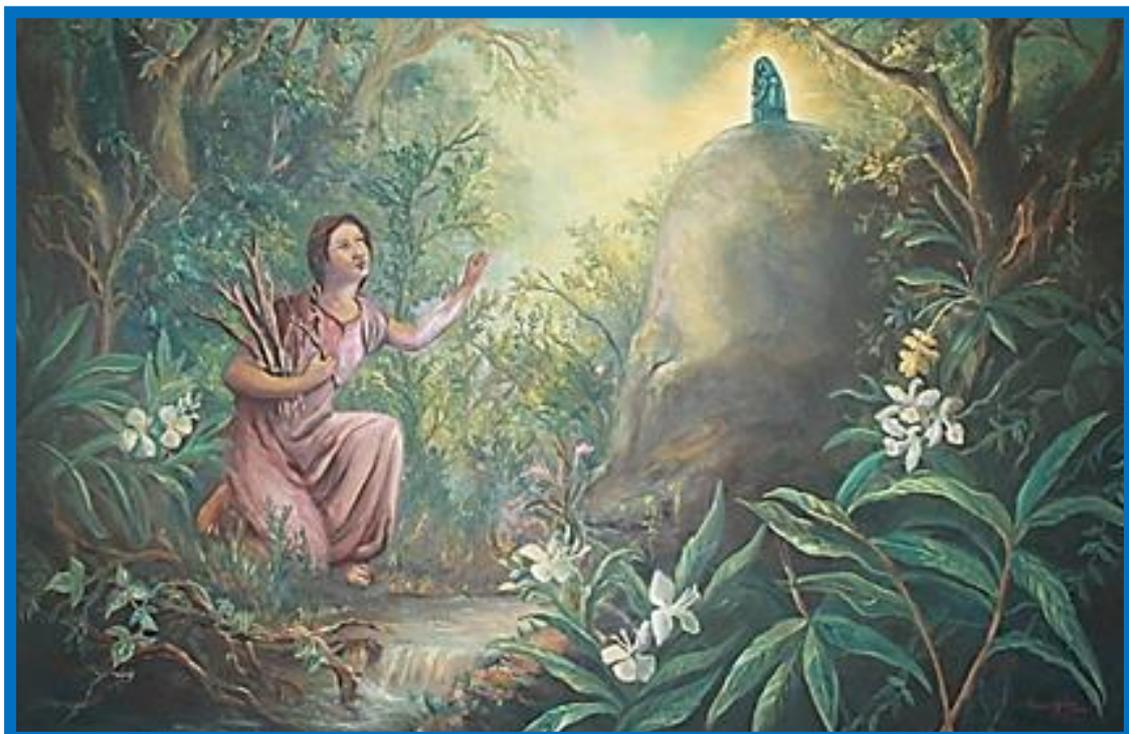
“A corta distancia de allí, entre blancos e indios, vivía una humilde mujer, que cada mañana acostumbraba ir al bosque, en busca de leña. En ese sitio, un 2 de agosto, la pobre mulata halló *sobre una piedra* una pequeña imagen de piedra...” <http://www.santuarionacional.org/historia>

“Según la narración del Padre José Brenes, en ese ambiente rodeado de arbolados y exuberante vegetación, ... buscaba leña y advirtió que, *en una piedra*, se encontraba una pequeña imagen tallada, igualmente, en piedra y que representaba a una madre con su hijo en brazos” (Sanabria V.M. 1985).

“Por la tarde del 2 de agosto de 1635, una indígena llamada Juana Pereira salió a recoger leña al bosque. Y sobre una piedra encontró una imagencita semejante a una muñeca...” (Historia del Hallazgo, impresa y exhibida junto a la Piedra del Hallazgo, en la Basílica).



Representación de la historia del Hallazgo según: Alto relieve en la fachada principal de la Basílica atribuida a Louis Féron (s.f.). Foto: Mario Arias, 2014.



Representación de la historia del Hallazgo según: Obra de V. Graham (2009). Foto: Mario Arias, 2014.



Representación de la historia del Hallazgo según: Obra de Sanvicente (s.f.). Foto: Mario Arias, 2014.



