

Evaluación hidrogeológica de la cuenca hidrográfica Las Abras, provincia de Chimborazo, Ecuador

Hydrogeological assessment of watershed Las Abras, province of
Chimborazo, Ecuador

César Borja-Bernal^{1,*}, Galo Salcedo-Maridueña¹,
Jessica Cedeño-Bermeo² & Carlos Montalvo¹

¹ Docente de la Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez
Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil, Ecuador

² Estudiante de la Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl
Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil, Ecuador

Recibido 19 de octubre 2015; recibido en forma revisada 7 de noviembre 2015, aceptado 14 de noviembre 2015
Disponible en línea 31 de diciembre 2015

Resumen

Mediante la evaluación cartográfica y geológica se determinaron parámetros morfométricos e hidrofísicos de la cuenca hidrográfica de Las Abras en la provincia del Chimborazo. La mencionada cuenca está emplazada sobre la Formación Riobamba, que consiste de piroclastos, lahares, flujos de lava y conglomerados volcánicos cuaternarios. Estas litologías tienen porosidad primaria intergranular y por fisuración y permeabilidades medias a altas ($k = 10^{-1} - 10^{-3}$ cm/s). La valoración morfométrica de la cuenca indica una forma alargada, $R_f = 0.22$, $C_c = 0.17$, $K_c = 2.40$ y $R_{bu} = 5$, y una densidad de drenaje baja, $D_d = 0.98$ Km/Km², que impide la generación de crecidas violentas ($S_c = 0.98$ %). En consecuencia, el agua superficial discurre lentamente con suficiente tiempo para infiltrar y alimentar los acuíferos subterráneos y las aguas superficiales de la quebrada Las Abras recargan al acuífero subterráneo local, esta característica fue comprobada por geofísica. En conclusión, la cuenca Las Abras es apta para conducir y almacenar aguas subterráneas, pero no para permitir el escurrimiento de caudales superficiales.

Palabras claves: Análisis morfométrico, cuenca hidrográfica, Ecuador, Las Abras, tomografía eléctrica.

Abstract

Morphometric and hydrophysical parameters of Las Abras hydrographic basin, Chimborazo province, were determined by geological mapping and cartographic evaluation. The basin is overlying the Riobamba Formation, which consists of pyroclastic, lahars, lava flows and volcanic conglomerates of Quaternary age. The lithology have medium to high permeability ($k = 10^{-1} - 10^{-3}$ cm/s), with primary and fracture porosities. The basin morphometric evaluation indicates an elongated shape because of $R_f = 0.22$, $C_c = 0.17$, $K_c = 2.40$ y $R_{bu} = 5$, and a low density drain, $D_d = 0.98$ Km/Km², that prevents the creation of violent floods ($S_c = 0.98$ %). Accordingly, surface water runs slowly with enough time to infiltrate and feed groundwater aquifers, surface water recharge Las Abras local underground aquifer. This feature was tested with geophysics. In conclusion, the basin Las Abras is fit to drive and store groundwater, but not to allow surface runoff flows.

Keywords: Ecuador, Las Abras, morphometric analysis, watershed, electrical tomography.

Introducción

El acceso al agua potable es uno de los principales problemas a nivel mundial y nacional, en este contexto se ve la necesidad de implementar procedimientos más rápidos y rigurosos que permitan evaluar de manera eficiente una cuenca hidrográfica y determinar su potencial para producir caudales superficiales y subterráneos que puedan sustentar la demanda de agua para consumo humano (JICA, 2006).

La valoración morfométrica tiene como objetivo encontrar parámetros que nos ayuden a caracterizar un ambiente geomorfológico que sea susceptible de un tratamiento estadístico o matemático preciso, el cual permita disminuir la influencia de la subjetividad en las conclusiones que se deriven de esos parámetros (figura 1). En particular, la morfometría de cuencas de drenaje ha reunido un conjunto numeroso de parámetros que representan propiedades inherentes al sistema fluvial (Doffo et al., 2005).

