

Análisis morfométrico en la cuenca hidrológica San José del Cabo, B.C.S., México: una aproximación en la identificación de potenciales áreas de captura

Genaro Martínez-Gutiérrez*, José Juan Díaz-Gutiérrez y Omar Cosío-González

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

**martingg@uabcs.mx*

RESUMEN

La cuenca hidrológica-forestal de San José del Cabo está localizada al sur de la península de Baja California, noroeste de México. La cuenca es una de las más extensas del estado y es considerada como una de las principales fuentes de recursos hídricos. Un análisis de balance de contraste, análisis de componentes principales (ACP) y filtrado de alto paso en una imagen Landsat ETM+, fotografías aéreas y modelo digital de elevación fueron usados para cartografiar la geomorfología y la geología del área y desarrollar un análisis morfométrico en la margen occidental de la cuenca. Los rasgos estructurales (alineamientos) fueron obtenidos del modelo digital de elevación. Los parámetros morfométricos y el análisis estructural de siete subcuencas se derivaron para determinar áreas potenciales de captura hídrica hacia la cuenca hidrológica de San José del Cabo (CHSJC). Los datos obtenidos fueron integrados a un sistema de información geográfica para la realización de análisis de decisión multi-criterios (ADMC). 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. El ADCM identificó tres subcuencas como las principales áreas de captura hacia la CHSJC. Los resultados indican que la investigación con imagen Landsat y el modelo digital de elevación proporcionan una fuente acertada de datos para la identificación de áreas de recarga y descarga a una escala regional donde existen áreas poco accesibles.

Palabras clave: alineamiento, recarga, morfometría de cuencas, análisis multi-criterios, Landsat, San José del Cabo, México.

ABSTRACT

The San José del Cabo basin is located in the southern tip of the Baja California peninsula in northwestern Mexico. The basin is one of the largest in the state and is considered the major water source for the state. Landsat ETM+ image analysis (contrast balance, principal component analysis and high pass filtering), 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 rainfall capture areas for the San Jose del Cabo watershed. The data were integrated in a geographic information system in order

to perform a multicriteria decision analysis (MCDA). A well-fractured system, developed in the mountain region, exhibits good conditions for primary recharge. The MCDA identified three sub-watersheds to be the principal areas for rainfall capture. The results show that Landsat image and digital elevation model analysis provide a viable source of data and information for mapping and delineating areas for recharge and discharge on a regional scale.

Key words: lineament, recharge, basin morphometry, multicriteria decision analysis, Landsat, San José del Cabo, Mexico.

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 y planicies); sin embargo, es posible encontrar acuíferos en rocas fracturadas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) (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.

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

La recarga de agua subterránea, el flujo y la 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, y pueden ser evaluados dinámicamente por medio del uso de fotografías aéreas e imágenes de satélite (Meijerink, 2007). El empleo de la percepción remota fa-

cilita 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, el presente trabajo tiene como objetivo identificar las áreas potenciales para la captura de agua dentro de la región serrana de la cuenca hidrológica de San José del Cabo, Baja California Sur, a partir de la integración de técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG). 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. El sistema fluvial desarrollado dentro de la cuenca consiste de una serie de tributarios que se unen al arroyo principal de San José (Figura 1).

A escala local, los tipos de geoformas (topoformas) desarrolladas en la CHSJC es diversa. Sin embargo, de acuerdo con 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), con elevaciones máximas de 800 y 1900 m s.n.m., respectivamente (Figura 1).

Mesetas con laderas ligeramente inclinadas y montañas aisladas con laderas muy inclinadas identifican la zona oriental desde la población de San José del Cabo, hasta las inmediaciones de la Sierra La Trinidad, observándose el desarrollo de pedimentación, 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).

La falla de San José del Cabo, que define el límite del valle aluvial con las elevaciones montañosas de la Sierra La Laguna, 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