Representación de la historia del Hallazgo según: Obra de Portugués, González, Acuña, Koss, Cantillano, & Rovira (1998). Foto: Mario Arias, 2014.



Representación de la historia del Hallazgo según: Oleo en retablo con representación colonial de Hallazgo (en Gómez, 2009). Foto: Mario Arias, 2014.

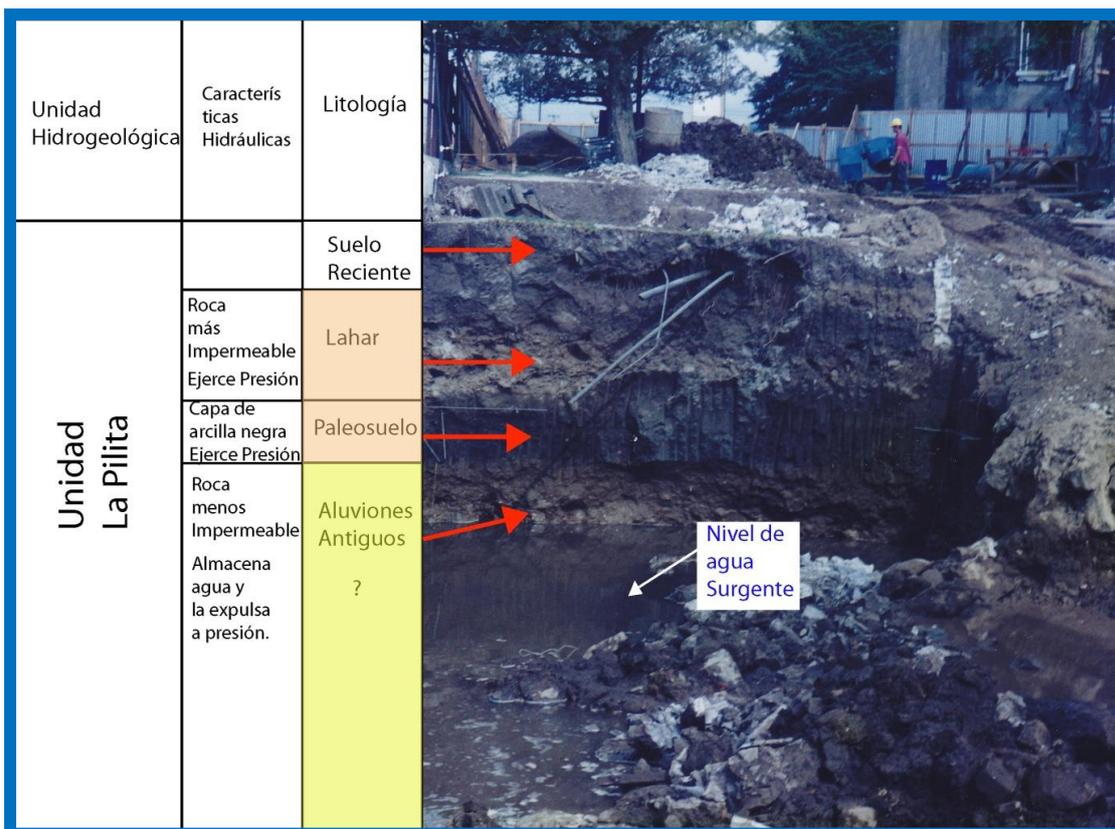
Por su parte; los primeros estudios técnicos relacionados con el sistema hidrogeológico que abastece de agua al sector de la Basílica de los Ángeles, son muy recientes, datan del año 2000 cuando se dió inicio a una serie de remodelaciones a la Pilita y accesos a la Piedra del Hallazgo.

El suscrito, desde el año 2003; a partir de perfiles hidrogeológicos mostró como el agua que transcurre en el sector de la Basílica lo hace con una dirección norte-sur, siguiendo la topografía existente, pues los niveles de agua en los principales pozos corresponden con un acuífero formado por coladas de lava que fueron emanadas por el Volcán Irazú.

