



# Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



**Comportamiento hidrométrico de los manantiales ubicados a lo largo del túnel de  
conducción del Proyecto Hidroeléctrico El Encanto**

***Hydrometric Behavior of Water Springs Located Along the Driving Tunnel of the El Encanto  
Hydropower Project***

***Pablo Ramírez<sup>a</sup>***

<sup>a</sup> El autor es especialista en hidrogeología y manejo de recursos hídricos, es investigador en el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas y en el Observatorio del Desarrollo de la Universidad de Costa Rica. Además, es profesor en la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica.

**Director y Editor:**

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

**Consejo Editorial:**

Enrique Lahmann, UICN, Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Marielos Alfaro, Universidad Nacional, Costa Rica

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica

Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

**Asistente:**

Rebeca Bolaños-Cerdas



# Comportamiento hidrométrico de los manantiales ubicados a lo largo del túnel de conducción del Proyecto Hidroeléctrico El Encanto

*Pablo Ramírez*

El autor, especialista en hidrogeología y manejo de recursos hídricos, es consultor de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A., académico de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional e investigador en el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica y en el Observatorio del Desarrollo de esa misma institución.

## Resumen

Se caracteriza el comportamiento hidrométrico de los manantiales ubicados a lo largo del túnel de conducción del Proyecto Hidroeléctrico El Encanto (PHEE), desarrollado por la CNFL, en el río Aranjuez. Se analizaron los comportamientos hidrométricos a través de mediciones bimensuales, durante un año, de los manantiales ubicados a lo largo de la línea del túnel y se analizaron sus propiedades geopedológicas por medio de muestreos en los sitios del afloramiento. Una vez establecida la dinámica hidrométrica y una relación con las características hidrogeológicas del sitio, se presentan conclusiones en cuanto al impacto de la construcción del túnel en los manantiales y la posible afectación del recurso hídrico subterráneo local.

**Palabras clave:** hidrometría, manantiales, Proyecto Hidroeléctrico El Encanto, túnel de conducción.

## Abstract

This article analyzes the hydrometrical behavior of the springs located along the El Encanto Hydroelectric Project Conduction Tunnel developed by CNFL along the Aranjuez River. Hydrometrical behaviors are analyzed through bimonthly measurements for one year from the springs located along the line of the tunnel and its geopedological properties were analyzed by sampling sites of the outcrop. Having established the hydrometrical dynamic and establishing a relationship with the hydrogeological characteristics of the site, the article presents conclusions about the impact of tunnel construction in the springs and the possibility of groundwater resource impact.

**Key words:** hydrometry, springs, El Encanto Hydroelectric Project, conduction tunnel.

## Introducción

La Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A. (CNFL) desarrolló el túnel de conducción del Proyecto Hidroeléctrico El Encanto (PHEE), que consta de una obra subterránea que permitirá llevar agua de la represa del río Aranjuez a la casa de máquinas, para la generación de energía hidroeléctrica.

Con el propósito de contribuir al desarrollo de la comunidad y mantener tanto los recursos hídricos como el equilibrio ambiental de la obra, la CNFL inició estudios sobre una serie de aspectos de tipo ambiental, referentes al impacto de esta obra en el sitio. A raíz de esto es que se justifica un estudio sobre la dinámica hidrométrica de los manantiales ubicados a lo largo del túnel de conducción y que proveen agua a los pobladores cercanos al proyecto.

Este trabajo representa una primera contribución al entendimiento hidrodinámico de los manantiales del sitio y está basado en la información del sitio del PHEE, lo cual implica ciertos vacíos de información. Sin embargo, es dable decir que se puede ir enriqueciendo la información específica

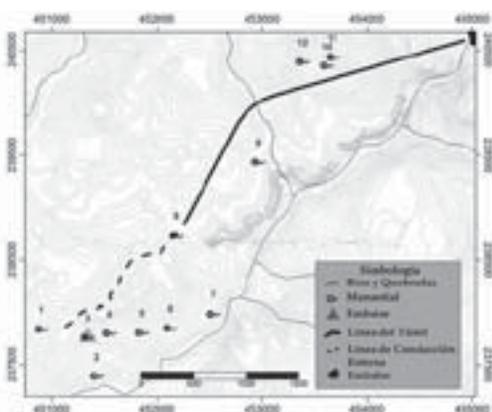
conforme se avance en la evolución de las investigaciones, en el PHEE, que pueda continuar la CNFL.