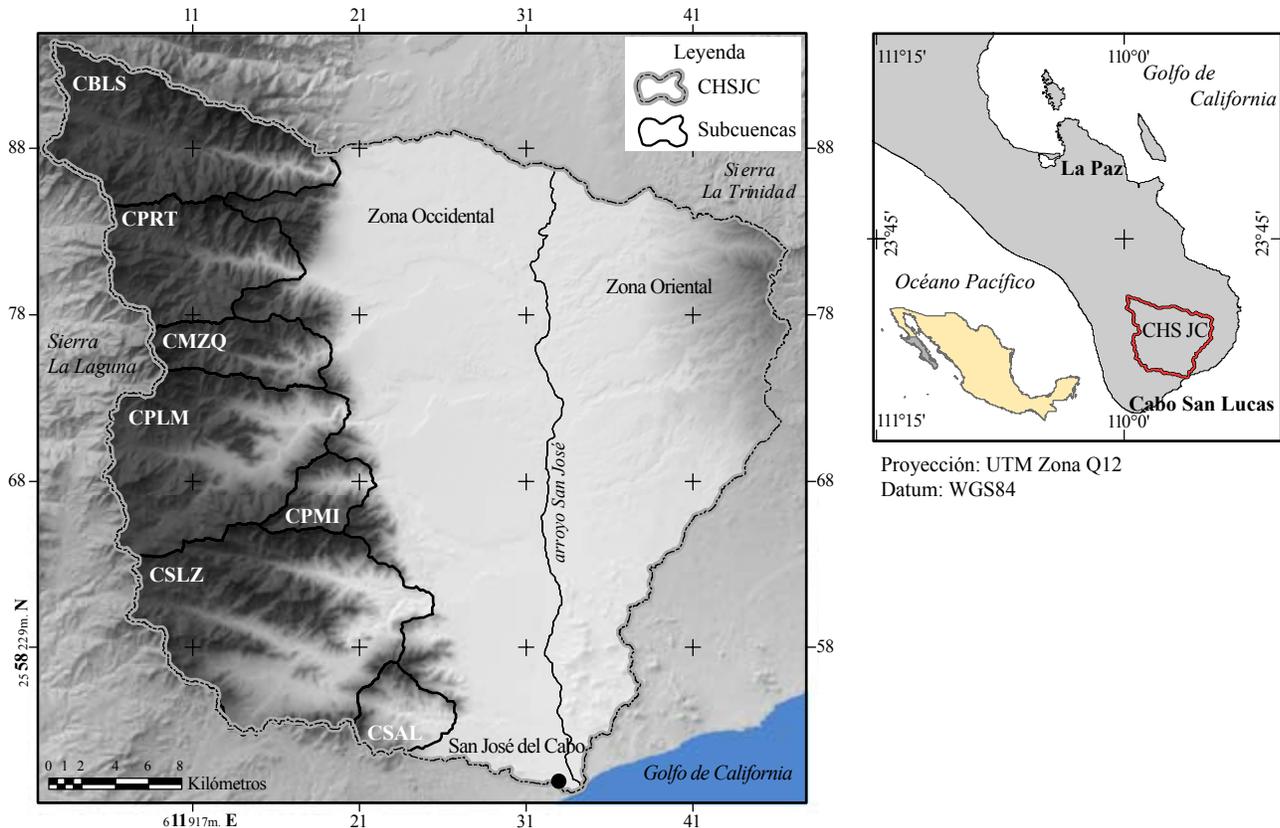


Figura 1. Mapa de localización y división de subcuencas en la cuenca hidrológica de San José del Cabo (CBLs: subcuenca Boca de la Sierra, CPRT: subcuenca Portezuelo, CMZQ: subcuenca El Mezquite, CPLM: subcuenca La Palma, CPMI: subcuenca Palmilla, CSLZ: subcuenca San Lázaro, CSAL: subcuenca El Saltito).

segmentos indican cambios de dirección sistemática, rasgos topográficos y presencia de escarpes cuaternarios (Fletcher *et al.*, 2003) (Figura 2).

El relieve en 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 y Martínez-Gutiérrez, 1997). Los abanicos aluviales formados en el piedemonte no están cortados por la falla de San José, extendiéndose los depósitos hacia dentro de algunos cañones, por ejemplo Portezuelo, La Palma y San Lázaro (Figura 1).

Los patrones fluviales que prevalecen en las cuencas son dendríticos y subparalelo-dendríticos, 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.

Marco geológico

Las unidades litológicas expuestas en la CHSJC forman parte del medio graben conocido como cuenca de San

José del Cabo (Martínez-Gutiérrez y Sethi, 1997; McTeague *et al.*, 2005) (Figura 2). Las rocas aflorantes en la cuenca hidrológica son agrupadas en dos conjuntos litoestratigráficos informales: el complejo metamórfico y ensamble plutónico, y la cubierta sedimentaria.

El complejo metamórfico está expuesto exclusivamente en la región occidental de la cuenca, mientras que el ensamble plutónico aflora en ambas regiones (Figura 2). El complejo está distribuido en una dirección NNE-S, y está formado por gneis cuarzofeldespático 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 región occidental definen el Bloque de Los Cabos, que está caracterizado por un sistema montañoso con orientación norte-sur, segmentado en bloques menores por fracturas regionales con orientación este-oeste (Mina Uhink, 1957; Schaaf *et al.*, 2000).