A una escala más local, entre el barrio los Ángeles y Caballo Blanco; se identificaron otros dos acuíferos más superficiales. Uno de ellos, es de tipo aluvial, producto de los materiales acarreados y depositados por el río Toyogres, que está constituido por rocas de tamaño y composición heterogénea. El otro es de tipo lahar, que actúa como una capa sello, pues contiene una proporción mucho mayor de materiales arcillosos cuyo origen fue una serie de flujos de lodo provenientes también del volcán.

Con respecto al flujo de agua que viaja por los lahares y depósitos aluviales antiguos, tiene una dirección preferencial hacia el sur, con un gradiente hidráulico estimado de 0,0159. El nivel se encuentra entre los 9 y 18 m de profundidad.

Los lahares (unidad La Pilita) están por encima de las lavas (unidad Tierra Blanca) y a su vez son cubiertos por capas de suelo arcilloso y arenoso de hasta 2 m de espesor. La siguiente fotografía explica el ordenamiento de las capas y comportamiento hidráulico de la Unidad La Pilita.



Fotografía tomada en el momento de las remodelaciones efectuadas en el año 2000. Se observa la distribución de las diferentes capas de roca, así como sus características hidráulicas.

Se determinó que el manantial de la Basílica se encuentra bajo la Piedra del Hallazgo, donde yace una gruta de aproximadamente 58 cm de ancho por 59 cm de largo, con una profundidad de aproximadamente 2 m desde la superficie hasta un nivel de agua que para la fecha de visita (27/10/2014) tenía 63 cm de altura. La gruta, presenta una escalera de mármol que desciende hasta llegar al espejo de agua. El nivel de agua en la gruta, en el momento en que se realizó el estudio se mantuvo constante a pesar de que en por lo menos en 6 ocasiones fue objeto de bombeo, lo que implica un movimiento constante del agua dentro de la gruta, sin embargo; de acuerdo a declaraciones de los colaboradores de

la Basílica en otros momentos (posiblemente en periodos de fuertes y constantes lluvias) el nivel tiende a subir hasta desbordarse a nivel del piso.



Fotografía de la gruta. En la parte inferior de la fotografía se observan las escaleras de mármol que descienden hasta el nivel de agua, se observa una estructura de metal muy oxidada. Foto: Mario Arias, 2014.



Fotografía donde se observa el interior de la gruta y uno de los bloques que componen la capa de roca en la cual brota el agua (aluvión). Foto: Mario Arias, 2014.

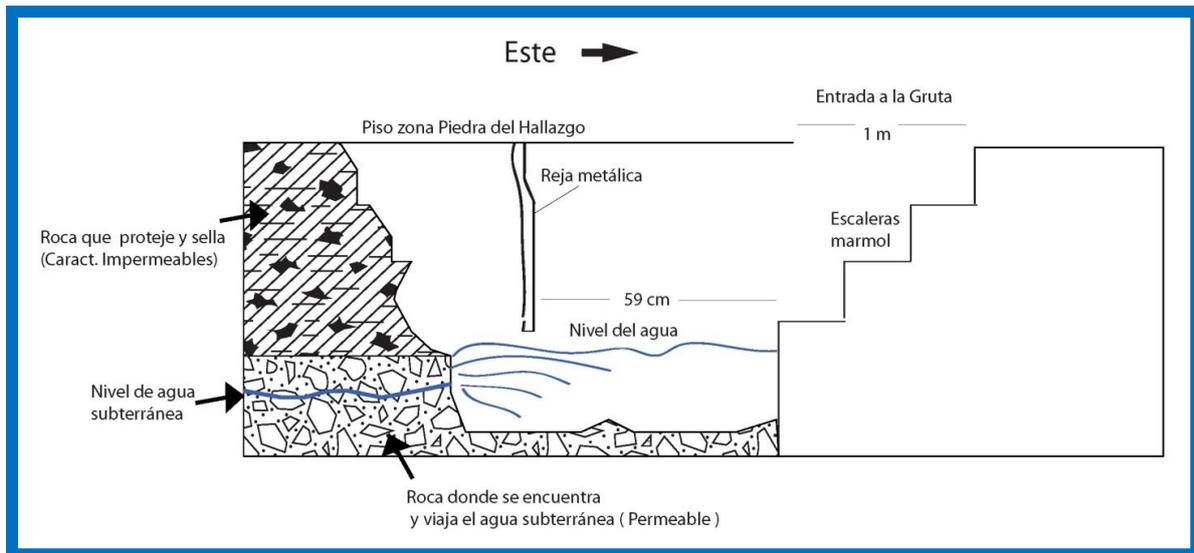


Diagrama esquemático que muestra de manera simplificada la distribución y funcionamiento de la gruta en la cual se encuentra el manantial que se ubica bajo la Piedra del Hallazgo.