* Correspondencia del autor:
E-mail: consejoj@hotmai.com



Basándonos en lo antes mencionado, podemos afirmar que al utilizar las técnicas de evaluación cartográfica y geofísica para cuencas hidrográficas, se puede definir efectivamente la posibilidad de alumbamiento de aguas subterráneas profundas, o calcular la generación de caudales superficiales de uso genérico. Este tipo de estudio y el uso de nuevos procedimientos de evaluación, mejorarán la calidad de vida de las comunidades beneficiarias por la evaluación integral de su recurso hidrogeológico. El método ayudará a reducir costos de investigación ya que se puede predecir el potencial hídrico de la cuenca antes de realizar los trabajos de prospección superficial con métodos geofísicos (figura 2).

La presente investigación deja sentada las bases para posteriores estudios ambientales que tengan como objetivos la gestión integral de los recursos hídricos y su manejo sustentable.

Área de estudio

El área de investigación se encuentra ubicada en la sierra central ecuatoriana; el centro poblado más cercano es el pueblo de Guano, el cual colinda geográficamente con la ciudad de Riobamba, para ingresar a la zona de estudio se debe usar vías de primer y segundo orden. El sector es parte del área rural de Chimborazo, zona que al estar alejada de la cabecera cantonal, se ve altamente afectada por la falta de acceso a las principales fuentes de agua que le permitan satisfacer sus necesidades básicas.

La cuenca hidrográfica Las Abras presenta un clima Ecuatorial de Alta Montaña en la parte alta, continuando en la parte media con un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-húmedo y en la parte baja de la cuenca con un clima Ecuatorial Mesotérmico Seco.

Las temperaturas medias anuales están entre los 10-12 grados centígrados, con precipitaciones medias anuales de 0-500 mm para la cuenca baja y de 500-750 mm para la cuenca alta (figura 2). Las coordenadas de georreferenciación del punto de descarga son 759736 X - 9819207 Y - 2856 Z tomadas en SAM56.

Materiales y métodos

Método de análisis espacial

El procesamiento de la información espacial de la cuenca de drenaje Las Abras se inicia con la toma de datos en campo, la cual es proyectada sobre la cartografía del IGM (Instituto Geográfico Militar, 2015) y transformada desde el sistema de coordenadas *Provisional South American Datum UTM Zone 17S* al sistema de coordenadas *World Geodetic System 1984 UTM Zone 17S*. La base de datos fue levantada con información proveniente del satélite Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), la misma que es descargada y analizada a través del software Global Mapper 15.2, dentro del cual fueron usados los siguientes comandos:

1. *Download Online Data*, que conecta el programa

y descarga la información enfocada en un punto geográfico de interés.

2. *Digitizer Tool*, que delimita el área la cual va a ser analizada.
3. *Analysis*, que permite la realización de cálculos necesarios para generar las sub cuencas de drenaje.
4. *Generate Watershed*, que calcula la superficie de la red de drenaje y sus subcuencas con sus principales aportantes.

La información generada por el software Global Mapper, es exportada al software ArcMap para continuar procesamiento de información.

Finalmente, la base de datos corregida y aumentada del IGM se combina conjuntamente con la información proveniente del satélite SRTM, que anteriormente fue procesada. Para abrir este archivo se utiliza ArcMap; una vez finalizado, se usa para la edición final de mapas, las herramientas *Geoprocessing* y *ArcToolbox*, que se encuentran agrupadas en la subcarpeta *Spatial Analyst Tools*.

Mediante este análisis informático se obtuvieron los siguientes parámetros de cálculo:

Análisis Morfométrico de la cuenca de drenaje

El estudio morfométrico de la cuenca es necesario para conocer la característica física de la misma, para analizar la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca, a partir del cálculo de valores numéricos; además de permitir el estudio de la semejanza de flujos de diferente tamaño (Ruiz, 2001), con el fin de aplicar los resultados de los modelos elaborados de pequeña escala a prototipos de gran escala (Chow et al., 1994).