## Metodología

Un manantial puede definirse como una zona puntual (o en algunas ocasiones difusa) a través de la cual el agua subterránea aflora (Bear, 1979); esto es conocido como un punto de descarga del acuífero. A partir de este concepto, se realizó un recorrido por la zona, con el propósito de mapear y obtener la posición de los manantiales en relación con las distintas estructuras de las obras del proyecto hidroeléctrico.

Los principales manantiales ubicados a lo largo del túnel de conducción del PHEE se observan en la figura 1 y corresponden a afloramientos de aguas subterráneas más o menos bien distribuidos a lo largo de la línea del túnel. Se caracterizan por aflorar en zonas difusas, es decir, zonas donde no hay una emergencia puntual del agua, sino que esta se da en distintos sectores, donde en algunos casos es poco definible su salida precisa.

**Figura 1.** Distribución de los manantiales en el PHEE. 2008-2009.



Algunos de los manantiales se encuentran cerca del túnel de conducción, otros en sitios más

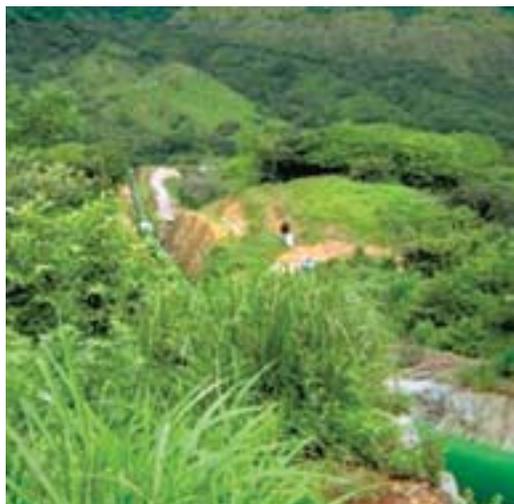
cercanos al tanque de oscilación y a la casa de máquinas, y no presentan un acceso específico, por lo que las rutas de llegada no siempre son las mismas.

Estos manantiales (figura 1) son descargas del agua subterránea, originados por la exposición de las unidades hidrogeológicas acuíferas (la definición de acuífero, en este caso en particular, puede entrañar ciertas dudas, puesto que, como se verá más adelante, los caudales son considerablemente bajos como para un aprovechamiento económico). Lo anterior, por cortes en la superficie topográfica (las unidades hidrogeológicas se desarrollan en secuencias de materiales lávicos y brechas), que se abastecen por la recarga anual de precipitación del sitio.

La información geológica de campo, elaborada por la empresa encargada del túnel, indica que la zona es compleja por los distintos niveles de alteración hidrotermal que la roca ha experimentado y por la presencia de fallas (Ghella S. P. A., 2007). Regionalmente, las rocas que afloran en esta área se corresponden con el grupo Aguacate, donde se destaca la formación basaltos Miramar (Ghella S. P. A., 2007). Estas constituyen una secuencia de lavas basálticas y andesita basálticas con pocas intercalaciones de tobas.

A partir de los datos de los informes de los núcleos de perforación y de los perfiles geológicos (Ghella S. P. A., 2007), se puede decir que localmente se presentan suelos de espesor variable sobreyaciendo lavas andesíticas.

Debido a la complejidad de los materiales litológicos del sitio, es muy probable que se den recargas entre las unidades hidrogeológicas existentes en el lugar, pues, según las perforaciones realizadas en distintos puntos a lo largo del túnel de conducción, se encuentran capas de lavas y brechas con ciertas intercalaciones de materiales litológicos menos permeables por las relaciones de porosidad primaria y secundaria efectiva, los cuales favorecerían la saturación del material y,



Pastos y potreros abandonados en pendientes altas en el PHEE, este tipo de uso de la tierra es muy común en la zona del PHEE.

por ende, la formación del acuífero. Por existir intercalaciones de los materiales lávicos con diversos grados de fracturamiento y meteorización, es factible la formación de acuíferos colgados y acuíferos multicapa.