En la parte central de la CHSJC está expuesta la cubierta sedimentaria que incluye a las Formaciones Trinidad, Los Barriles, Refugio y El Chorro (Martínez-Gutiérrez y Sethi, 1997; Fierstine *et al.*, 2001).

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

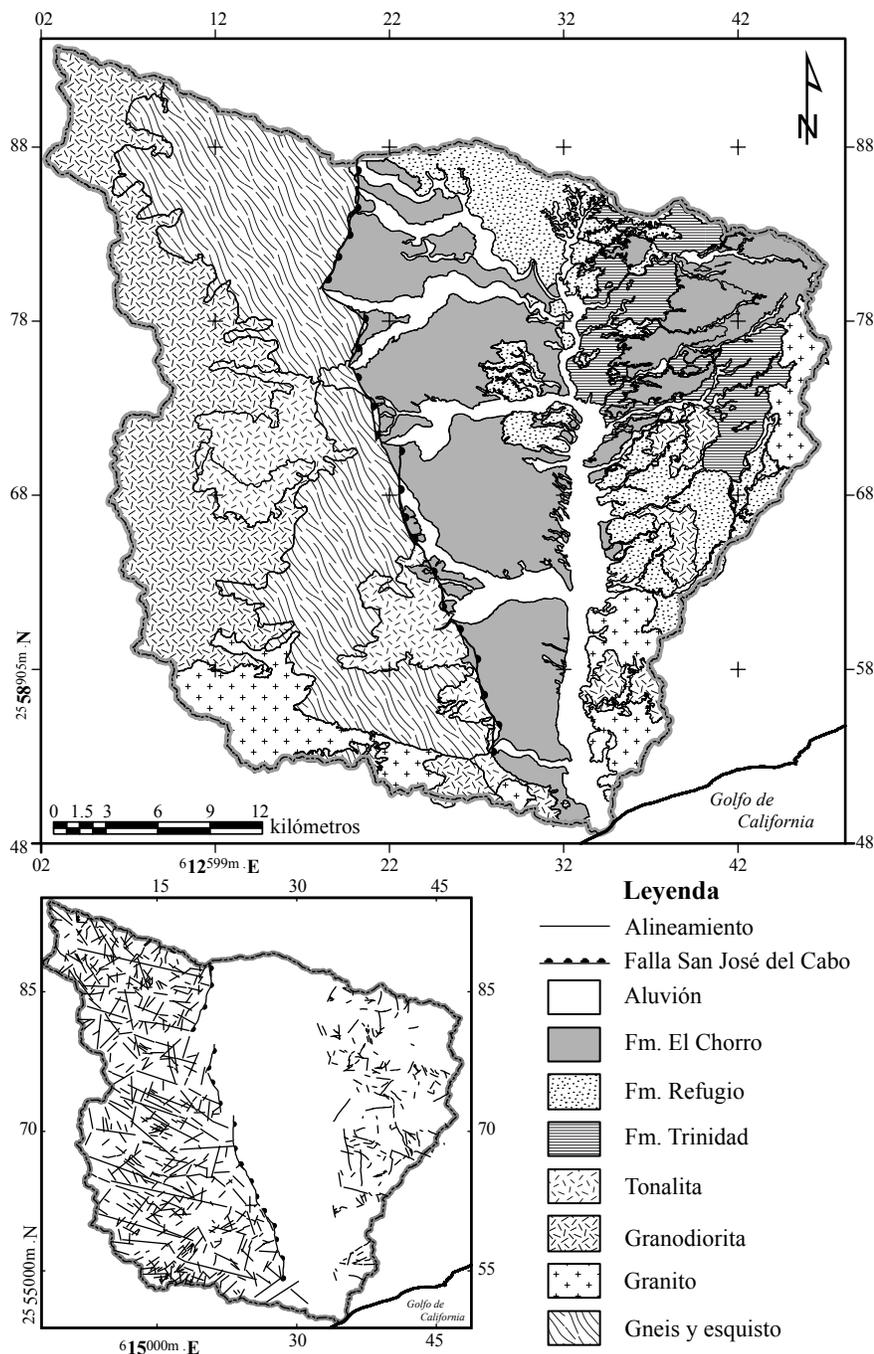


Figura 2. Mapa geológico generalizado y principales estructuras de la cuenca hidrológica de San José del Cabo.

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 y Carrillo-Bravo, 1966; Martínez-Gutiérrez y Sethi, 1997).