Para realizar esto, es necesario un mapa con la suficiente información hidrográfica y topográfica.

Método geofísico mediante tomografías eléctricas

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectrónico, basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). Es de uso generalizado tanto en Europa como en EE.UU en la resolución de un amplio abanico de problemas ingenieriles e hidrogeológicos. En la bibliografía anglosajona (i.e. Dahlin [1]), se distinguen dos nomenclaturas en función de la disposición de los electrodos en el terreno: "Electrical imaging", en el caso que se dispongan los electrodos en superficie, o "Electrical tomography", si se hallan en el interior de sondeos verticales (Universidad Politécnica de Cataluña).

En el presente estudio se usaron los equipos de IRIS instruments, resistivímetro modelo SYSCAL Pro Switch 48, Resistivity & IP for sounding, imaging and monitoring.

Resultados y discusión

Dentro del análisis morfométrico de la cuenca, los principales parámetros físicos a determinar son:

1. Forma de la Cuenca

1.1. *Relación de Forma según Horton*: Se utiliza la siguiente fórmula:

$$Rf = \frac{A}{La^2}$$

Donde "A" es el área de la cuenca y "La" representa la longitud del cauce principal, lo que nos da un resultado de 0.22, éste indica que se trata de una cuenca con forma alargada al realizar la comparación con la tabla 1.

Tabla 1. Valores interpretativos del factor forma

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.300	Alargada
0.300 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.450	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.60 - 1.20	Muy ensanchada
> 1.200	Rodeando el desagüe

1.2. *Coficiente de Circularidad de Miller (Cc)*: Para calcularlo se utiliza la siguiente fórmula:

$$Cc = 4\pi + \frac{A}{p^2}$$

Donde "A" es el área total de la cuenca y "p" es el perímetro de la cuenca, dando como resultado 0.17 que nos ratifica que es una cuenca alargada, ya que valores cercanos a cero indican morfologías alargadas, mientras que valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas.

1.3. *Coficiente de Compacidad*: Este representa la relación entre el perímetro de la hoya y el de una circunferencia de área igual a la cuenca. Para calcularlo se usa la siguiente fórmula:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde "P" representa el perímetro y "A" el área, el resultado obtenido es 2.40, ratificando que es una cuenca alargada, debido a que 1 representa la forma circular y entre más se aleje de este valor más largada será la cuenca.

2. Red de Drenaje

1.4. *Relación de Bifurcación (Horton/Strahler)*: expresada como una medida importante dentro del análisis de drenaje de una cuenca. Por eso se debe conocer la Relación de Bifurcación

promedio de toda la cuenca, debido a que ésta se asocia directamente a la formación de crecidas, en donde valores de Rb (Relación de Bifurcación) bajos se asocian con cuencas muy bien drenadas y alta probabilidad de generar crecidas; mientras que un valor de Rb alto está relacionado a cuencas poco drenadas, derivando en una baja posibilidad de generar crecidas. En este caso, la cuenca presenta un valor de 5, cercano al valor definido para cuencas con una morfología alargada a lo largo de toda la cuenca y ensanchada en la parte alta (Horton & Strahler, 1964).

1.5. *Densidad de Drenaje*: es un parámetro muy importante y está definido por la siguiente fórmula:

$$Dd = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N li, u/A$$

En la cual "Dd" es la densidad del drenaje expresada en Km/Km², "li, u" es la longitud total de todos los cauces en Km y "A" es el área total de la cuenca en Km². En nuestro caso, el valor resultante es 0.98 Km/Km², el cual comparado con los valores interpretativos (Delgadillo, 2008) situados en la tabla 2, indica que en este caso se trata de una densidad de drenaje baja.

Tabla 2. valores interpretativos de la densidad de drenaje

Densidad de Drenaje (Km/Km2)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
>3	Muy Alta

1.6. *Longitud Promedio del Cauce Lu*: es una propiedad dimensional en la cual se refleja el tamaño característico de los cauces y de las superficies de sus cuencas contribuyentes, debido a que los ríos de gran longitud poseen mayores afluentes y por consiguiente ocupan un área superficial mayor que los ríos de poca longitud. Este parámetro se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$\bar{lu} = \sum_{j=1}^N li, u/Nu$$

En la cual "li, u" es la longitud total de todos los cauces y "Nu" es el número total de todos los cauces, obteniendo como resultado 2.38 Km de Longitud Promedio del Cauce Lu (Ruiz, 2001)

2. Pendientes

2.1. *Pendiente Media del Cauce Principal y Pendiente Media de la Cuenca*: en la medida

con la cual el valor de ambos parámetros se incrementa, mayor será la posibilidad de generar crecidas, debido a que la capacidad de arrastre de sedimentos y la velocidad del caudal en caso de tormentas se incrementa en las cuencas con mayor pendiente, una situación diferente cuando ambos valores son bajos ya que en este caso los picos de crecidas serán menos violentos (Delgadillo, 2015).

- 2.2. *Pendiente Media de la Cuenca*: es calculada por el método de Albord (Guevara, 1991; Ruiz, 2001), la cual emplea la siguiente fórmula:

$$Sc = \left(\frac{\sum li * eq}{A} \right) 100$$

Donde "Sc" es la pendiente media de la cuenca, "Σli" y corresponde a la sumatoria de todas las longitudes de las curvas de nivel en Km y "eq" representa la equidistancia entre curvas en Km. En este caso el resultado es 0.98, éste al ser comparado con la tabla 3 (Pérez, 1979) nos indica que se trata de un terreno llano, el cual difícilmente generará crecidas violentas.

Tabla 3. Característica cualitativa del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente

Pendiente media (%)	Terrenos
0-2	Llano
2-5	Suave
5-10	Accidentado medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy escarpado

- 2.3. *Pendiente Media del Cauce Principal*: para la obtención de este último parámetro se utiliza las fórmulas:

$$S = \sum DV/DH * 100$$

ó

$$S = \sum \Delta hi / \Delta li * 100$$

Donde "DV" es la distancia vertical en metros, "DH" es la distancia horizontal en metros, "Δhi" es el desnivel en metros y "Δli" es la distancia horizontal en metros; siendo 3.17 el resultado para esta cuenca, cuyo resultado está basado en los datos obtenidos de la tabla 4, en donde se aprecian el perfil longitudinal de la subcuenca.

Este resultado de S = 3.17 indica que no es un valor excesivamente distante de cero y demuestra que definitivamente las posibilidades de que la cuenca genere crecidas con picos violentos son muy escasas.

Como dato adicional se presenta la tabla 5, que muestra algunas características de la red de drenaje de la subcuenca de la quebrada Las Abras.

Tabla 4. Cálculo de la pendiente media de la cuenca

Cotas	Progresivas	Δhi (m)	Δli (m)	S(%)
3292	0+000	0		
3228	0+602	602	64	602
3197	1+676	1676	31	1074
3166	3+147	3145	31	1469
3135	4+476	4476	31	1331
3104	5+374	5374	31	898
3073	6+446	6446	31	1072
3042	7+476	7476	31	1030
3011	8+258	8258	31	782
2980	9+349	9349	31	1091
2949	10+549	10549	31	1200
2918	11+477	11477	31	928
2887	12+390	12390	31	913
2856	13+370	13370	31	980
2825	14+711	14711	31	1341
		Σ	467	14711
				3,17

3. Prospección geofísica

La cuenca hidrográfica geológicamente está formada por materiales volcánicos, volcánico sedimentarios y aluviales del cuaternario. Geofísicamente, estos estratos están representados con valores de resistividad eléctrica de 180 a 400 ohmios metro, cuando están secos, sin embargo, cuando son humedecidos o han alcanzado la saturación, los valores de resistividad eléctrica pueden bajar hasta 80 ohm-m.

Como resultado de la prospección geofísica se observó que las aguas que discurren sobre la quebrada Las Abras saturan y sobre saturan a las litologías volcánicas superiores. En el perfil geofísico, también se observó que a setenta metros de profundidad las aguas de saturación se incorporan a la napa freática local, alimentando de esta forma los acuíferos subterráneos.

Conclusiones

El factor de forma Rf=0.22 evaluado en la cuenca de la quebrada Las Abras, indica una forma alargada que es ratificada por: el coeficiente de circulación de Miller Cc=0.17; el coeficiente de compacidad Kc=2.40; y una relación de bifurcación Rbu=5. Además, la pendiente del cauce principal (S=3.17) es baja, confirmando que la respuesta hidrológica de la cuenca es lenta.

Las características fisiográficas, evaluación cartográfica y valores morfométricos indican que las aguas infiltradas alcanzan los niveles freáticos profundos, alimentan los mantos acuíferos

Tabla 5. Características de la red de drenaje principal

Órdenes de los cauces (u)	Número de orden (Nu)	Longitud de los cauces Σli, u (Km)	Relación de bifurcación (Rbu)	Longitud promedio de los cauces de orden U. lu (Km)	Densidad de drenaje Dd
1	16	29,39	8,00	1,84	
2	2	1,2	2,00	0,60	
3	1	14,7		14,70	0,98
	19	45,29	5,00		

subterráneos y que es una cuenca en estado de madurez y equilibrio.

La prospección geofísica indica que los estratos superficiales con humedad baja (10%-20%) tienen valores de resistividades eléctricas de 180 a 400 ohmios metro; y que los estratos profundos con humedad de 70% hasta la saturación total, tienen resistividades de 80 a 140 ohm-m.

La geofísica determinó que las aguas superficiales de la quebrada Las Abras saturan y sobresaturan las litologías volcánicas; y que, a 70 metros de profundidad, las aguas de saturación se incorporan a la napa freática local, alimentando los acuíferos subterráneos.

La metodología expuesta es utilizable en estudios ambientales de evaluación matemática, hidrográfica e hidrológica de cuencas; y estimar la susceptibilidad de los acuíferos subterráneos ante caudales superficiales contaminados. En consecuencia, permite proyectar el manejo integral de una cuenca hidrográfica considerando su morfometría, los procesos asociados a caudales superficiales y la infiltración e hidráulica de los acuíferos.

Referencias

Chow, V., D. Maidment y L. Mays. 1994. Hidrología aplicada. Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
 Delgado, A. 2008. Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pino Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo.

Caracterización de la cuenca del valle de Mocoties. Mérida, Venezuela: Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)- Fundación para la Prevención de los Riesgos del estado de Mérida (FUNDAPRIS).
 Delgado, A. 2015. Web del Profesor. Recuperado de <http://www.webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf>
 Campo, A. 2011. Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina. Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/31006/41990>.
 Doffo, N., González y G. Bonorino. 2005. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico, Revista de la Asociación Geológica Argentina, v.60, n.1.
 Guevara, E. 1991. Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada. Valencia-Venezuela: Universidad de Carabobo.
 Horton, R. E. y A. N. Strahler. 1964. Quantitative Geomorphology.
 Instituto Geográfico Militar. 2015. Cartografía de Libre Acceso. Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/>
 JICA. 2006. Diseño básico del Proyecto de Desarrollo de Aguas Subterráneas para la provincia de Chimborazo. Riobamba: Japan Internacional Cooperation Agency y Embajada del Japón en Ecuador.
 Pérez, J. 1979. Fundamentos del Ciclo Hidrológico. Caracas-Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología.
 Ruiz, J. 2001. Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuenca como aplicación. Barinas, Venezuela: UNELLEZ.
 Universidad Politécnica de Cataluña. 2015. UPCommons, Portal de coneixement obert de la UPC. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

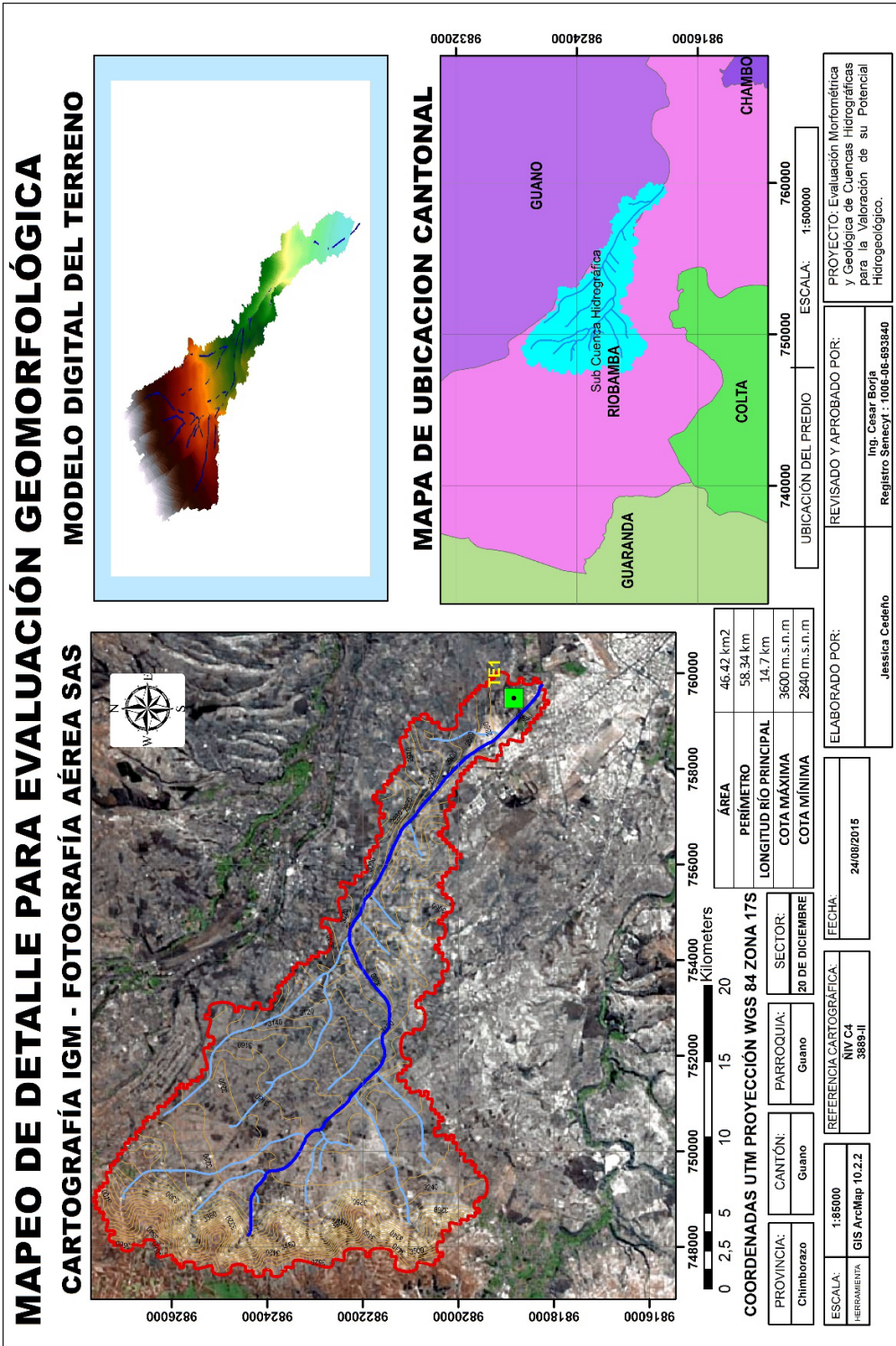


Figura 1.- Mapa de análisis cartográfico y delimitación de la cuenca hidrográfica para cálculo de parámetros geomorfológicos.

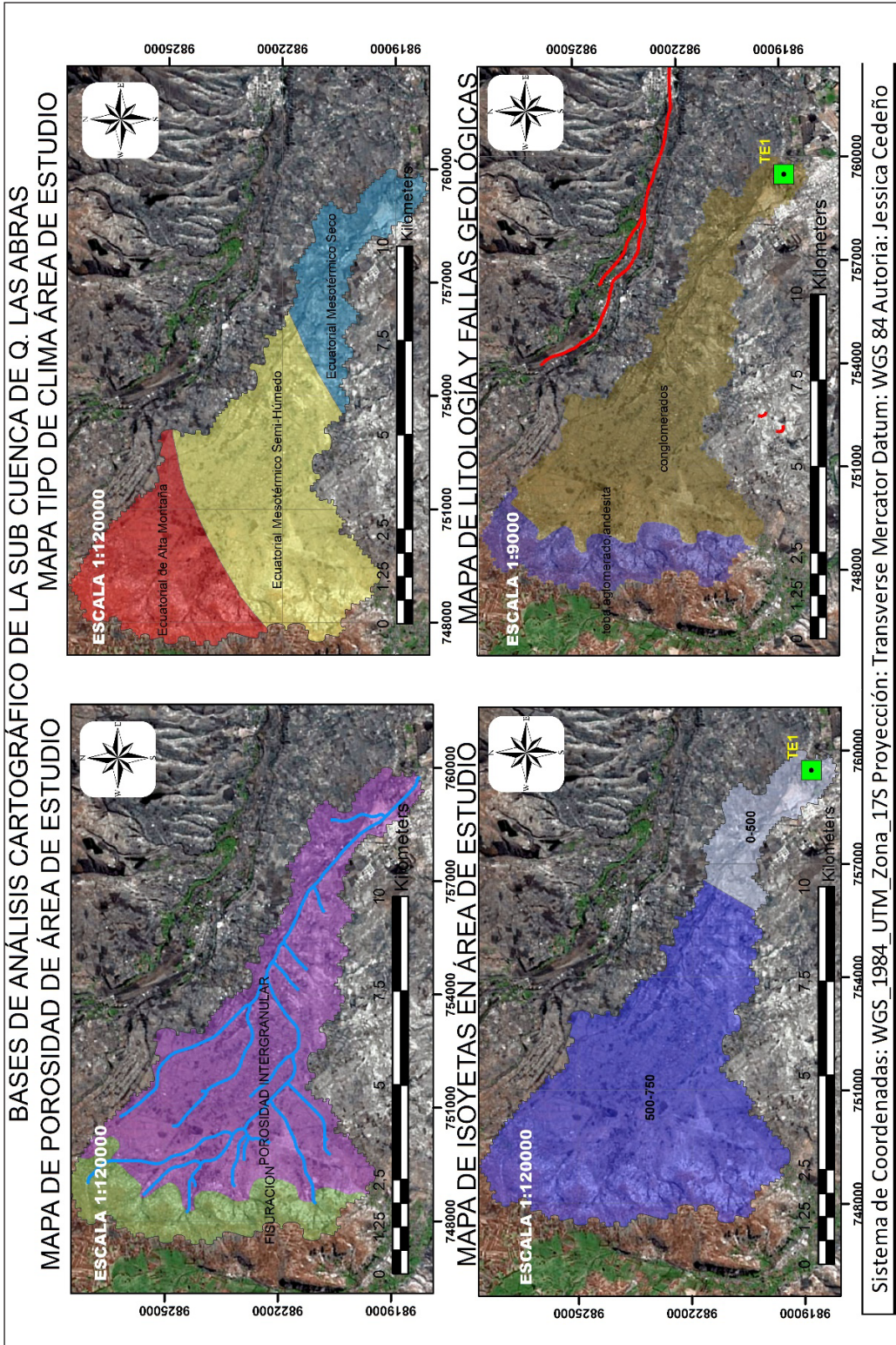


Figura 2.- Mapa de análisis geo-ambiental para la determinación de parámetros de evaluación morfométricos de la sub-cuenca.

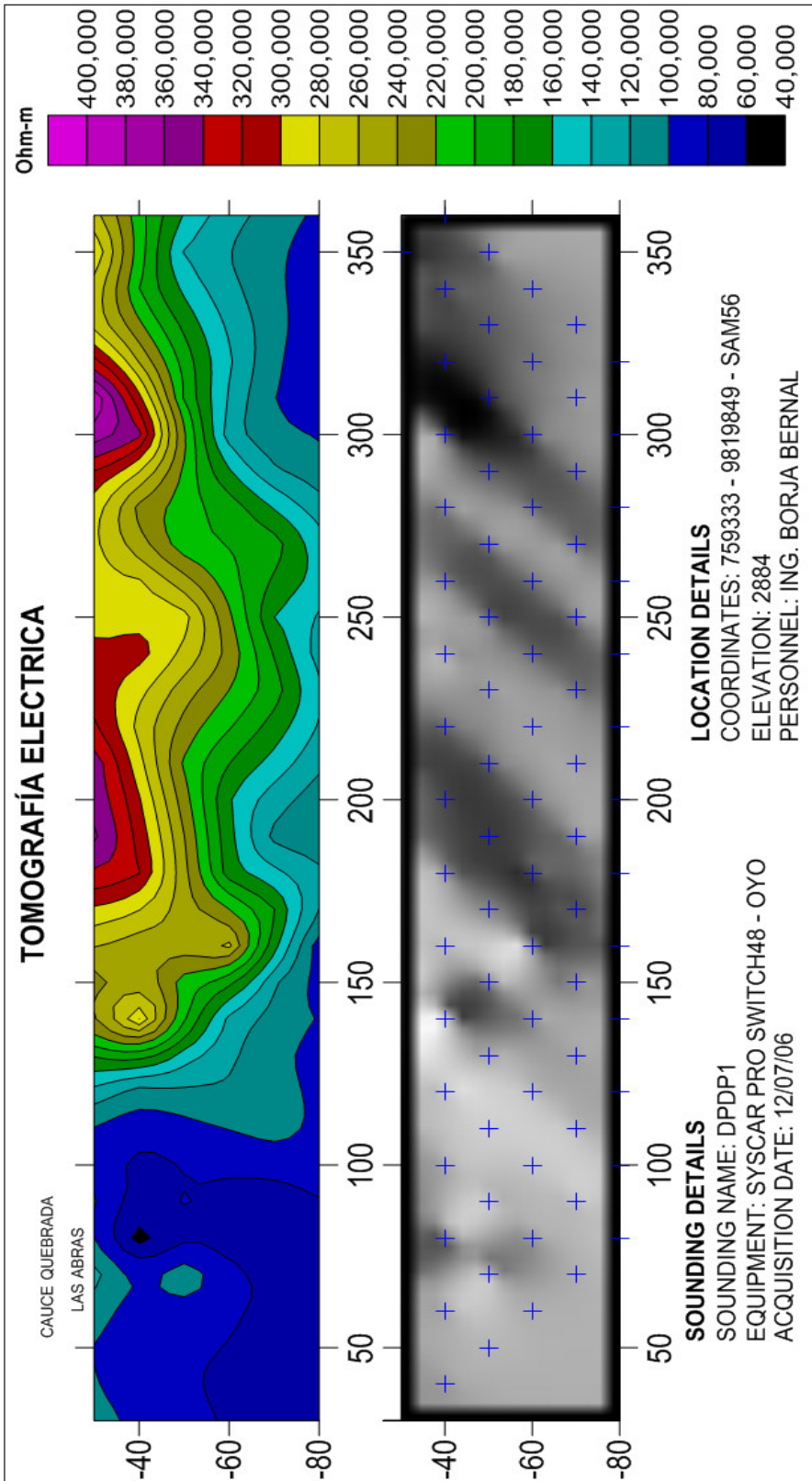


Figura 3.- Perfil geofísico de la zona de interés donde se encuentra asentada la comunidad 20 de diciembre.