Según lo observado en campo, se puede decir que los manantiales se encuentran en la ladera noroeste respecto al cauce del río Aranjuez. Ellos se caracterizan por diversos afloramientos a distintas elevaciones, entre los 470 y los 650 m sobre el nivel del mar. Así se reconoce la posible existencia de acuíferos multicapa o acuíferos colgados desde la base del río hasta las elevaciones máximas (cimas).

El uso de la tierra predominante en la zona del PHEE es de pastos y cultivos abandonados, lo que provoca cambios importantes en la dinámica hidrológica del sitio. Esto se evidencia por las altas tasas de escurrimiento superficial observadas en campo, favorecidas por las pendientes en toda la zona.

## Resultados

Con base en el análisis del área de estudio, se recolectó una muestra del material litológico de la zona del manantial, en cada uno de los afloramientos

ubicados a lo largo de la línea del túnel, para analizar la composición granulométrica de los materiales litológicos presentes en las zonas de los manantiales (cuadro 1).

Cuadro 1. Características granulométricas de los manantiales, en los sitios de afloramientos ubicados a lo largo del túnel de conducción.

<b>Id</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>
1	450904	237841	50	14	36
2	451428	237391	48	26	6
3	451344	237765	52	10	38
4	451545	237800	44	14	42
5	451858	237809	40	18	42
6	452132	237851	42	14	44
7	452641	237985	36	30	34
8	452188	238735	42	14	44
9	452969	239443	48	16	36
10	453615	240351	50	18	32
11	453672	240443	48	18	34
12	4533889	240389	48	16	36

**Fuente:** Trabajo de campo, 2008-2009. Muestras tomadas considerando el sistema de Proyección Conforme Cónico de Lambert para Costa Rica Norte.

Las muestras fueron recolectadas en los sitios de afloramiento de manantiales y procesadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria del Ministerio de Agricultura. Los procedimientos de recolección y análisis de muestras con fines hidrológicos pueden encontrarse en Bouwer (1986) y Sanders (1998).

El análisis de los datos geopedológicos de los afloramientos de los manantiales muestran aspectos muy interesantes, si estos son considerados como resultados de la estructura general del sitio donde se encuentran tales manantiales. Es notable un contenido de arenas fundamental

en todas las muestras, aunque en la mayoría estas no sobrepasan el 50% del total de cada muestra; por otro lado, los contenidos de limo son muy inferiores a lo que podría esperarse en otros sitios. La fracción que llama más la atención es la correspondiente a la arcilla (el término arcilla se refiere a un tamaño y no a la naturaleza mineralógica), la cual en todas las muestras mantiene un contenido muy importante, que, en algunos casos, alcanza más del 40% de la muestra total.

Estos resultados arrojan varios elementos importantes por considerar, en lo que respecta a las propiedades hidrológicas; sin embargo, es importante mencionar, en primera instancia, que en lo que concierne al análisis geopedológico e hidrogeológico del terreno se deben separar claramente los conceptos roca, saprolita (alterita o formación superficial) y suelo. Los términos suelo y roca son bien conocidos; en cambio, el término saprolita o alterita corresponde al estado medio de la roca hacia el suelo, por la meteorización.

Los contenidos elevados de arcilla en la zona de los manantiales reflejan, a grandes rasgos, la dinámica hidrogeológica que se da en el sitio. Si se suman los factores de pendiente, uso de la tierra y texturas arcillosas, se tiene un resultado bastante importante de tomar en consideración.

Las altas pendientes y el uso de la tierra de pastos y terrenos en abandono propician que una cantidad importante de la precipitación escurra sobre el terreno. Esta afirmación surge a partir de lo observado en la campaña bimensual de medición hidrométrica, ya que no se cuenta con estaciones meteorológicas cercanas.

Si se considera que el terreno está degradado por un mal uso de la tierra y que esta muestra cantidades importantes de hasta 40% de arcillas, las cuales por su estructura molecular funcionan como capas sellantes (es decir que por su tamaño de poro tan pequeño y su alta saturación no permiten el flujo percolante hacia las unidades hidrogeológicas que presentan propiedades acuí-

feras), entonces es de esperar altas tasas de esorrentía, erosión y sedimentación, que afectan el proyecto hidroeléctrico (Aparicio, 1989). Los resultados del muestreo y su análisis son de mucha utilidad, puesto que explican en gran medida los resultados del análisis hidrométrico.