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 para la recarga del acuífero(s) de la CHSJC. Para este estudio, una escena de 1541 líneas por 1538 columnas fue extraída de la imagen Landsat ETM (2003, P34R44), con una extensión aproximada de 2,133 km². Las técnicas de procesamiento de imágenes incluyeron balance de contraste y análisis de componentes principales (ACP) para realizar la variabilidad espectral de las geoformas y estructuras. Asimismo, un 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 programa ERMapper v.6.3™ (Earth Resource Mapping, 2004), donde los alineamientos 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 de los alineamientos. 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 y 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 y Parizek, 1964). Los rasgos morfogeométricos más sobresalientes fueron clasificados después de la interpretación en fracturas, diaclasas y diques. Las principales unidades geológicas afectadas por estas estructuras fueron identificadas por la interpretación fotogeológica de las fotografías aéreas con escala 1:50,000.

Un modelo digital de elevación (MDE) se generó con una resolución espacial de 30 m, por la interpolación de los datos vectoriales digitales (curvas de nivel) de las cartas topográficas F12B34, F12B35, F12B44, F12B45 (escala 1:50,000), editadas por INEGI. El comando TOPOGRID del programa ArcGIS 9.1 fue empleado para la interpolación, el cual se basa en el método de interpolación de Hutchinson (1989), que incorpora la red fluvial, límite de interpolación

y puntos de elevación.

Las estructuras obtenidas por el procesamiento de imágenes e identificación visual fueron analizadas, empleando la extensión “Lineament Analysis” en el programa ArcView™, desarrollada por Kim *et al.* (2004), a fin de generar los mapas de 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.

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

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. Esta zona a su vez 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 (Figura 1).

Los parámetros morfométricos (Tabla 1) de las siete subcuencas fueron calculados empleando el MDE dentro del programa ArcView, auxiliándose de las extensiones “Basin1” (Petras, 2003) y “Surface Tools” (Jenness, 2008). Asimismo, las integrales hipsométricas y los momentos estadísticos de las subcuencas se calcularon empleando el método de Pérez-Peña *et al.* (2009). El parámetro morfo-

Tabla 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	$F_f = A_b / L_b$	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	$T = D_d \cdot F_s$	Producto de la densidad fluvial y la frecuencias de cauces en la cuenca.
Relación de relieve	$S_b = \Delta h / L_b$	Relación de la diferencia de elevación y la máxima longitud de la cuenca.
Frecuencia de cauces	$F_s = \sum N_u / A_b$	Relación entre el número de cauces en cada subcuenca y su área.
Gradiente del perfil longitudinal del cauce	$SL = (\Delta h / \Delta l) \cdot l$	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).

tectónico de longitud-gradiente del cauce (SL) (Hack, 1973; Keller y Pinter, 1999; Troiani y Seta, 2008) fue calculado para cada subcuenca con el propósito de identificar la relación tectónico-estructural de los alineamientos con el desarrollo áreas para la captura hídrica hacia los acuíferos de la CHSJC.

A fin de encontrar las áreas con mayor potencialidad para la captura de agua durante una precipitación se implementó un análisis de decisión multi-criterios (ADMC) dentro del ambiente SIG, empleando la metodología propuesta por Boroushaki y Malczewski (2008). La metodología se basa en la transformación y combinación de datos (criterios) y juicios de valor para obtener información apropiada y útil para la toma de decisiones. Diez de los trece parámetros morfométricos calculados se emplearon como criterios de evaluación, en la cual el juicio de ponderación se asignó con base al conocimiento geológico-geomorfológico del área de estudio. Los parámetros empleados incluyeron densidad fluvial, tasa de bifurcación, frecuencia de corrientes, relación de circularidad, relación de textura, integral hipsométrica, kurtosis hipsométrica, sesgo hipsométrico,

densidad de fracturamiento promedio y relación de pendiente.

RESULTADOS

Morfoestructuras y rasgos lineales

Las morfoestructuras fueron identificadas y delineadas en la imagen obtenida del análisis de componentes principales (CP-1) (Figura 3), entre las más sobresalientes destacan la falla San José del Cabo y una serie de bloques estructurales “semi-alargados” orientados NW-SE, definidos por extensos alineamientos con la misma dirección. Los bloques estructurales identificados delimitan el desarrollo de las siete subcuencas hidrológicas (CBLS, CPRT, CMZQ, CPLM, CPMI, CSLZ y CSAL) (Figura 3), cuyos cauces (“talweg”) principales correspondieron a diaclasas o fallas. Fallas con desplazamiento lateral izquierdo fueron identificadas en CPRT y CPLM, con espaciamentos de 1.5 a 3 km, respectivamente (Figura 3). El arroyo Portezuelo (en