En la Gruta de la Piedra del Hallazgo existe además un arroyo, río o quebrada, tal y como se describe en las diversas versiones de la historia del Hallazgo, este tiene un flujo de agua constante pero variable, posiblemente en función de las condiciones climáticas imperantes. Este lugar es considerado como una “*ventana temporal*” que permite observar el arroyo o quebrada existente, y el flujo base del acuífero aluvial que aporta agua, siendo este último el Manantial que se narra y que actualmente solo es visible una vez que disminuye el nivel del agua del arroyo.

La administración del templo instaló, posterior a la entrega de este estudio, una lámina de fibra de vidrio, para que se pueda apreciar la gruta y la escalera de mármol que conduce hasta el manantial, tal y como se observa en la siguiente foto.

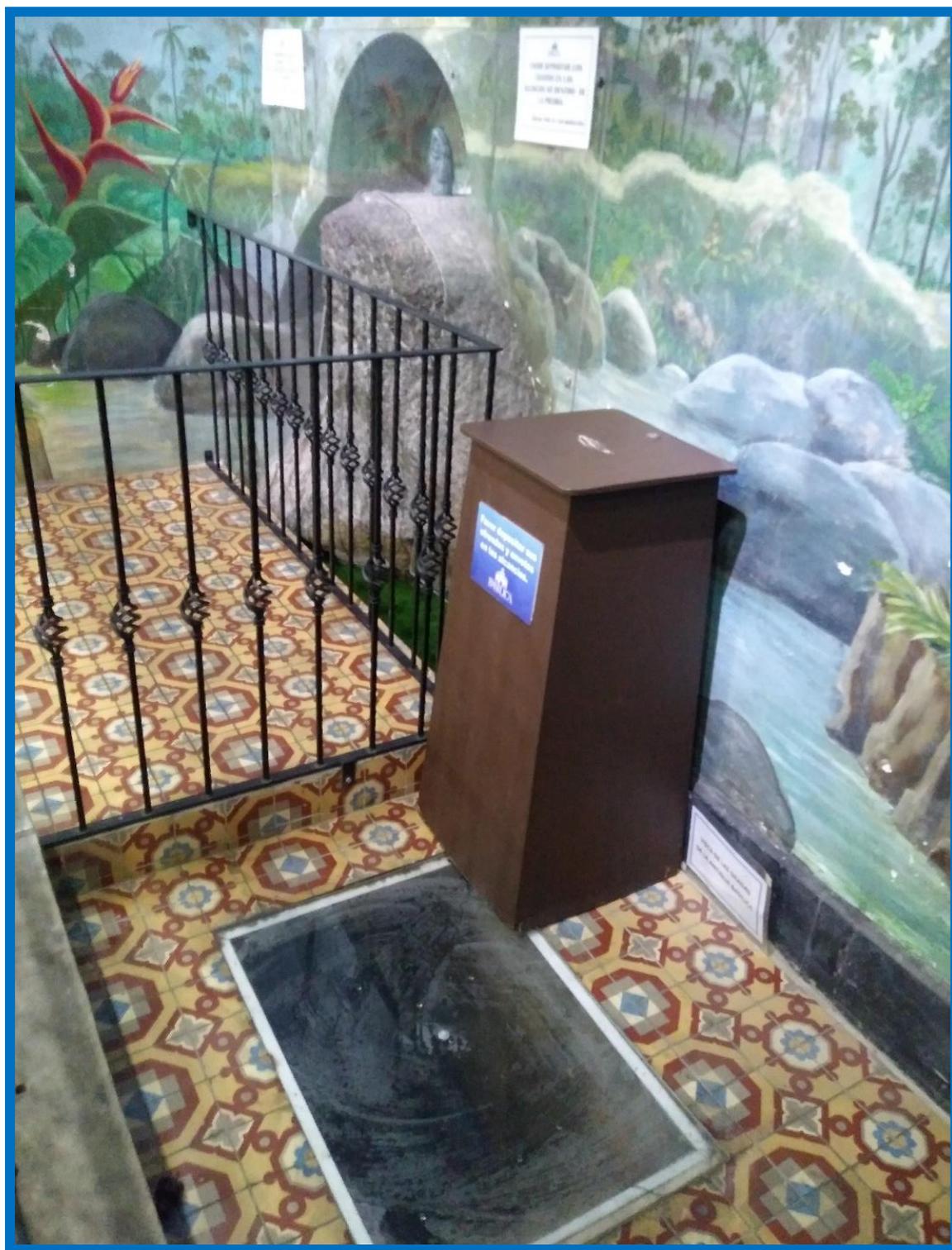


Foto de la *ventana temporal* en la Gruta de la Piedra del Hallazgo, en la Basílica de Los Ángeles. Foto: Mario Arias, 2018.

Referencias

- ARIAS, M.E., 2003: Contaminación y rescate de La Pilita. Rescatemos el Virilla, 9 (21). Pág. 37.
- ARIAS, M. E., 2003: Se unen para salvar el agua milagrosa. Eco Católico, Domingo 23 de febrero, pág. 3.
- ARIAS, M. E., LOSILLA, M. & ARREDONDO, S., 2006: Estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 63-73.
- ARIAS, M. E., 2007: La primer experiencia de aplicación de los Métodos Electromagnéticos en Costa Rica: El caso del acuífero de Tamarindo, Guanacaste. Boletín Geológico Minero de España. 118 (1), 51-62.
- ARIAS, M. E., 2008: El agua subterránea en Costa Rica. Boletín Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo. 27- año VII.
- ARIAS, M.E. 2008: Influencia del tectonismo en el modelo hidrogeológico conceptual y aplicación de la geofísica en la determinación de la intrusión salina en Sámara, Costa Rica. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. 6, 15-23.
- ARIAS, M.E., 2009: Guía para la Descripción de un Manantial. Informe Interno. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 2 pp. [Cuestionario de evaluación].
- ARIAS, M.E., 2009: Tabla para muestreo de suelo. Informe Interno. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 1 pp.
- ARIAS, M.E., 2009: Tabla para prueba de infiltración utilizando el método de doble anillo. Informe Interno. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 1 pp.
- ARIAS, M.E., 2009: Determinación del tubo de flujo de las nacientes La Hilda y Javier Paniagua, San Roque de Grecia. Informe Interno. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, 30 pp.
- ARIAS, M. E. 2009: Previniendo el riesgo comunal: abordaje educativo con enfoque de género. Informe Interno, proyecto ED-2463. Costa Rica. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 97 pp.