## Análisis hidrométrico (agosto 2008-julio 2009)

Durante un año, se realizaron aforos volumétricos en los manantiales del PHEE, con el fin de entender la dinámica hidrométrica de los manantiales y su relación con las unidades hidrogeológicas.

Los aforos se realizaron utilizando el método volumétrico (Sanders, 1998), considerado el método de aforo más exacto, pues consiste en hacer llegar una determinada cantidad de agua a un recipiente de volumen conocido y se llena hasta alcanzar el tope en un cierto tiempo; dividiendo el volumen entre el tiempo, se tiene el caudal en unidades congruentes. Los ensayos se ejecutaron de la manera usual, según la metodología de campo previamente establecida y las normas hidrogeológicas de ejecución de ensayos de campo (Sanders, 1998).

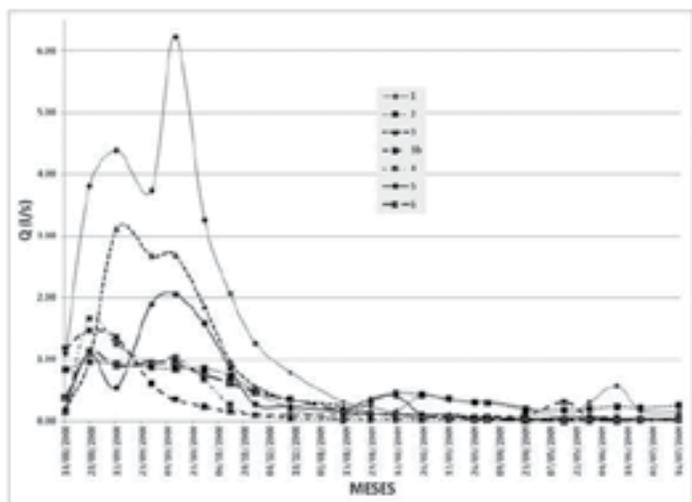
Los resultados de los aforos bimensuales se presentan en las figura 3 y 4, en las cuales se observa un hidrograma anual de los manantiales. Se puede observar con facilidad un incremento del caudal en los primeros meses de inicio del estudio hidrométrico, es decir, agosto y setiembre, y una disminución considerable hacia la época seca. Los caudales observados del período agosto-noviembre habían alcanzado, en promedio, 2,98 l/s. En los meses siguientes, el promedio mensual para todos los manantiales no superó los 0,28 l/s.

**Cuadro 2.** Caudal promedio anual de los 12 manantiales, ubicados a lo largo de la línea de conducción del PHEE.

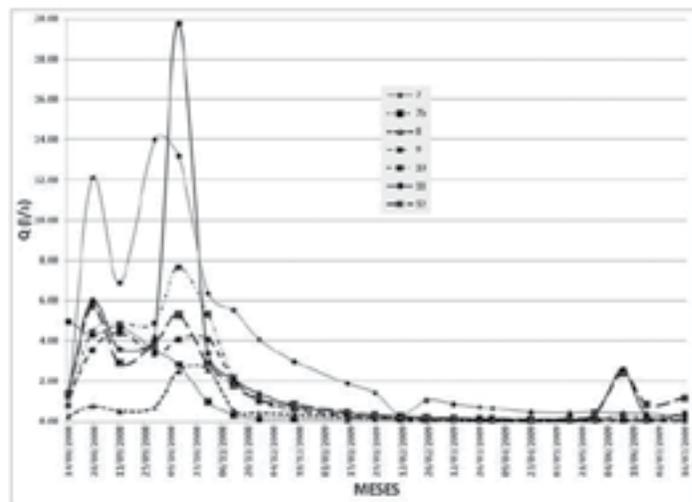
Id	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)	Caudal promedio anual (l/s)
1	450904,0	237841,0	361,52	1,37
2	451428,0	237391,0	294,80	0,47
3	451344,0	237765,0	380,30	0,96
4	451545,0	237800,0	382,90	0,29
5	451858,0	237809,0	396,72	0,46
6	452132,0	237851,0	337,28	0,32
7	452541,0	237985,0	320,84	4,47
8	452188,0	238735,0	438,01	0,46
9	452969,0	239433,0	460,00	1,15
10	453615,0	240351,0	611,38	156
11	453672,0	240433,0	656,10	2,17
12	453389,0	240389,0	596,64	1,47