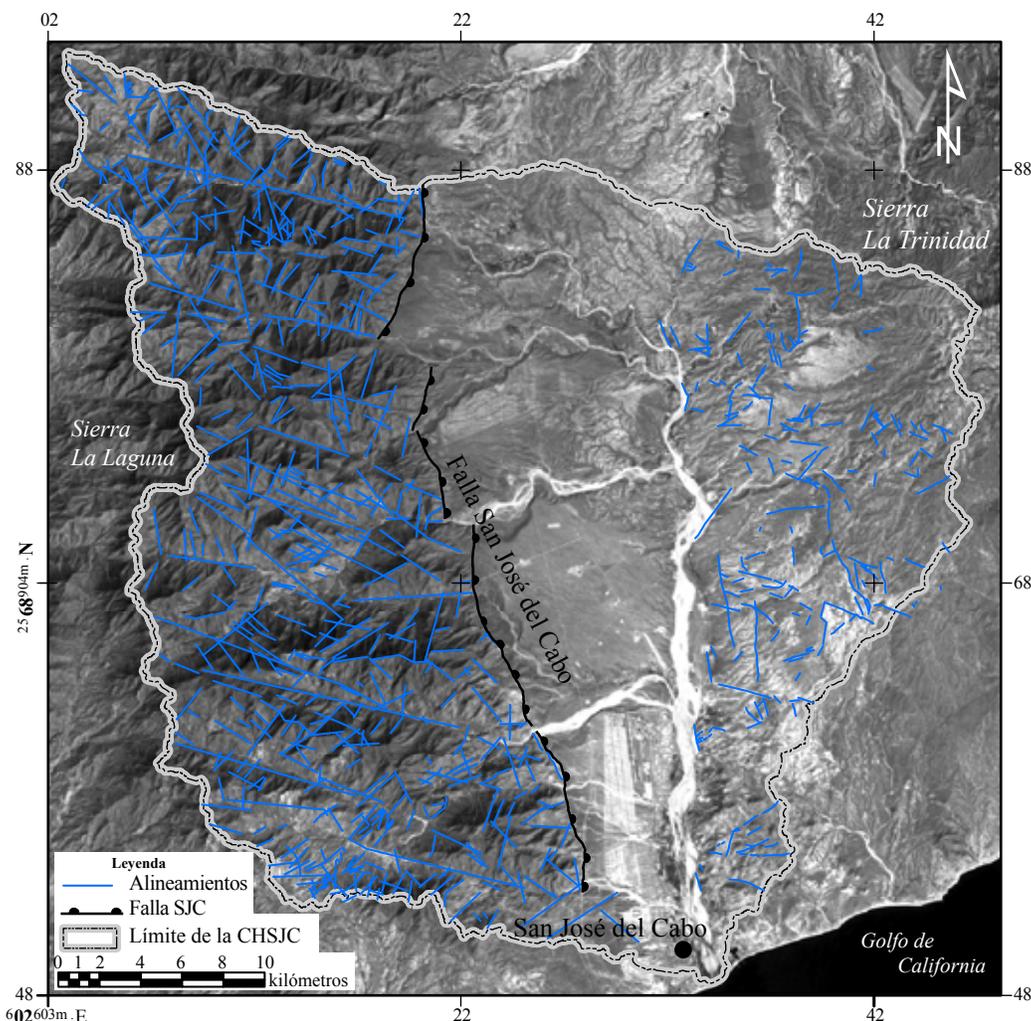


Figura 3. Imagen del Componente Principal 1 mostrando los principales alineamientos obtenidos del filtrado direccional e interpretación visual.

la CPRT) mostró una orientación preferencial NWW-SEE (94° – 103°); asimismo, otra estructura a lo largo del arroyo La Palma (en la CPLM) presentó una orientación aproximadamente este-oeste franco (79° – 101°). Sin embargo, fallas con desplazamiento normal han sido reportadas para la cuenca de San Lázaro (Fletcher *et al.*, 2003). Una serie de alineamientos de menor extensión fueron trazados 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

Se analizó un total de 456 alineamientos identificados por interpretación visual en la imagen del CP-1, de los cuales el 15 % se intersectan. El diagrama unidireccional de roseta para las subcuencas exhibe que las direcciones preferenciales de las estructuras son NE y SE, siendo la orientación NE la más dispersa; pero la dirección SE es la

de mayor frecuencia y con alineamientos de mayor longitud (Figura 4). De acuerdo con 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.

El análisis del mapa DENNUM permitió distinguir que la densidad de alineamientos por unidad de área en las subcuencas varió de 0.5 a 8.5 por km^2 siendo ésta irregular y sin un patrón definido, ya que algunas cuencas como CBLS y CSAL presentaron un mayor número de estructuras por unidad de área en comparación con las otras subcuencas (CPLM, CPRT, CMZQ, CPMI, y CSLZ) (Figura 5a). La zona de mayor densidad de fracturamiento correspondió a las CBLS, CPRT y CSAL; asimismo, estas cuencas tuvieron las áreas con mayor longitud por unidad de área (DENLON) (Figura 5b). Por otro lado, el mapa DENCURU (Figura 5c) exhibió que el cruzamiento de alineamientos ocurrieron en las subcuencas CBLS, CPLM, CPMI y CSAL, cuyos valores fluctuaron entre 0.2 a 4.0 por km^2 .

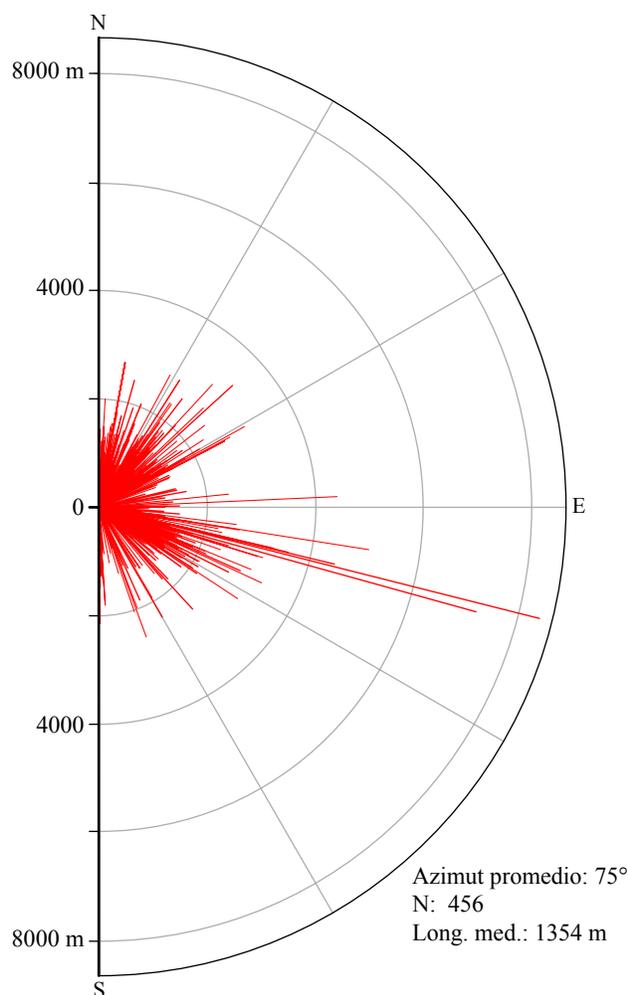


Figura 4. Roseta de direcciones predominantes en los alineamientos.

Morfometría de cuencas

Las siete subcuencas (CBLS, CPRT, CMZQ, CPLM, CPMI, CSLZ, y CSAL) comprenden el 37 % del área total de la CHSJC. Los resultados de trece parámetros morfométricos calculados en las subcuencas, así como los valores de las integrales hipsométricas y los momentos estadísticos (sesgo, densidad de sesgo, kurtosis, y densidad de kurtosis) son mostrados en la Tabla 2.

Las CBLS, CPRT, CPLM y CSLZ presentaron un orden de corrientes de magnitud 5 y las CMZQ, CPMI y CSAL de 4. La longitud de los cauces (L_s) en las cuencas varió de 42 a 279 km, la cual fue proporcional al tamaño de la cuenca, pero relacionada al tipo de litología predominante.

Los valores de la relación de bifurcación (R_b) fluctuaron de 3.15 a 3.94 (Tabla 2), indicando que las estructuras geológicas tienen influencia en el patrón fluvial (Verstappen, 1983). Asimismo, los valores más altos de R_b , obtenidos en las cuencas CBLS, CPRT, CPLM y CSLZ, son indicativos de un estado acelerado de erosión (Verstappen, 1983).

La densidad fluvial (D_d) obtenida para las subcuencas osciló de 1.60 a 1.85, siendo muy uniforme en tres cuencas (Tabla 2); sin embargo, la densidad fluvial en la CSAL fue mayor comparada a cuencas de mayor extensión. Este parámetro proporciona el grado de disección del terreno, escurrimiento potencial, capacidad de infiltración, condiciones climáticas y cubierta vegetal de la cuenca (Verstappen, 1983; Patton, 1988).