- ARIAS, M. E., 2010: Estudios Hidrogeológicos: una ventana de oportunidad. Informe del Estado de la Nación (XVI) p. 213.
- ARIAS, M.E., 2010: Manantiales.- en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo II). CATIE, TEC, UCR. Informe Interno, proyecto ED-2596. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 5 pp. + anexos.

- ARIAS, M. E. 2011: Estudio Hidrogeológico Regional de la Cuenca del Río Frío. Informe Interno, proyecto 830-A9-518. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 132 pp.
- ARIAS, M. E., 2012: Vulnerabilidad y Protección del Agua Subterránea: Valor de la Matriz del Uso del Suelo del SENARA: Revista AMBIENTICO, 208, 9-13.
- ARIAS, M. E. 2012: Estudio Hidrogeológico del cantón de Atenas, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B1-404. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 107 pp.
- ARIAS, M. E. 2013: Caracterización geológico-estructural de las nacientes F1 y F2, ubicadas en el Parque Recreativo Municipal Los Chorros, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto ED-2873. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 37 pp.
- ARIAS, M.E., 2013: El monitoreo del agua subterránea como instrumento de gestión. Informe Interno. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 10 pp.
- ARIAS, M. E. 2014: Estudio Hidrogeológico Regional de un sector de la provincia de San José, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B2-404. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 153 pp.
- ARIAS, M. E. 2014: Estudio Hidrogeológico del cantón de Palmares, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B2-406. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 224 pp.
- ARIAS, M. E. 2014: Estudio de las zonas de captura de manantiales seleccionados en el Distrito de Río Cuarto de Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B2-502 y 830-B3-407. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 124 pp.
- ARIAS, M. E. 2014: Estudio Hidrogeológico de un sector de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B2-405. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 131 pp.
- ARIAS, M. E. 2014: Estudio Hidrogeológico del cantón de Naranjo, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B2-403. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 156 pp.
- ARIAS, M. E. 2014: Estudio hidrogeológico del acuífero productor que brinda el agua a La Pilita de la Basílica Nuestra Señora de los Ángeles. Cartago, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B4-806. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 117 pp.
- ARIAS, M. E. 2015: Estudio Hidrogeológico del cantón de Sarapiquí, provincia de Heredia, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B3-408. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 104 pp.