Fuente: Trabajo de campo, 2008

**Figura 2.** Hidrograma de los manantiales del 1 al 6, ubicados a lo largo del túnel de conducción del PHEE.



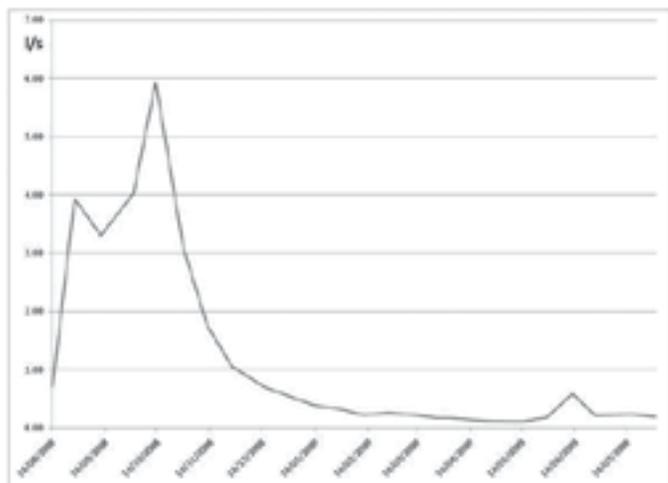
**Figura 3.** Hidrograma de los manantiales del 7 al 12, ubicados a lo largo del túnel de conducción del PHEE.



A partir del hidrograma de los manantiales, se puede decir que existe una marcada disminución de los caudales, desde el año 2008 hasta la fecha, sobre lo que se pueden exponer varias hipótesis.

Debido a la complejidad geológica del sitio, su fallamiento y la alteración hidrotermal, es de esperar que se den unidades hidrogeológicas de diferentes características hidráulicas. Algunas de ellas son porosidad, conductividad hidráulica, transmisividad, almacenamiento, entre otras. Los manantiales ubicados a lo largo del túnel de conducción (cuadro 2) mantienen caudales relativamente bajos, lo cual podría indicar espesores acuíferos muy pequeños, relacionados con niveles colgados y conductividades hidráulicas bajas. Esto último debido posiblemente, al intercalamiento de unidades hidrogeológicas de distintas propiedades hidráulicas.

**Figura 4.** Hidrograma promedio anual de los manantiales del PHEE.



## Conclusiones y recomendaciones

Si bien no hay una evidencia plena de que hubiese existido algún tipo de fuga del nivel, por la construcción del túnel, esto no debe ser descartado. La CNFL debe continuar los registros hidrométricos de estos manantiales, con el propósito de precisar los efectos y cambios de los niveles y si estos son causados por el efecto del túnel.

Aun cuando se ha realizado un estudio hidrométrico, es necesario elaborar un modelo hidrogeológico conceptual, basado en un estudio geológico detallado. Tal estudio debe responder a

las necesidades del proyecto. Según los insumos e información facilitados por la CNFL, la construcción del túnel no supuso un estudio geológico detallado, con cartografiado geológico pormenorizado (1: 10 000 al menos), pruebas petrográficas y análisis hidrogeoquímicos de manantiales y ríos, perforaciones exploratorias con recuperación de testigo y estudios de geopedológicos, entre otros, que facilitarían la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.

Es importante cuantificar la carga de sedimentos al embalse del PHEE y la disminución del caudal promedio del río. Una opción sería realizar aforos diferenciales a lo largo de todo el río Aranjuez, especialmente en la época de estiaje, para cuantificar los aportes de manantiales y afluentes a su caudal. También es importante cuantificar los aportes del total de precipitación a la recarga acuífera.

## Referencias bibliográficas

- Aparicio, J. (1997). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- Bear, J. (2007). *Hydraulics of Groundwater*. Nueva York: Dover Publications.
- Bouwer, H. (1986). Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. En Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (825-844). Nueva York: Madison, American Society of Agronomy.
- Ghella S. P. A. (2007). *Informe del Túnel de Conducción*. (Informe Técnico). San José: Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A.
- Sanders, L. (1998). *A Manual of Field Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall.