

MORFOMETRÍA EN LA CUENCA HIDROLÓGICA DE SAN JOSÉ DEL CABO, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

MORFOMETRY IN SAN JOSÉ DEL CABO HIDROLOGIC BASIN, SOUTH BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Genaro Martínez* & José J. Díaz

Departamento Académico de Geología Marina,
Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, B.C.S., 23080

*Autor para contacto: martingg@uabcs.mx

(Recibido: 07/06/2010; aceptado: 01/06/2011)

Abstract: The San José del Cabo basin is located in the southern tip of the Baja California peninsula in México. The basin is one of the largest in the state and is considered the major water source for the state. The aquifers and wells that supply water to the urban and tourist areas are in the lower areas (alluvial plains) of the basin; however the aquifers recharge takes place in the mountain region. A crystalline complex basement made of igneous and metamorphic rocks characterizes the mountain region. Landsat ETM image analysis, aerial photographs, and digital elevation models were used to map the geomorphology, geology and structures in the basin. Structural features such as linear and curvilinear lineaments and andesitic dykes were obtained from digital elevation model analysis. Morphometric parameters and structural features analyses from seven sub-basins were obtained to determine recharge areas to the San Jose del Cabo watershed. A well-fractured system developed in the mountain region exhibits good conditions for primary recharge. The results show that Landsat image and digital elevation model analysis provide a viable source of data and information for mapping and delineating areas of recharge and discharge on a regional scale.

Keywords: San José del Cabo, lineament, recharge, Landsat, basin morphometry

Resumen: La cuenca hidrológica-forestal de San José del Cabo, localizada al sur de la península de Baja California, México, es la de mayor extensión en el estado de Baja California Sur y es considerada como una de las principales fuentes de recursos hídricos. Los acuíferos que suministran agua a las áreas turísticas y urbanas están en las partes bajas (planicies aluviales) de la cuenca. Un complejo cristalino constituido por rocas ígneas y metamórficas caracteriza la región montañosa de la cuenca. Análisis de imagen Landsat ETM, fotografías aéreas y modelo digital de elevación fueron usados para cartografiar la geomorfología, geología y desarrollar un análisis morfométrico en la margen occidental de la cuenca. Rasgos estructurales tales como alineamientos rectos o curvilíneos y diques fueron obtenidos del modelo digital de elevación. Parámetros morfométricos y análisis estructural de siete subcuencas se derivaron para determinar áreas potenciales de captura hacia la Cuenca Hidrológica de San José del Cabo (CHSJC). Del análisis se identificó

que la captura toma lugar en la parte serrana de la cuenca, dentro del basamento cristalino a través de un sistema de fracturamiento interconectado. Se proponen dos subcuencas como las principales áreas de recarga hacia la CHSJC. Los resultados muestran que la investigación con imagen Landsat y el modelo digital de elevación proporcionan, una fuente acertada de datos e información para la identificación de áreas de recarga y descarga a una escala regional.

Palabras clave: San José del Cabo, alineamiento, recarga, Landsat, morfometría de cuencas

INTRODUCCIÓN

El agua, nuestro recurso natural más fundamental para la subsistencia, cada día está más limitado y amenazado, convirtiéndose en uno de los grandes problemas actuales de la humanidad. La dificultad de abastecimiento de agua potable a la población es de gran interés para muchos países del mundo. Estudios en la búsqueda de nuevos acuíferos son realizados en varias regiones del mundo, a fin de seguir proporcionando el vital recurso. Los recursos hídricos de regiones áridas y semiáridas del planeta se encuentran entre los más amenazados, debido a la escasa precipitación que limita la recarga de los acuíferos. A nivel mundial, el promedio anual de precipitación en estas regiones fluctúa entre 400 a 500 mm (Chorley et al., 1984; Lloyd, 1999). Los acuíferos existentes en estas zonas ocurren principalmente en depósitos aluviales (abanicos aluviales y planicies aluviales); sin embargo, acuíferos en rocas fracturadas (rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas) son viables de encontrar (Lloyd, 1999; Cook, 2003). La exploración y explotación de acuíferos en rocas fracturadas radica principalmente en la necesidad de obtener el vital recurso y conocer el comportamiento del agua subterránea dentro de estas litologías.

A partir de la segunda mitad de la década del 80, estudios hidrogeológicos fueron realizados en rocas fracturadas en países con escasez o limitaciones del recurso (Larsson, 1984; Lloyd, 1986; Acworth, 1987; Bestow, 1987; Black, 1987; Lloyd, 1999). Investigaciones en varias partes del mundo han propuesto modelos ideales sobre la recarga de acuíferos en medios fracturados en zonas áridas (Lloyd, 1999). Por ejemplo, en Sudan y

Etiopía, diversos estudios estimaron la recarga de acuíferos en medios fracturados (rocas volcánicas y granitos), por medio del balance de masas de cloritoide (Haile, 2005). Modelación, de tasas de infiltración y flujo de fluidos en medios fracturados, es desarrollada en la identificación y cuantificación de recarga en acuíferos (Cook, 2003). Por otro lado, estudios teóricos han sido implementados para definir el comportamiento del agua durante la recarga de acuíferos en medios fracturados, a través de series de tiempo de trayectorias de flujo (Lee & Lee, 2000; Dioso, 2002). En Estados Unidos de Norteamérica, diversos investigadores realizaron estudios en medios fracturados a fin de identificar el potencial de contaminación de los acuíferos por infiltración debido a la actividad antropogénica (Schmelling, 1998).

Investigaciones en el ámbito hidrogeológico han empleado la tecnología de la percepción remota desde diferentes perspectivas tales como, análisis de cuencas hidrológicas (Rango, 1977; Ragan & Jackson, 1980; Sharma & Singh, 1992; Shih, 1996), contaminación (Schmelling, 1998; Salmon et al., 2001; Min, 2004), exploración (Salama et al., 1994; Shaban et al., 2006), y modelación (Schultz, 1988; Engman & Gurney, 1991; Schultz, 1993; Townsend & Walsh, 1998). La exploración e identificación de áreas de recarga y descarga empleando imágenes de satélite y fotografías aéreas ha sido realizada con éxito en varias regiones del mundo, por ejemplo en, Australia occidental, Etiopía, Sudan, a través del análisis estructural de alineamientos visibles en las imágenes (Salama et al., 1994).

La recarga de agua subterránea, flujo y descarga en una cuenca hidrológica está controlada principalmente por la interacción de varios factores como

son: la geomorfología, geología, patrón estructural y clima de la región. Estos factores cubren en muchos de los casos extensas áreas geográficas, los cuales pueden ser evaluados rápidamente por medio del uso de fotografías aéreas e imágenes de satélite (Meijerink, 2007). El empleo de la percepción remota facilita la delineación de áreas de captura y recarga, estableciendo la relación entre estos factores y los mecanismos de transporte y almacenamiento del agua subterránea. En este contexto, este trabajo presenta los resultados de un estudio integrado empleando técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG) en la identificación de áreas potenciales para la captura de agua hacia el acuífero de la cuenca hidrológica de San José del Cabo, Baja California Sur, dentro de la región serrana caracterizada por un basamento ígneo-metamórfico fracturado. Debido a escasa accesibilidad del terreno y la falta de información sobre

la transmisividad y permeabilidad, esta aproximación puede aportar información para identificar áreas de recarga.

ÁREA DE ESTUDIO

La Cuenca Hidrológica de San José del Cabo (CHSJC) con un área de 1278,46 km² se localiza en la porción sur de la península de Baja California, dentro del municipio de Los Cabos. El sistema fluvial desarrollado dentro de la cuenca consiste de una serie de tributarios (El Saltito, San Lázaro, San Miguelito, La Palma, San Ignacio, Boca de la Sierra y Caduaño) que se unen al arroyo principal de San José, el cual abastece de agua a los principales desarrollos turísticos y urbanos de San José del Cabo (Fig. 1).

La Región del Cabo tiene un clima semi-desértico con temperaturas máximas entre 30°

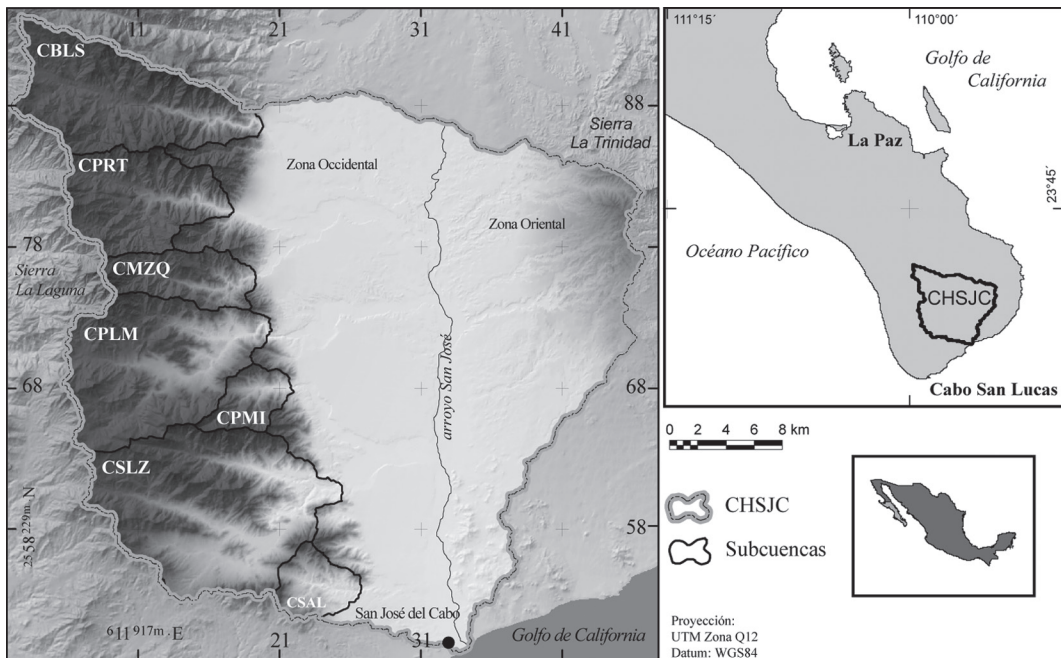


Fig. 1: Mapa de localización y división de subcuencas en la cuenca hidrológica de San José del Cabo (CBLA: subcuenca Boca de la Sierra, CPRT: subcuenca Portezuelo, CMZQ: subcuenca El Mezquite, CPLM: subcuenca La Palma, CPMI: subcuenca Palmilla, CSLZ: subcuenca San Lázaro, CSAL: subcuenca El Saltito).

y 38°C y mínimas de 22° a 25°C. Por otro lado el promedio anual de precipitación fluctúa entre 200 y 600 mm (Instituto Nacional de Estadística, 1994). La principal temporada de lluvias ocurre en el verano, determinada por precipitaciones convectivas y tormentas tropicales, aunque llegan a presentarse tormentas invernales.

A escala local, la fisiografía es diversa en el área cubierta por la CHSJC. Sin embargo, de acuerdo a la clasificación realizada por Cervantes Zamora et al. (1990) la cuenca se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica El Cabo. Amplios valles, extensas mesetas y aisladas mesas dominan la cuenca, estando delimitadas por las sierras La Trinidad (al oriente) y La Victoria (al occidente), elevaciones máximas de 800 y 1900 m.s.n.m., respectivamente (Fig. 1).

La cuenca para su estudio fue dividida en dos zonas: oriental y occidental, usando como elemento fisiográfico el arroyo San José (Fig. 1). Las zonas presentan diferencias geológicas y geomorfológicas, aunque ambas comparten unidades sedimentarias terciarias y cuaternarias.

Laderas ligeramente inclinadas y montañas aisladas identifican la zona oriental desde la población de San José del Cabo, hasta las inmediaciones de la Sierra La Trinidad, observándose el desarrollo de sedimentación, así como la formación de cañones profundos que disectan principalmente las unidades sedimentarias terciarias y cuaternarias. A diferencia del margen occidental, esta zona no está fuertemente afectada por fallas o estructuras que expongan el basamento (granítico).

El rasgo geomorfológico más sobresaliente del margen occidental es la falla San José, que define el límite del valle aluvial con las elevaciones montañosas de la Sierra La Laguna (Fig. 2). El relieve en esta parte de la sierra fluctúa de la cota 350 a los 1800 m.s.n.m., y se distingue por angostos y profundos valles. La formación de los valles está asociada con alineamientos estructurales que tienen una dirección preferencial NW-W (Hammond, 1954; Mayer & Martínez Gutiérrez, 1997). Los abanicos aluviales formados en el piedemonte no están cortados por la falla de San José, extendiéndose los depósitos dentro en algunos cañones, por ejemplo, Portezuelo, La Palma y San Lázaro.

Para el presente trabajo, la zona occidental fue seleccionada por ser de interés para la recarga del acuífero(s) de la CHSJC, ya que es la región donde se desarrolla la mayor ocurrencia de precipitación orográfica (fenómeno de sombra de lluvia) y convectiva en el estado, así como la incidencia de tormentas tropicales. La zona fue dividida de norte a sur en siete subcuencas: Boca de la Sierra (CBLS), Portezuelo (CPRT), El Mezquite (CMZQ), La Palma (CPLM), Palmilla (CPMI), San Lázaro (CSLZ) y El Saltito (CSAL), para su mejor estudio (Fig. 1).

Marco geológico

Las unidades litológicas expuestas en la CHSJC forman parte del medio graben conocido como cuenca de San José del Cabo (Martínez-Gutiérrez & Sethi, 1997; McTeague et al., 2005) (Fig. 2). Las rocas expuestas en la cuenca hidrográfica son agrupadas en dos conjuntos litoestratigráficos informales, i.e. complejo metamórfico y ensamble plutónico, y la cubierta sedimentaria.

El complejo metamórfico está expuesto solamente en la zona occidental de la cuenca, mientras que el ensamble plutónico aflora en ambas zonas (Fig. 2). El complejo está distribuido en una dirección NNE-S, y está formado por rocas gneis cuarzo-feldespáticas y diques andesíticos y/o dioríticos (Schaaf et al., 2000). El ensamble consiste principalmente de rocas de composición granítica (granito y granodiorita). Las rocas de la zona occidental definen el Bloque de Los Cabos, caracterizado por un sistema montañoso con orientación norte-sur, segmentado en bloques menores por fracturas regionales con orientación este-oeste (Mina Uthink, 1957; Schaaf et al., 2000).

En la parte central de la CHSJC está expuesta la cubierta sedimentaria que incluye las Formaciones Trinidad, Los Barriles, Refugio y El Chorro. Las unidades sedimentarias consisten de rocas sedimentarias de ambientes marinos y continentales cuyo intervalo estratigráfico abarca del Mioceno tardío al Pleistoceno (Martínez-Gutiérrez & Sethi, 1997; Fierstine et al., 2001).

Descansando discordantemente a las unidades sedimentarias marinas está la Formación

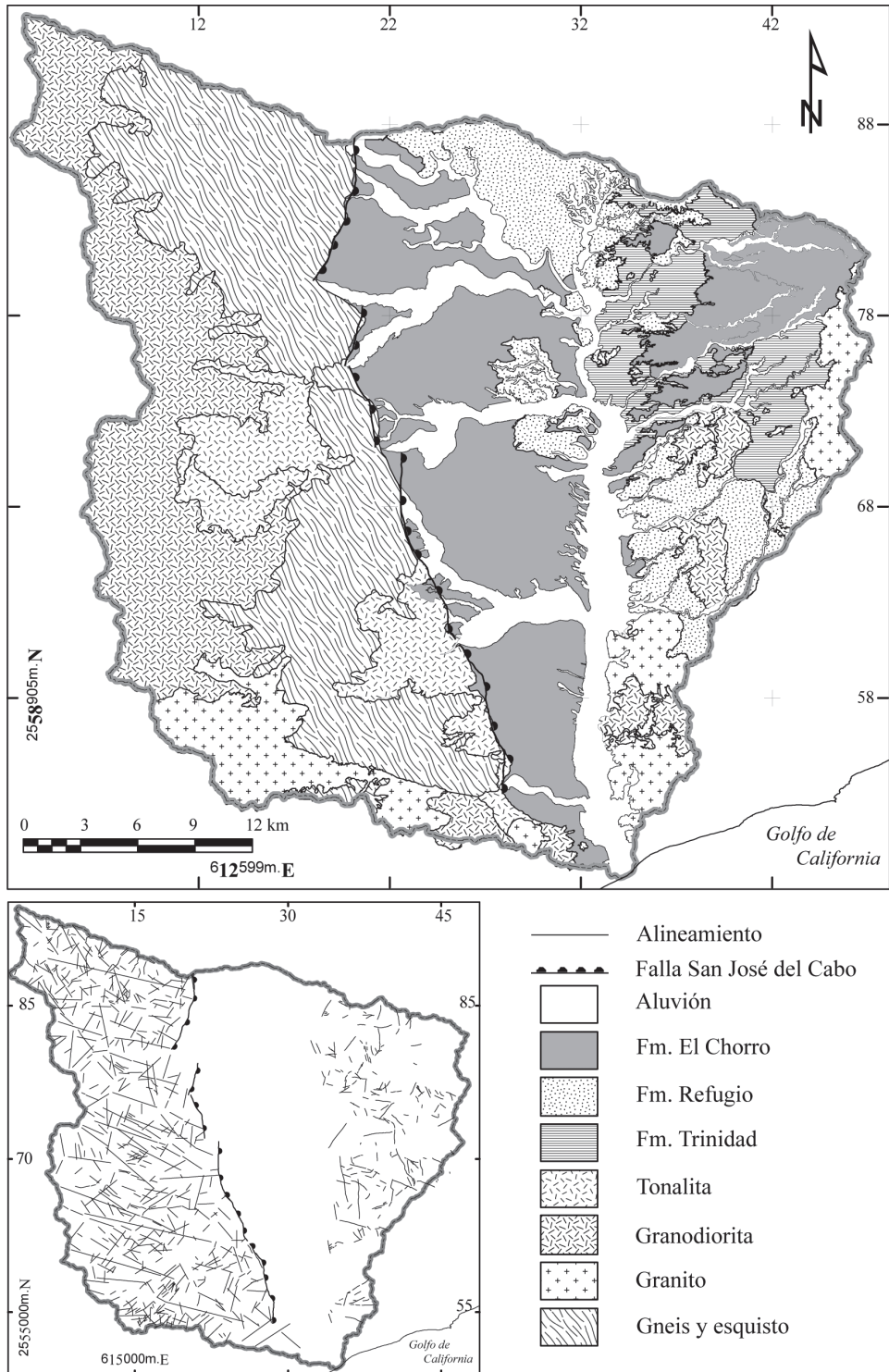


Fig. 2: Mapa geológico generalizado y principales estructuras de la CHSJ.

El Chorro. La unidad está ampliamente distribuida en la cuenca, aunque en la zona oriental los depósitos tienen menor extensión, confundiendo con el material de pedimento (Martínez-Gutiérrez & Sethi, 1997) (Fig. 2). La principal característica morfológica de esta unidad es la presencia de extensos abanicos aluviales.

Por último, el relleno sedimentario más reciente (Holoceno) de la Cuenca San José del Cabo está formado por sedimentos que provienen de las rocas expuestas en la cuenca. Estos depósitos se localizan sobre los cauces de los arroyos. El espesor de los depósitos es muy variable, que puede ir desde unos centímetros (~20 cm) hasta centenas de metros (~200 m, arroyo San José) (Pantoja-Alor & Carrillo-Bravo, 1966; Martínez-Gutiérrez & Sethi, 1997). La mayoría de los pozos de agua potable que surten a las poblaciones de San José del Cabo se encuentran en estos depósitos formados por la Fm. El Chorro y el relleno holocénico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Técnicas de procesamiento de imágenes y fotointerpretación fueron aplicadas a una imagen Landsat y a fotografías aéreas, respectivamente, a fin de identificar las unidades geológicas y estructuras que contribuyen a la formación de áreas potenciales que contribuyan a la recarga del acuífero(s) de la CHSJC (Fig. 3). Datos de la imagen Landsat ETM (2003) (P34R44) fueron seleccionados para este estudio, obteniéndose una subescena de 1541 líneas por 1538 columnas para la CHSJC, que cubre una extensión aproximada de 2133km². Las técnicas de procesamiento de imágenes incluyeron balance de contraste y análisis de componentes principales (ACP) para realzar la variabilidad espectral de las geoformas y estructuras. Asimismo, filtrado espacial de alto paso (high pass) direccional en el primer componente principal (CP-1) se realizó para exaltar y delinear las estructuras geológicas (alineamientos) y rasgos geomorfológicos sobresalientes. El filtrado fue efectuado dentro del ambiente del software ERMapper v.6.3TM (2004), donde los alineamientos

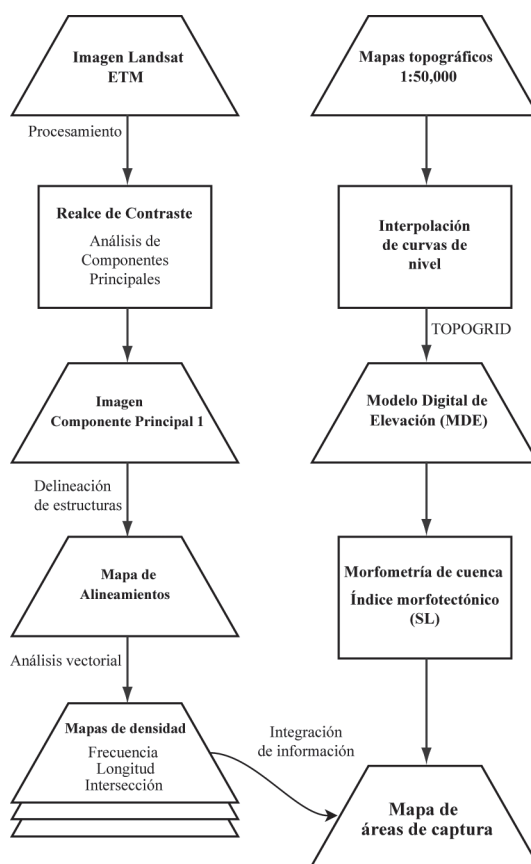


Fig. 3: Procedimientos realizados en la elaboración del trabajo.

en formato “raster”, fueron vectorizados condicionando el algoritmo de vectorización a segmentos con una extensión mayor de 5 píxeles (~150 m), con el propósito de obtener una representación significativa del alineamiento. Un alineamiento es definido aquí como un rasgo lineal simple o complejo en la superficie del terreno, detectado en una imagen o fotografía, que puede estar organizado formando una línea recta o curva; estas estructuras son conocidas como trazas de fractura (Lattman & Parizek, 1964; Setzer, 1966), las cuales, dependiendo de su extensión son divididas en: trazas de fractura (300 a 1500 m) y alineamientos (>1500 m) (Lattman & Parizek, 1964). Los rasgos morfo-geométricos más sobresalientes fueron clasificados después de la interpretación en: fracturas, diaclasas y diques. Interpretación fotogeológica a detalle de fotografías aéreas verticales escala 1:50 000 fue llevada

a cabo a fin de identificar las principales unidades geológicas afectadas por estas estructuras.

Datos vectoriales digitales (curvas de nivel) de cuatro cartas topográficas de INEGI (F12B34, F12B35, F12B44, F12B45) se emplearon para elaborar un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución espacial de 30 m, empleando el software ArcGIS v. 9.1. El método de interpolación utilizado en la generación del MDE se basó en el modelo de TOPOGRID, el cual incorpora la red fluvial, límite de interpolación y puntos de elevación (Hutchinson, 1989).

Las estructuras obtenidas por el procesamiento de imágenes e identificación visual fueron analizadas empleando la extensión "Lineament Analysis" para el programa ArcView™, desarrollada por Kim et al. (2004). Tres mapas fueron obtenidos del análisis, i.e., densidad de número de alineamientos (DENNUM), densidad de longitud de alineamientos (DENLON) y densidad de cruzamiento de alineamientos (DENCRO), los cuales fueron validados en el campo.

Parámetros morfométricos de las siete subcuencas (Boca de la Sierra, Portezuelo, El Mezquite, La Palma, Plamilla, San Lázaro y El Saltito) (Fig. 3) fueron calculados empleando el MDE dentro del programa ArcView™, auxiliándose de las extensiones "Basin1" (Petras, 2003) y "Surface Tools" (Jeness, 2008). Los parámetros morfométricos calculados para la identificación de potenciales zonas de contribución para la recarga fueron: área, perímetro, relación de circularidad, relación de bifurcación, factor de forma, pendiente promedio, frecuencia de cauces, densidad fluvial, textura y longitud máxima (Cuadro 1) (Horton, 1945; Strahler, 1964; Sreedevi et al., 2005; Carvajal & Sanz de Galdeano, 2008).

Asimismo, la integral hipsométrica y sus momentos estadísticos fueron calculados para cada una de las subcuencas (Pérez-Peña et al., 2009). El índice morfotectónico de longitud-gradiente del cauce (SL) (Keller & Pinter, 1999; Troiani & Seta, 2008) fue calculado para cada subcuenca con el propósito de identificar la relación tectónico-estructural de los alineamientos con el desarrollo de áreas para la captura hídrica hacia los acuíferos de la CHSJC.

RESULTADOS

Morfoestructuras y rasgos lineales

Las morfoestructuras más sobresalientes en la CHSJC son la falla San José del Cabo y una serie de bloques "semi-alargados" orientados en dirección NW-SE, definidos por extensas alineamientos (fracturas) con la misma dirección. La falla de San José del Cabo es la mayor morfoestructura en la región, con una dirección preferencial NNW-SSE; presenta varias deflexiones que dividen a la falla en varios segmentos. Los segmentos indicaron cambios de dirección sistemática, rasgos topográficos y presencia de escarpes cuaternarios (Fletcher et al., 2003). Los bloques estructurales delineados definen el desarrollo de las subcuencas hidrológicas Boca de la Sierra (CBLs), Portezuelo (CPRT), El Mezquite (CMZQ), La Palma (CPLM), Palmilla (CPMI), San Lorenzo (CSLZ) y Saltito (CSAL) (Fig. 4), cuyos cauces ("talweg") principales corresponden generalmente a diaclasas o fallas. Las morfoestructuras fueron fácilmente identificadas y delineadas en la imagen obtenida del análisis de componentes principales (CP-1) (Fig. 4). Fallas con desplazamiento lateral izquierdo existen en las cuencas Portezuelo y La Palma, con espaciamientos de 1,5 a 3 km, respectivamente (Fig. 4). El arroyo Portezuelo (en la CPRT) tiene una orientación NWW-SEE (94°–103°); asimismo, a lo largo del arroyo La Palma (en la CPLM) otra estructura presenta una orientación aproximadamente este-oeste franco (79°–101°). Sin embargo, fallas con desplazamiento normal se presentan en la cuenca de San Lázaro. Una serie de alineamientos de menor extensión fueron delineados en las subcuencas, los cuales afectan principalmente el basamento ígneo-metamórfico; dichas estructuras definieron las direcciones preferenciales de los alineamientos evidentes en las subcuencas.

Orientación y densidad de alineamientos

Cuatrocientos cincuenta y seis alineamientos identificados por interpretación visual en la imagen del CP-1 se analizaron, de los cuales el

Cuadro 1

Parámetros morfométricos de las cuencas y su expresión matemática*

Parámetro / Índice	Fórmula	Descripción
Longitud de cuenca	L_b	Longitud máxima de la cuenca
Número de cauces	N_u	Número total de ordenes en cada subcuenca
Longitud total de cauces	$\sum L_s$	Longitud total de los cauces calculada para cada subcuenca
Relación de bifurcación	$R_b = N_u / N_{u+1}$	Relación entre el número de cauces de un orden dado al número de cauces del siguiente orden
Relación de circularidad	$R_c = A_b / A_c$	Relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo con el perímetro de la cuenca
Factor de forma	$R_f = A_b / L_b$	Relación del área de la cuenca y su longitud máxima
Densidad fluvial	$D_d = L_s / A_b$	La longitud de los cauces por unidad de área para cada subcuenca
Textura	$T = \sum N_u / P_b$	Relación del número total de cauces por unidad de área
Pendiente promedio	$S_p = \Delta h \Sigma I / A_b$	Relación de la longitud de isolíneas en la subcuenca por unidad de área y su diferencia de elevación
Frecuencia de cauces	$F_c = \sum N_u / A_b$	Relación entre el número de cauces en cada subcuenca y su área
Gradiente del perfil longitudinal del cauce	$SL = (\Delta h / \Delta l) * l$	Relación de cambio entre la longitud del segmento y su diferencia de elevación con la longitud acumulada del cauce, del parte-aguas a la boca

*Wentworth (1930), Horton (1945), Smith (1950), Strahler (1964), Gregory y Walling (1973), Verstappen (1983), Patton (1988), Hack (1973)

15% de estos se intersectan. El histograma de frecuencias para las subcuencas exhibe que las direcciones preferenciales de las estructuras son NE y NW, siendo la orientación NE la más dominante; pero la dirección NW es la de mayor frecuencia (Fig. 5). De acuerdo a la tendencia encontrada en las estructuras con dirección NE, éstas pueden estar relacionadas al mecanismo extensional de la falla de San José del Cabo; por otro lado, las estructuras con un rumbo NW-SE responden a esfuerzos de cizalla que cortan casi en su totalidad al Bloque de Los Cabos de este a oeste.

Tres niveles de densidad de fracturamiento caracterizan a las cuencas de acuerdo a su distribución (DENNUM), i.e., alta, media y baja (>6,5, 3,5-6,5, y 0-3,5 num./km², respectivamente). La densidad de fracturamiento en las subcuencas es irregular y no exhiben un patrón

definido, ya que algunas cuencas como CBLS y CSAL presentan mayor número de estructuras por unidad de área comparado con las otras subcuencas (CPLM, CPRT, CMZQ, CPMI, y CSLZ) (Fig. 6a). La zona de mayor densidad de fracturamiento correspondió a las CBLS, CPLM y CSAL; asimismo, estas cuencas presentan las áreas con mayor longitud por unidad de área (Fig. 6b).

Dos parámetros muy importantes se conjuntan en las subcuencas: alto índice de intersección y frecuencia de fracturas. Estas características son importantes, ya que la diferencia entre el número de fracturas presentes por unidad de área y su intersección define el grado de fracturación en la roca y el desarrollo de la cuenca, implicando así la existencia de una mayor inter-conectividad entre las fracturas



Fig. 4: Imagen del Componente Principal 1 mostrando los principales alineamientos obtenidos del filtrado direccional e interpretación visual.

desarrolladas en la roca. La inter-conectividad en las fracturas juega un papel muy importante en el proceso de flujo de agua a través de estas, ya que facilita y contribuye al flujo subterráneo hacia el acuífero. Esta propiedad existe en CBLS, CPLM, y CSAL, indicando la posibilidad de áreas de recarga o descarga, dependiendo del gradiente hidráulico existente en la desembocadura de los arroyos principales.

Morfometría de cuencas

La CHSJC fue dividida en siete subcuencas (CBLS, CPRT, CMZQ, CPLM, CPMI, CSLZ, y CSAL) que comprenden el 37% del área total de la cuenca. Trece parámetros morfométricos fueron calculados en las subcuencas seleccionadas (Cuadro 2), así como las integrales hipsométricas y los momentos estadísticos (Sesgo, Densidad

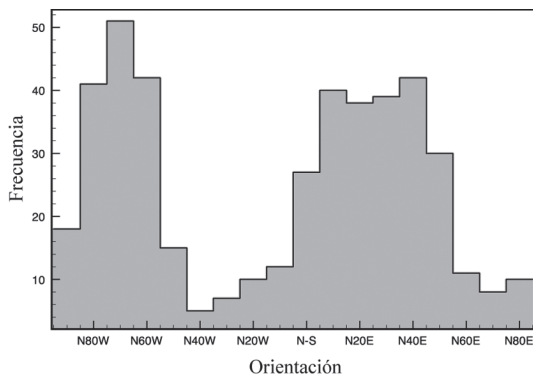


Fig. 5: Histograma de direcciones predominantes en los alineamientos.

de Sesgo, Kurtosis, y Densidad de Kurtosis). El índice morfotectónico longitud-gradiente (SL) fue obtenido para cada cauce principal de las subcuencas, empleando el método propuesto por Hack (1973).

Los patrones fluviales que prevalecen en las subcuencas son dendrítico y subparalelo-dendrítico, los cuales están controlados por alineamientos estructurales (diaclasas, diques, fallas) y la composición litológica del basamento. El patrón dendrítico predomina en las rocas de composición

granítica, pero el subparalelo-dendrítico prevalece en las rocas metamórficas del complejo. Las CBLS, CPRT, CPLM y CSLZ tienen un orden de corrientes de magnitud 5 excepto la CMZQ con 4 (Cuadro 2). La longitud de los cauces (Lc) en las cuencas varía de 69 a 365 km, la cual es proporcional al tamaño de la cuenca, pero relacionada al tipo de litología existente.

Los valores de la relación de bifurcación (Rb) fluctúan entre 3,0 y 5,0 en las cuencas cuando la influencia de estructuras geológicas en el patrón fluvial es visible (Verstappen, 1983). En las subcuencas analizadas este valor fluctúa de 3,25 a 3,94 (Cuadro 2), indicando que las estructuras geológicas tienen influencia en el patrón fluvial. El valor Rb entre el primer y segundo orden de corrientes puede ser considerablemente mayor que el Rb para corrientes de mayor orden en áreas de cárcavas activas y barrancos. Este es un indicativo de un estado de erosión acelerado (Verstappen, 1983). En este respecto, las cuencas CBLS, CPRT, CPLM y CSLZ tuvieron este valor más alto.

La densidad fluvial (Dd) muestra el grado de disección del terreno, escurrimiento potencial, capacidad de infiltración, condiciones climáticas y

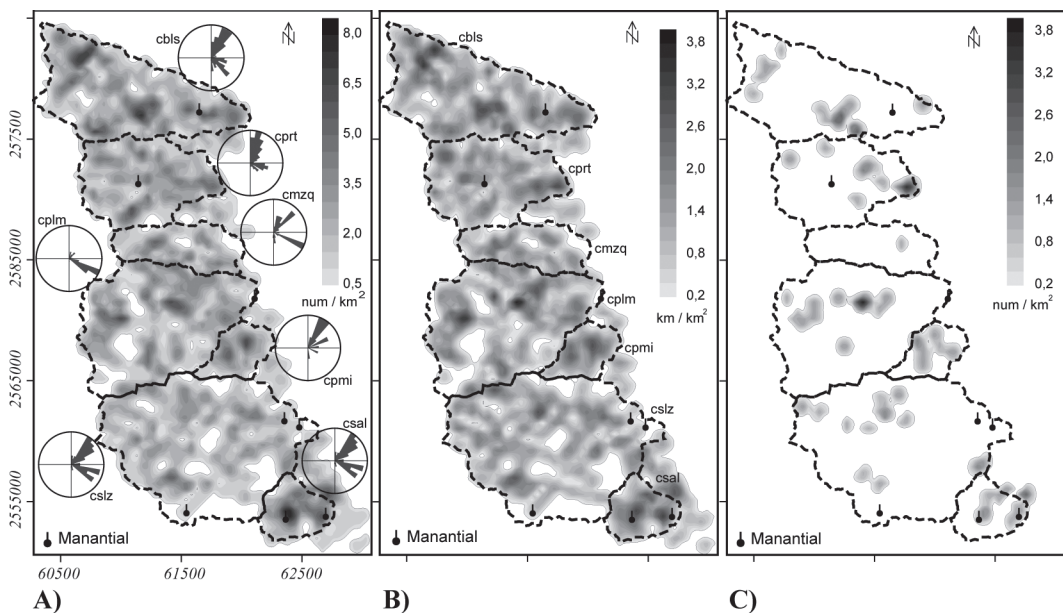


Fig. 6: Mapas de densidades y diagrama de rosetas de cada una de las subcuencas. A) Densidad de alineamientos (DENNUM), B) Densidad de longitud de alineamientos (DENLON), y C) Densidad de cruzamiento de alineamientos (DENCURU).

Cuadro 2

Parámetros morfométricos de subcuencas

Subcuenca	Pb	Ab	Hm	Rb	Rc	Rf	Dd	Sp	Fs	T	Lb	Nu	Lc
Boca de la Sierra	65,3	97,7	1521	3,53	0,29	0,27	1,71	4,28	1,86	2,79	19,00	182	167,10
Portezuelo	46,5	66,9	1505	3,25	0,39	0,44	1,81	5,18	1,99	2,86	12,40	133	121,40
Mezquite	36,8	34,8	1600	3,92	0,32	0,28	1,77	7,32	1,92	1,82	11,11	67	61,50
La Palma	61,7	113,0	1480	3,79	0,37	0,45	1,75	3,12	2,03	3,71	15,80	229	198,00
San Lazaro	73,9	154,3	1440	3,94	0,36	0,46	1,81	4,44	1,89	3,95	18,30	292	279,60

Pb: Perímetro de la cuenca (km), Ab: Área de la cuenca (km²), Hm: Relieve máximo (m), Rb: Relación de bifurcación, Rc: Relación de circularidad, Rf: Factor de forma, Dd: Densidad fluvial (km/km²), Sp: Pendiente promedio (grados), Fs: Frecuencia de cauces, T: Textura, Lb: Longitud de la cuenca (km), Nu: Número total de cauces, Lc: Longitud total de cauces (km)

cubierta vegetal de la cuenca (Verstappen, 1983; Patton, 1988). La Dd obtenida para las subcuencas varía de 1,75 a 1,81, siendo muy uniforme en tres cuencas (Cuadro 2). A pesar del tamaño de la CPLM, la Dd fue bajo. Esto indica que las propiedades físicas de la subcuenca proporcionan condiciones apropiadas para la infiltración, decreciendo el escurrimiento potencial.

El número total de cauces de todos los ordenes por unidad de área se conoce como frecuencia de corrientes o cauces (Fs) (Horton, 1932). El análisis de frecuencia de cauces (Fs) muestra que los valores varían de 1,86 a 2,03 (Cuadro 2). Los datos presentan una correlación positiva con la Dd, sugiriendo que a mayor número de cauces mayor será la densidad fluvial.

El análisis de relación de textura (T) en las subcuencas indica que el valor más alto lo obtuvo la CSLZ seguido de la CPLM. Este parámetro es de gran importancia en geomorfología, ya que indica el grado de espaciamiento entre los cauces desarrollados en la cuenca (Horton, 1945). Asimismo muestra la relación de factores como litología, estructuras, cobertura vegetal, capacidad de infiltración y grado de desarrollo en la cuenca (Smith, 1950). Los valores de la relación de textura varían de 1,82 a 3,95. De acuerdo a Smith (1950), hay cinco diferentes grados de relación de textura, basados en la densidad fluvial. La relación de textura menor a 2 indica muy grueso, entre 2 y 4 grueso, entre 4 y 6 moderado, entre 6 y 8 fino, y mayor de 8 muy fino. Cuatro subcuencas (CBLs, CPRT, CPLM, CSLZ) presentan una textura gruesa y una muy gruesa (CMZQ). Inferimos

que estos valores dependen de la geología subyacente (rocas cristalinas), capacidad de infiltración del basamento y los aspectos de relieve en las subcuencas.

El valor de factor de forma (Rf) siempre será mayor de 0,78 para una cuenca circular. Entre más pequeño sea el valor más alargada será la cuenca. Los valores de Rf obtenidos fluctúan de 0,27 a 0,46 (Cuadro 2). Los valores Rf para tres subcuencas (CPRT, CPLM y CSLZ) indican que tienen una forma semi-circular alargada y las subcuencas CBLs y CMZQ son alargadas.

La relación de circularidad (Rc) representa la correspondencia con la longitud y frecuencia de cauces, estructuras geológicas, clima, relieve y pendiente de la cuenca. Esta es la relación del área de la cuenca con el área de un círculo con la misma circunferencia que el perímetro de la cuenca. En el área de estudio los valores de Rc fluctúan entre 0,29 a 0,37 (Cuadro 2), indicando que las subcuencas son alargadas.

La curva hipsométrica indica el grado de disección (estado erosivo), tectónica, clima y factores litológicos existentes en una cuenca hidrológica (Pérez-Peña et al., 2009). Asimismo, momentos hipsométricos estadísticos como sesgo, kurtosis, densidad de sesgo y densidad de kurtosis son empleados para describir y caracterizar la forma de la curva hipsométrica y de ahí cuantificar cambios en la morfología de las cuencas fluviales (Harlin, 1978; Pérez-Peña et al., 2009). Las curvas hipsométricas obtenidas en las subcuencas son presentadas en la figura 7. A primera vista, hay claras diferencias entre las curvas en las cuencas, sobretudo

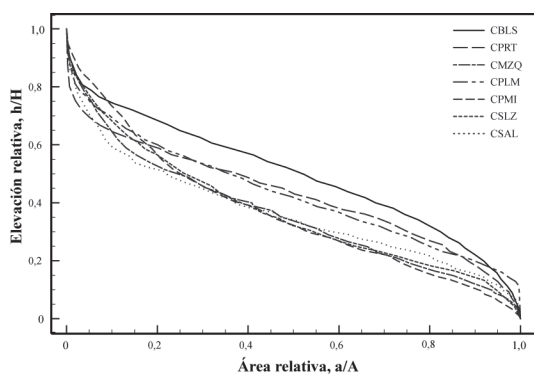


Fig. 7: Curvas hipsométricas de las subcuencas. Las curvas de las subcuencas localizadas en la parte norte son más convexas que las localizadas hacia el sur.

en las CBLs, CPRT y CPLM que presentan una forma convexa con valores altos de la integral hipsométrica (Fig. 7). Los principales momentos estadísticos fueron extraídos y graficados para las subcuencas (Fig. 8). Los valores de kurtosis hipsométrica y densidad de kurtosis se incrementan ligeramente hacia el sur, sin embargo los valores para el sesgo hipsométrico y densidad de sesgo difieren en la misma dirección (Fig. 8). Es notable el incremento de la densidad de sesgo para la CSLZ, lo que es atribuido a cambios de pendiente dentro de la cuenca.

El empleo del índice de longitud-gradiente del cauce (SL) en las cuencas contrastó la presencia de alineamientos asociados a la dirección de la falla de San José del Cabo (actividad tectónica) con potenciales áreas de recarga o descarga al acuífero. Los valores más altos del índice ocurrieron en el entorno del frente montañoso de la Sierra La Laguna, aproximadamente en la cota 320 m.s.n.m. (Fig. 9). Los valores del índice SL fluctúan entre 268 y 419.

Los valores elevados de SL en los cauces dependieron de las diferentes litologías que cortan los cauces o por el grado de desarrollo (erosión) de las cuencas. Por ejemplo, los valores altos en los perfiles prevalecieron en las cotas 620, 820 y 920 en casi todas las cuencas y en las áreas de mayor densidad y cruzamiento de alineamientos. Los manantiales encontrados en el campo en las CPRT y CSLZ estuvieron asociados a valores altos del índice SL i.e., 396 y 464, respectivamente (Fig. 9).

El análisis morfométrico indica que existe escasa correlación entre los valores de Textura (T) y Densidad fluvial (Dd) en las subcuencas analizadas. La tendencia muestra que a mayor densidad fluvial el índice de textura aumenta en las subcuencas de 1,82 a 3,95 (Fig. 10), aunque se obtuvieron valores altos de T pero bajos en Dd, como son el caso de CPLM y viceversa para CPRT. Por otro lado, la correspondencia entre la Dd y la Densidad de fracturamiento promedio en las subcuencas no es directa, ya que existe mayor fracturamiento en cuencas con valor bajo de Dd (CBLs) y mayor Dd pero con baja densidad de fracturamiento (CPRT).

Los parámetros morfométricos en cada subcuenca fueron comparados a través de una tabulación cruzada, con el propósito de determinar las áreas potenciales donde pudiera ocurrir la recarga hacia el (los) acuífero(s) de la CHSJC. Las cuencas fueron ordenadas numéricamente donde el valor de 1 es la menos probable y 7 para la más probable de ser susceptible para la captura de agua dentro del sistema de fracturamiento, con base a las características hidrogeomórficas de los parámetros (Cuadro 3).

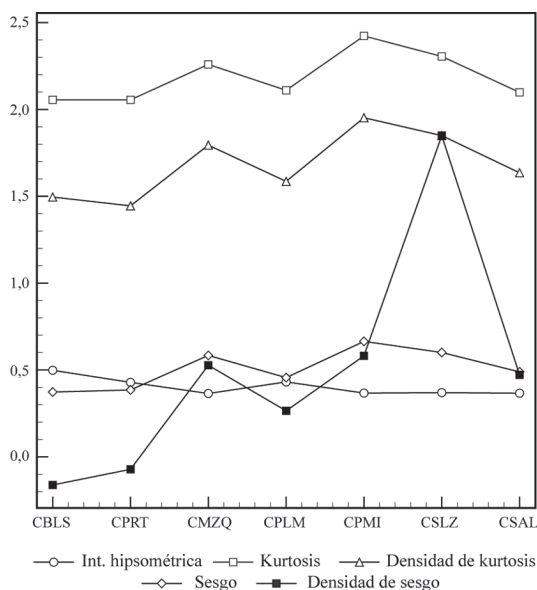


Fig. 8: Valores de los principales momentos estadísticos de las curvas hipsométricas.

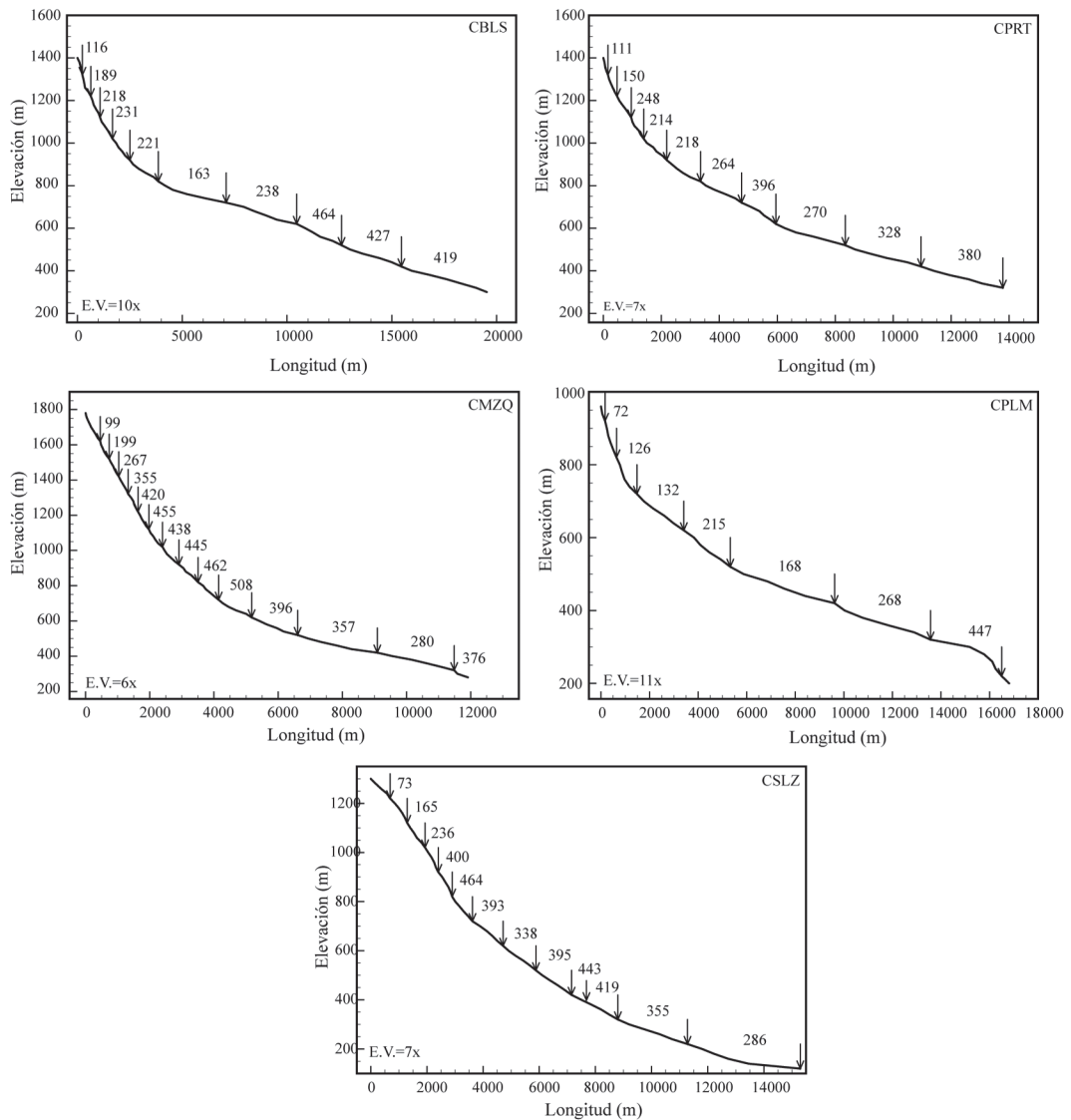


Fig. 9: Perfiles del Índice Longitud-gradiente (SL) en cinco subcuencas. Los valores de los índices muestran asimismo los cambios de gradiente en los cauces.

Las rocas del basamento cristalino expuestas en la región occidental de la CHSJC representan una zona de interés por su capacidad de poder capturar agua a través de un sistema de fracturas interconectadas. La asociación de frecuencia, longitud y cruzamiento de los alineamientos (fracturas y fallas) en las CBLs, CPLM, CSLZ y CSAL indican que estas áreas presentan las condiciones

para la transferencia de agua a través del medio fracturado. La existencia de manantiales superficiales en el área sugieren que el fracturamiento somero ha facilitado la acumulación y flujo de agua durante todo el año, en las CSLZ, CSAL, CMZQ y CPRT. La direcciones preferenciales NE y SE de los alineamientos señalan además que el flujo subterráneo sigue una dirección E-SE

Cuadro 3

Jerarquía de subcuencas con potencialidad para la captura

Subcuenca	Parámetro morfométrico											
	Rb	Dd	Fs	Rc	Rf	T	DFp	IH	K	S	DK	DS
Boca de la Sierra	2	1	1	1	1	2	5	1	1	1	2	2
Portezuelo	1	4	4	5	3	3	4	2	2	2	1	1
Mezquite	4	3	3	2	2	1	1	4	4	4	4	4
La Palma	3	2	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3
San Lazaro	5	5	2	3	5	5	2	5	5	5	5	5

hacia los depósitos aluviales de la CHSJC (Fig. 2). Aunque el análisis de intersección de alineamientos reveló que los manantiales encontrados no se localizan en las áreas de mayor densidad de cruzamiento (excepto en la CSAL), es posible que la inter-conectividad suceda a profundidad.

Los valores obtenidos de densidad de fracturamiento y longitud de fracturas en las subcuencas inferen a priori que no hay relación directa con los índices morfométricos y tectónico calculados, ya que las subcuencas presentaron valores de baja actividad tectónica, comparados con áreas tectónicamente muy activas (Keller & Pinter, 1999); pero con un alto índice de densidad de fracturamiento e intemperismo (interpretados a partir de la imagen de satélite y observaciones de campo). Sin embargo, el grado de evolución (erosión) es notable en las cuencas indicado por las curvas hipsométricas, densidad fluvial, y textura, pero no así su densidad de fracturamiento (Fig. 10). Esta diferencia radica en el grado de alteración de las rocas expuestas. Por ejemplo, la CSLZ tiene mayor densidad fluvial y grado de desarrollo (textura) que la CBLS; asimismo, el basamento granítico de la CSLZ está más alterado comparado con el basamento metamórfico de las CBLS, CPRT y CMZQ.

Las zonas de mayor densidad de fracturamiento (alineamientos) se localizaron en la mayoría de las subcuencas en la región más serrana. Por ende, la recarga y ubicación de manantiales están definidos posiblemente por la combinación e interrelación de factores como son: densidad de fracturamiento, grado de alteración del basamento, vegetación, espesor del suelo.

La tabulación cruzada indica que CSLZ y CPLM son las áreas con mayor potencial para la recarga hacia los acuíferos de la CHSJC (Cuadro 3). A pesar de que estas subcuencas no tienen el mayor grado de fracturamiento, la infiltración se puede estar dando a través de la litología intemperizada, inferido a partir de su textura.

CONCLUSIONES

El análisis morfométrico y la cartografía geológica de la cuenca hidrológica de San José del Cabo contribuyó en la identificación de potenciales áreas de recarga del acuífero. Herramientas como la percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica facilitaron el trabajo para el análisis y la identificación de sitios o áreas. Sin embargo, por la complejidad del área de estudio

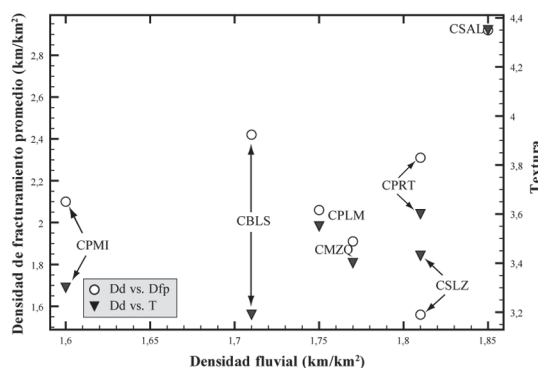


Fig. 10: Gráfico de correlación de parámetros morfométricos: Densidad fluvial (Dd), Textura y Densidad de fracturamiento promedio (Dfp) en cinco subcuencas.

como es la litología y su estructura, no ha facilitado la cuantificación y evaluación de la recarga a través del medio fracturado.

Las subcuencas de San Lázaro y La Palma presentaron una interesante configuración estructural, hidrológica y geomorfológica; el buen grado de alteración desarrollada (textura), zonas de fracturamiento moderado y mayor densidad fluvial son considerados buenos factores para considerar a estas subcuencas como áreas de recarga a los acuíferos de la CHSJC. Los manantiales encontrados se confinan en zonas con valores moderados de fracturamiento, siendo un determinante para la posible ubicación de zonas potenciales para la recarga de los acuíferos.

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que el margen occidental de la CHSJC existe una continua recarga del acuífero (zona primaria); a través del sistema de fracturamiento del complejo cristalino. Sin embargo, una caracterización y evaluación de la transmisibilidad y conductividad hidráulica son necesarias para determinar con mayor precisión la potencialidad de las subcuencas con potencial de recarga.

RECOMENDACIONES

La ubicación correcta de las áreas de captura en la zona serrana es aun incierta, debido a la ausencia de datos e información como es la tasa de infiltración en las zonas de fracturamiento y profundidad del fracturamiento en el basamento. Por tal motivo se recomienda realizar levantamientos geofísicos a fin de determinar estos parámetros que contribuirían en la determinación de la capacidad de recarga del acuífero de la cuenca hidrológica de San José del Cabo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Fondos Sectoriales CONACYT-CONAFOR (C01-5671), a través de la Dra. Aurora Breceda Solís. Agradecemos a todos aquellos que alguna forma contribuyeron en el trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACWORTH, R.I., 1987: The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment.- *Quat. J. Eng. Geol.* 20: 265-272.
- BESTOW, T.T., 1987: The extent, characteristics and recharge conditions of groundwater in crystalline basement rocks in Australia.- *Proc. workshop on groundwater exploration and development in crystalline basement aquifers, Harare, Zimbabwe*, 71-102.
- BLACK, J.H., 1987: Flow and flow mechanisms in crystalline rocks.- En: GOFF, J.C. & WILLIAMS, B.P.J. (eds): *Fluid flow in sedimentary basins and aquifers*.- *Geol. Soc.* 34: 185-200.
- CARVAJAL, R. & SANZ DE GALDEANO, C., 2008: Aplicación de índices geomorfológicos al estudio de la cuenca del río Adra (Almería).- *Cuaternario y Geomorfología*, 22: 17-31.
- CERVANTES, Y., CORNEJO-OLGÍN, S.L., LUCERO-MÁRQUEZ, R., ESPINOZA-RODRÍGUEZ, J.M., MIRANDA-VIQUEZ, E. & PINEDA-VELÁZQUEZ, A., 1990: *Provincias fisiográficas de México*.- Escala 1:4 000 000, Univ. Autónoma de México, México.
- CHORLEY, R.J., SCHUMM, S.A. & SUGDEN, D.E., 1984: *Geomorphology*.- 607 págs. Ed. Methuen, Londres.
- COOK, P. G., 2003: A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers.- 115 págs. Ed. CSIRO, Adelaide, Australia.
- DIOSO, H. M., 2002: Relative permeability of fractured rock.- 58 págs. Stanford Univ., Palo Alto, CA [Tesis M.Sc.].
- EARTH RESOURCE MAPPING, 2004: *ERMMapper Software: Ver. 6.4, v.6.4*, Earth Resource Mapping.- Image Processing.

- ENGMAN, E.T. & GURNEY, R.J., 1991: Recent advances and future implications of remote sensing for hydrology modeling.- En: BOWLES, D.S. & O'CONNELL, P.E. (eds.): Recent advances in the modeling of hydrologic systems.- Kluwer Academic Publishers, 21: 471-495.
- FIERSTINE, H.L., APPLGATE, S.P., GONZÁLEZ-BARBA, G., SCHWENNICKE, T. & ESPINOSA-ARRUBARRENA, L., 2001: A fossil blue marlin (*Makaira nigricans* Lacépède) from the Middle Facies of the Trinidad Formation (Upper Miocene to Upper Pliocene), San José del Cabo Basin, Baja California Sur, México.- Bull. Southern California Acad. Sci. 100: 59-73.
- FLETCHER, J.M., PÉREZ-VENZOR, J.A., GONZÁLEZ-BARBA, G. & ARANDA-GÓMEZ, J.J., 2003: Ridge-trench intersections and the ongoing capture of the California microplate: New insight from the southern gulf extensional province.- Guide for Field Trips of the 99th Annual Meeting of the Cordilleran of the Geol. Soc. of Amer. (Sp. pub.), 13-31.
- GREGORY, K.J. & WALLING, D.E., 1973: Drainage basin form and process: a geomorphological approach.- 456 págs. Ed. Wiley, New York.
- HACK, J.T., 1973: Stream-profile analysis and stream gradient index.- J. Res. U.S.G.S. 1: 421-429.
- HAILE, E., 2005: Groundwater chemistry and recharge rate in crystalline rocks: Case study from the Eritrean Highland.- 55 págs. Kungl Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm [Tesis Lic.].
- HAMMOND, E. H., 1954: A geomorphic study of the cape region of Baja California.- Univ. of California, Publications in Geography, 10: 45-111.
- HARLIN, J.M., 1978: Statistical moments of the hypsometric curve and its density function.- Math. Geol., 10: 59-72.
- HORTON, R.E., 1932: Drainage basin characteristics.- EOS, Transactions of the Amer. Geoph. Union, 13: 350-361.
- HORTON, R.E., 1945: Erosional development of streams and their drainage basins; hydro-physical approach to quantitative morphology.- Bull. Geol. Soc. Am., 56: 275-370.
- HUTCHINSON, M.F., 1989: A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits.- J. Hydrol. 106: 211-232.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI), 1994: Los Cabos: Estado de Baja California Sur.- 115 págs. Ed. Inst. Nac. de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.
- JENNESS, J., 2008: Surface Tools (surf_tools.avx) extension for ArcView 3.x, v.1.6a, Jenness Enterprises.- http://www.jennessent.com/arcview/surface_tools.htm, acceso libre, [Consulta: 10 marzo 2009].
- KELLER, E.A. & PINTER, N., 1999: Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape.- 338 págs. Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- KIM, G-B., LEE, J-Y. & LEE, K-K., 2004: Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue scripts.- Comput. Geosci., 30: 1117-1126.
- LARSSON, I., 1984: Ground water in hard rocks: project 8.6 of the International Hydrological Programme: Studies and Reports in Hydrology.- UNESCO, 228.

- LATTMAN, L. H. & PARIZEK, R. R., 1964: Relationship between fracture traces and occurrence of ground water in carbonate rocks.- *J. Hydrol.*, 2: 73-91.
- LEE, J-Y. & LEE, K-K., 2000: Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system.- *J. Hydrol.*, 229: 190-201.
- LLOYD, J.W., 1986: A review of aridity and groundwater.- *Hydrol. Process.*, 1: 63-78.
- LLOYD, J. W., 1999: Water resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones.- 284 págs. Ed. UNESCO, Francia.
- MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ, G. & SETHI, P.S., 1997: Miocene-Pliocene sediments within the San Jose del Cabo Basin, Baja California Sur, Mexico.- En: JOHNSON, M.E. & LEDESMA-VAZQUEZ, J. (eds.): Pliocene carbonates and related facies flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico.- *Geol. Soc. of Amer. Spec. Paper*: 141-166.
- MAYER, L. & MARTÍNEZ GUTIÉRREZ, G., 1997: Tectonic transition from proto Gulf rifting to modern extension in Baja California Sur, Mexico.- South-Central Section, 31st Annual Meeting and Rocky Mountain Section, 50th Annual Meeting, El Paso, TX: 38-39 [Resumen].
- MCTEAGUE, M.S., UMHOEFER, P.J., SCHWENNICKE, T. & INGLE, J.C., 2005: Sedimentary record of Miocene rifting along the eastern side of the San Jose del Cabo Basin, Baja California Sur, Mexico; critical early evidence of the proto Gulf of California.- [resumen] Geological Society of America, 2005 annual meeting, Salt Lake City, UT, 311-312.
- MEIJERINK, A.M.J., 2007: Remote sensing applications to groundwater.- 311 págs. Ed. UNESCO, Paris, Francia.
- MIN, K-B., 2004: Fractured rock masses as equivalent continua: A numerical study.- 187 págs. Kungl Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm [Tesis Ph.D.].
- MINA UHINK, F., 1957: Bosquejo geológico del Territorio Sur de la Baja California.- *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.* 9: 139-269.
- PANTOJA-ALOR, J. & CARRILLO-BRAVO, J., 1966: Bosquejo de la región de Santiago-San José del Cabo, Baja California.- *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.* 58: 1-14.
- PATTON, P.C., 1988: Drainage basin morphometry and floods.- En: BAKER, V.C., KOCHER, R.C. & PATTON, P.C. (eds.): *Flood Geomorphology*.- Wiley, 51-65.
- PÉREZ-PEÑA, J.V., AZAÑÓN, J.M. & AZOR, A., 2009: CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hysometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain.- *Comput. Geosci.* 35: 1214-1223.
- PETRAS, I., 2003: Basin1, v.1, ESRI.- <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=10668>, acceso libre, [Consulta: 29 abril 2009].
- RAGAN, R.M. & JACKSON, T.J., 1980: Runoff synthesis using Landsat and SCS model.- *J. Hydraul. Div. HY5*: 667-678.
- RANGO, A., 1977: Applications of remote sensing to watershed management.- En: FAO, (ed.): *Guidelines for watershed management*, FAO Conservation Guide.- FAO, 5: 37-52.
- SALAMA, R.B., TAPLEY, I., ISHII, T. & HAWKES, G., 1994: Identification of areas of recharge and discharge using Landsat-TM satellite imagery and aerial photography mapping techniques.- *J. Hydrol.* 162: 119-141.

- SALMON, C.D., WALTER, M.T., HEDIN, L.O. & BROWN, M.G., 2001: Hydrological controls on chemical export from an undisturbed old-growth Chilean forest.- *J. Hydrol.* 253: 69-80.
- SCHAAF, P., BÖHNEL, H. & PEREZ-VENZOR, J.A., 2000: Pre-Miocene paleogeography of the Los Cabos Block, Baja California Sur: Geochronological and paleomagnetic constraint.- *Tectonophysics*, 53-69.
- SCHMELLING, S., 1998: Characterization of hydraulic properties of potentially fractured industrial landfill sites and study of heterogeneity effects on fate and transport in groundwater.- 66 págs. Dynamac Corporation, Ada, OK [Inf. técnico].
- SCHULTZ, G.A., 1988: Remote sensing in hydrology.- *J. Hydrol.* 100: 239-265.
- SCHULTZ, G.A., 1993: Hydrological modeling based on remote sensing information.- *Advance Space Res.* 13: 149-166.
- SETZER, J., 1966: Hydrologic significance of tectonic fractures detectable on air photos.- *Ground Water*, 4: 23-29.
- SHABAN, A., KHAWLIE, M. & ABDALLAH, C., 2006: Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon.- *Hydrogeol. J.* 14: 433-443.
- SHARMA, K.D. & SINGH, S., 1992: Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model.- *Hydrol. Sci.* 37: 39-52.
- SHIH, S.F., 1996: Integration of remote sensing and GIS for hydrologic studies.- En: SINGH, V.P. & FIORENTINO, M., (eds.): *Geographical Information Systems in Hydrology*.- Kluwer Academic Publishers, 15-42.
- SMITH, K.G., 1950: Standards for grading texture of erosional topography.- *Am. J. Sci.*, 248: 655-668.
- SREEDEVI, P.D., SUBRAHMANYAM, K. & AHMED, S., 2005: The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain.- *Environ. Geol.* 47: 412-420.
- STRAHLER, A.N., 1964: Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks.- En: CHOW, V.T., (ed.): *Handbook of applied hydrology*.- McGraw Hill, 4-76.
- TOWNSEND, P.A. & WALSH, S.J., 1998: Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing.- *Geomorphology*, 21: 295-312.
- TROIANI, F. & SETA, M.D., 2008: The use of the Stream Length-Gradient index in morphotectonic analysis of small catchments: A case study from Central Italy.- *Geomorphology*, 102: 159-168.
- VERSTAPPEN, H.T., 1983: *Applied Geomorphology*.- 437 págs. Ed. ITC, Enschede, Netherlands.
- WENTWORTH, C.K., 1930: A simplified method of determining the average slope of land surfaces.- *Am. J. Sci.* 20: 184-194.