- ARIAS, M. E. 2015: Estudio de las zonas de protección para 39 Manantiales del cantón de Santa Bárbara, provincia de Heredia, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B3-409. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 282 pp.
- ARIAS, M. E. 2015: Estudio Hidrogeológico de los distritos: Alajuela, Desamparados, Río Segundo, Carrizal, San Isidro y Sabanilla, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B3-410 y 830-B5-405. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 183 pp.
- ARIAS, M. E. 2015: Estudio Hidrogeológico de la Zona Protectora Cerros de la Carpintera. Informe Interno, proyecto 830-B3-411. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 250 pp.
- ARIAS, M. E. 2016: Caracterización del Manantial Quebrada Bonita, ASADA de Zoncuano, Acosta. Informe Interno, proyecto ED-2873. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 34 pp.
- ARIAS, M. E. 2016: Estudio en el Manantial Celedonio, Cartago, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B4-806. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 75 pp.
- ARIAS, M. E. 2017: Estudio Hidrogeológico para la protección de las fuentes de agua utilizadas por la ASADA CALEMA, San Ramón, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B4-806. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 61 pp.
- ARIAS, M. E., 2017: Contenidos para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico: El caso del Acuífero Sardinal. Proyecto ED-2873. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 72 pp.
- ARIAS, M. E., 2018: Apuntes del curso G-5127: Manejo de Recursos Hídricos. Escuela Centroamericana de Geología. Univ. De Costa Rica (informe inédito).
- ARIAS, M. E., 2018: Jurisprudencia constitucional y Políticas Públicas aplicadas al Agua Subterránea en Costa Rica. Proyecto ED-2873. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 69 pp.
- ARIAS, M. E. 2018: Estudio de las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento público utilizadas por las ASADAS en el sector de Piedades Sur de San Ramón, provincia de Alajuela, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B4-806. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 98 pp.
- ARIAS, M. E. 2018: Estudio Hidrogeológico para la determinación de 37 zonas de protección de fuentes de abastecimiento público utilizadas por las ASADAS en el territorio Norte-Norte, Costa Rica. Informe Interno, proyecto 830-B4-806. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 400 pp.
- ARIAS, M.E., 2018: Tabla para realizar aforos volumétricos. Informe Interno. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 1 pp.

- BARTON, G.J., RISSER, D.W., GALEONE, D.G., CONGER, R.W., 1999: Case study for delineating a contributing area to a water-supply well in a fractured crystalline-bedrock aquifer, Stewartstown, Pennsylvania. US Geol Surv Water Res Invest Rep 99-4047, 44 pp.
- BÄUMLE, R., EINSIEDL, F., HÖTZL, H., KÄSS, W., WITTÜSER, K., WOHNLICH, S., 2001: Comparative tracer studies in a highly permeable fault zone at the Lindau Fractured Rock Test Site, SW Germany. In: ATH (ed) Tracer studies in the unsaturated zone and groundwater (investigations 1996-2001). Beitrag. Hydrogeol. 52:136-145.
- BECKER, M.W., METGE, D.W., COLLINS, S.A., SHAPIRO, A.M., HARVEY, R.W., 2003: Bacterial transport experiments in fractured crystalline bedrocks. *Ground Water* 41(5):682-689. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02406.x
- BERKOWITZ, B., 2002: Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review. *Adv. Water Resour.* 25(8-12):861-884. doi:10.1016/s0309(02)00042-8.
- BESSON, O., 1990: Etude des aquifères fissuraux associés au synclinal Permo-carbonefère de Salvan-Dorénav (Suisse-Valais). Proc XXIIIth Int. Conf. on Water Resources in Mountainous Regions, Lausanne, Switzerland, 1990, pp 1113-1121.
- BORGIA, A., BURR, J., MONTERO, W., ALVARADO, G.E. & MORALES, L.D., 1990: Fault propagation induced by gravitational failure and slumping of the Central Costa Rica Volcanic Range: Implications for large terrestrial and Martian volcanic edifices. *J. Geophys. Res.*, 89 (95): 14 357 - 14 382.
- BRADBURY, K.R., 2002: Delineation of wellhead protection areas in fractured rock: advances during the last 10 years. GSA Annu Meeting, Denver, CO, 27-30 October 2002.
- BRADBURY, K. R., MULDOON, M. A., ZAPOROZEC, A., LEVY, J., 1991: Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks. Tech. Guid. Doc, US EPA, Washington, DC, 144 pp.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, R., 1983: Hidrología subterránea. Tomo I, Ediciones Omega, segunda edición. 1011 pp.
- DUBOIS, J.D., 1991: Typologie des aquifères cristallins: exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mt-Blanc. PhD Thesis no. 950, EPF, Lausanne, Switzerland, 324 pp.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GÓMEZ, D., D'ELIA, M., & PARIS, M., 2002: Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial, 115 p.
- GENTRY, W.M., BURBEY, T.J., 2004: Characterization of groundwater flow from spring discharge in a crystalline rock environment. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 40 (50):1205-1217. Doi:10.1111/j.1452-1688.2004.tb0158.x.
- JAMIER, D., 1975: Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mt-Blanc. PhD Thesis, Univ Neuchâtel, Switzerland, 153 pp.
- KRASNY, J., HRKAL, Z., BRUTHANDS, J., (eds), 2003: Proceedings of the International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Prague, Czech Rep, September 2003, 426 pp.

- LA GACETA, 1942: Ley de Aguas 276. Publicado en La Gaceta N. 190 del 2 de agosto.
- LA GACETA, 1996: Ley Forestal No. 7575. Publicado en La Gaceta N. 7575 del 13 de febrero.
- LIPFER, G., TOLMAN, A.L., LOISELLE, M.C., 2004: Methodology of delineating wellhead protection zones in crystalline bedrock in Maine. *J. Am. water Resour. Assoc.* 40(4):999-1010. doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01062.x.
- LOSILLA, M., 1992: Mapa de fuentes de acueductos y sus áreas de recarga. Informe Interno. FUNDECOR, Costa Rica, 17 pp.
- LOSILLA, M., RODRIGUEZ, A., 1994: Normas para el cálculo de los tiempos de tránsito entre los drenajes de Tanques Sépticos y las Fuentes de Agua Subterránea. AyA, San José, Costa Rica (informe interno).
- MALOSZEWSKI, P., HERRMANN, A., ZUBER, A., 1999: Interpretation of tracer test performed in fractured rock of the Lange Bramke basin, Germany. *Hydrogeol. J.* 7(2):209-218. Doi:10.1007/s100400050193.
- C., 1998: Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. PhD Thesis no. 1769, EPF Lausanne, Switzerland, 296 pp.
- MARSILY, G., 1986: Quantitative hydrogeology, Academic Press, Orlando.
- MEINZER, O. E., 1923: Outline of ground-water hydrology, with definitions. US Geol Surv Water Suppl. Pap 114 494.
- OPS, 2004. Guía para el diseño y construcción de captación de manantiales. Lima, 24 pp.
- POCHON, A., ZWAHLEN, F., 2003: Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Guide pratique. L'Environnement pratique. SAEFL, Berne, Switzerland, 83 pp.
- POCHON, A., TRIPET, J.P., KOZEL, R., MEYLAN, B., SINREICH, M. & ZWAHLEN, F., 2008: Groundwater protection in fractures media: a vulnerability based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal* 16: 1267-1281.
- ROBINSON, N., BARKER, J., 2000: Delineating groundwater protection zones in fractured rock: an example using tracer testing in sandstone. *Tracers and Modelling in Hydrogeology*, Publ. 262, IAHS, Wallingford, UK, pp 91-96
- SPRINGER, A. & STEVENS, L. 2009: Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal* 17: 83-93.
- TODD, D.K., 1980: Ground water hydrology. John Wiley, New York, 336 pp.
- WALSH, P., 2008: A new method for analyzing the effects of joints and stratigraphy on spring locations: a case study from the Sacramento Mountains, south central New Mexico, USA. *Hydrogeology Journal* 16: 1459-1467.
- VARGAS, A., 2002: Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Rev. Geol. Am. Central.* 27: 39-52.

Mario Enrique Arias Salguero

Es geólogo de formación, obtuvo su bachillerato y licenciatura en la Universidad de Costa Rica. Sus estudios de Posgrado los realizó en el Laboratorio de Geofísica Aplicada de la Universidad Pierre et Marie Curie, en París, Francia.

Su actividad profesional se ha enfocado en la temática de la Gestión del Recurso Hídrico, investigación Hidrogeológica, investigación en Geofísica de Prospección, Docencia y Administración Universitaria.

Es autor de varios artículos publicados a nivel nacional e internacional, así como gran cantidad de trabajos técnicos, resúmenes y presentaciones en congresos internacionales, cursos de capacitación impartidos por él y divulgación de sus investigaciones en los medios de comunicación nacional y ante diversas comunidades locales.

Trabajó en el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento y ha colaborado con varias investigaciones de instituciones públicas (Programa del Estado de la Nación, AyA, Dirección de Aguas del MINAE). De igual manera ha emitido criterios técnicos para el Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Contraloría General de la República, Defensoría de los Habitantes, Asamblea Legislativa, Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, Organismo de Investigación Judicial, Consejo Nacional de Rectores, Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud, Sala Constitucional, Municipalidades, Consejo Universitario y organizaciones comunales.

Fue coordinador a nivel regional del proyecto Red Centroamericana de Recursos Hídricos, además miembro directivo de Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo y fue el primer Secretario General del capítulo costarricense de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Colaboró además, con la puesta en marcha del Diplomado en Administración y Manejo del

Recurso Hídrico, del Colegio Universitario de Alajuela, convirtiéndose en su primer director.

Desde hace más de 20 años, labora como docente - investigador en la Universidad de Costa Rica. Desde el año 2006 es el profesor titular del curso de Manejo de Recursos Hídricos correspondiente al nivel de Licenciatura de la carrera de Geología.

En su haber cuenta con 33 investigaciones científicas como profesor principal, 11 investigaciones como profesor asociado, así como varios proyectos de Acción Social. Sus más recientes estudios están relacionados con evaluaciones geofísicas e hidrogeológicas que contemplan modelos hidrogeológicos, determinación de la recarga, evaluación de la vulnerabilidad hidrogeológica y determinación de las zonas de protección de fuentes de agua en diferentes partes del país, apoyando así la toma de decisiones para la gestión adecuada de los recursos geológicos, del ordenamiento del territorio y del riesgo, además de promover el aprovechamiento sustentable de los georecursos.

En el periodo 2013-2018, ha participado en la realización de 215 estudios técnicos para determinar y delimitar las zonas de protección de manantiales utilizando diversas metodologías hidrogeológicas (analítica, isócronas, hidrogeomorfológica y arbitraria según la legislación nacional), en función de las características del medio (poroso o fracturado), tipo de acuífero (libre o confinado) y de la información disponible.

En la Universidad, fue director del Programa de Posgrado Centroamericano en Geología y coordinador de la maestría en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología, desempeñó además; la subdirección de la Escuela Centroamericana de Geología y por dos periodos consecutivos fue el director del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas.



Manantial de fondo, concentrado, surgente, expuesto e intermitente en Sámara, Guanacaste.



Manantial de ladera, difuso, permanente y temporalmente cubierto bajo el nivel del mar en Playa Grande, Tamarindo, Guanacaste.