El análisis de frecuencia de cauces (F_s) mostró que los valores variaron de 1.86 a 2.36 (Tabla 2), dichos valores proporcionan el número de cauces de todos los órdenes dentro de la cuenca (Horton, 1932). De esta manera, los datos obtenidos en las cuencas confirman el postulado de

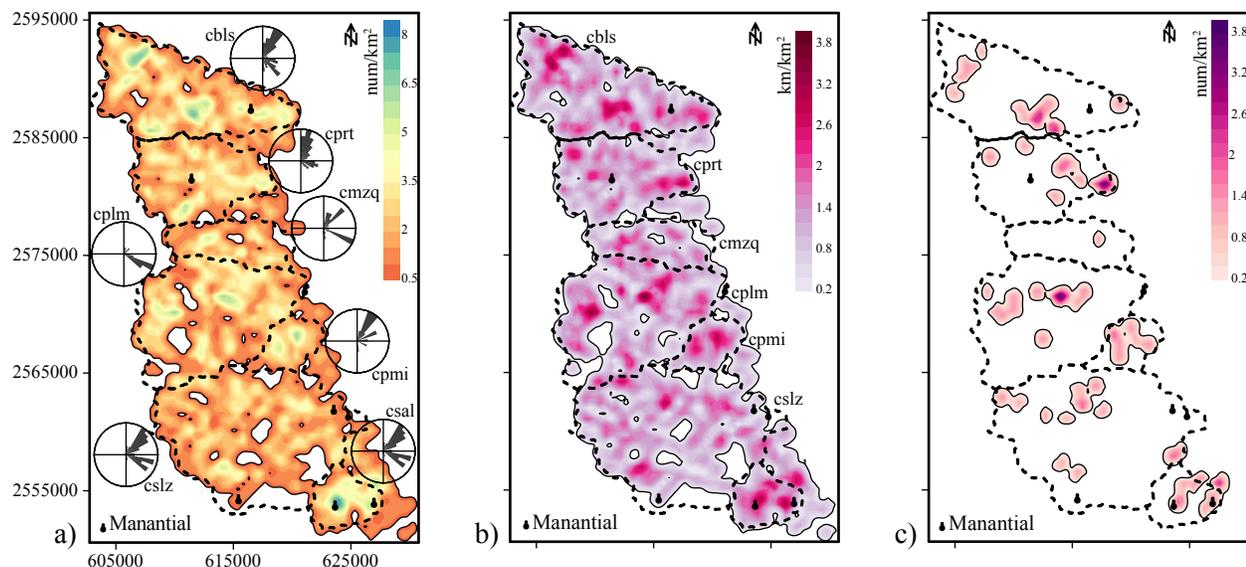


Figura 5. Mapas de densidades y diagrama de rosetas de cada una las subcuencas. a) Densidad de alineamientos (DENNUM), b) Densidad de longitud de alineamientos (DENLON), y c) Densidad de cruzamiento de alineamientos (DENCRU).

una correlación positiva entre el número de cauces y la Dd (Schumm, 1956).

El análisis de relación de textura (T) realizado en las subcuencas indicó que el valor más alto lo obtuvo la CSAL seguido de la CPRT (Tabla 2). Este parámetro es de gran importancia en geomorfología, ya que indica el grado de espaciamiento entre los cauces desarrollados en la cuenca (Horton, 1945). Los valores de la relación de textura (T) fluctuaron en las cuencas de 3.19 a 4.35. De acuerdo a la clasificación de Smith (1950), las subcuencas presentaron valores de textura gruesa a muy gruesa (Tabla 2).

El factor de forma (Ff), que define el grado de circularidad, fue calculado para cada una de las subcuencas. Los valores de Ff fluctuaron de 0.27 a 0.56 (Tabla 2). Los valores Ff para tres subcuencas (CPRT, CPLM, CSLZ y CSAL) indicaron que tienen una forma semicircular alargada y las subcuencas CBLS, CPMI 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 (Miller, 1953; Strahler, 1964). En el área de

estudio, los valores de Rc oscilaron entre 0.29 a 0.43 (Tabla 2), indicando que las subcuencas son alargadas a semialargadas.

Los valores de las curvas hipsométricas proporcionaron el grado de disección (estado erosivo), tectónica, clima y factores litológicos existentes en las subcuencas (Pérez-Peña et al., 2009). Las curvas de las integrales hipsométricas obtenidas en las subcuencas son presentadas en la Figura 6. A primera vista, las curvas de hipsométricas de las subcuencas muestran claras diferencias, sobre todo en las CBLS, CPRT y CPLM, que presentaron una forma convexa con valores altos de la integral hipsométrica, mientras que las otras subcuencas mostraron una forma cóncava con valores bajos (Figura 6).

Asimismo, los momentos hipsométricos estadísticos como sesgo, kurtosis, densidad de sesgo y densidad de kurtosis obtenidos permitieron describir y caracterizar los cambios en la morfología de las subcuencas (Harlin, 1978; Pérez-Peña et al., 2009). Los valores de los momentos estadísticos fueron graficados mostrando una dirección norte a sur para las subcuencas (Figura 7). Los valores de kurto-

Tabla 2. Parámetros morfométricos de subcuencas.

Subcuenca	P	A	H	Rb	Rc	Rf	Dd	Sb	Fs	T	Lb	Nu	Lc
Boca de la Sierra	65.25	97.70	1521	3.53	0.29	0.27	1.71	0.06	1.86	3.19	19.0	182	167.1
Portezuelo	46.53	66.93	1505	3.25	0.39	0.44	1.81	0.09	1.99	3.60	12.4	133	121.4
Mezquite	36.75	34.80	1600	3.92	0.32	0.28	1.77	0.11	1.93	3.40	11.11	67	61.5
La Palma	61.65	113.00	1480	3.79	0.37	0.45	1.75	0.07	2.03	3.55	15.8	229	198.0
Palmilla	25.62	19.45	1300	3.15	0.37	0.36	1.60	0.15	2.06	3.30	7.3	40	31.2
San Lázaro	73.86	154.31	1440	3.94	0.36	0.46	1.81	0.05	1.89	3.43	18.3	292	279.6
El Saltito	25.89	22.91	820	3.29	0.43	0.56	1.85	0.10	2.36	4.35	6.4	54	42.3

P: Perímetro de la cuenca (km), A: Área de la cuenca (km²), H: Relieve máximo (m), Rb: Relación de bifurcación, Rc: Relación de circularidad. Rf: Factor de forma, Dd: Densidad fluvial (km/km²), Sb: Relación de relieve, Fs: Frecuencia de cauces, T: Textura, Lb: Longitud de la cuenca (km), Nu: Número total de cauces, Lc: Longitud total de cauces (km).

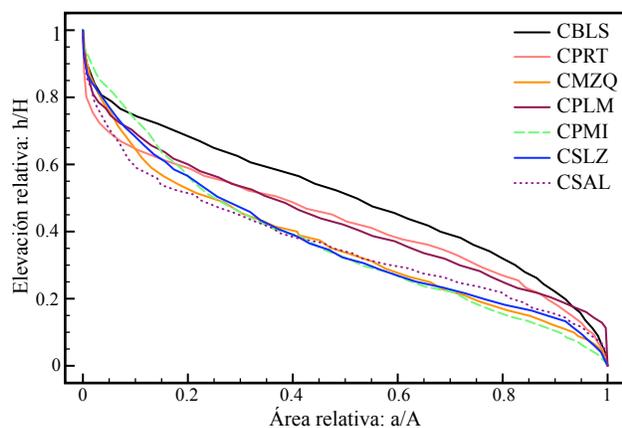


Figura 6. Curvas hipsométricas de las subcuencas. Las curvas de las subcuencas localizadas en la parte norte son más convexas que las localizadas hacia el sur.

sis hipsométrica y densidad de kurtosis se incrementaron ligeramente hacia el sur; sin embargo, los valores para el sesgo hipsométrico y densidad de sesgo difieren en la misma dirección (Figura 7). El valor de densidad de sesgo fue mayor en la CSLZ indicando una pendiente general baja en la cuenca, comparado con las otras subcuencas.

El empleo del índice de longitud-gradiente del cauce (SL) en las subcuencas contrastó la presencia de alineamientos asociados a la dirección de la falla de San José del Cabo (actividad tectónica) con potenciales áreas de captura 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., que fluctuaron entre 268 y 419.

Los valores elevados de SL ocurrieron en casi en todas las cuencas por arriba de la cota de 600 m s.n.m. y en las áreas de mayor densidad y cruzamiento de alineamientos de acuerdo con los mapas DENNUM y DENCUR.

La representación en gráficos mixtos de los parámetros morfométricos densidad fluvial (D_d), relación de textura (T) y densidad de fracturamiento promedio (D_{fp}), indicó que existe escasa relación entre los valores de T y D_d en las subcuencas analizadas. La tendencia indica que a mayor densidad fluvial el parámetro de textura aumenta en algunas subcuencas de 3.2 a 4.35 (Figura 8); sin embargo, valores bajos de T se obtuvieron en las CPRT y CSLZ, a pesar de tener mayor D_d . Por otro lado, la correspondencia entre la D_d y la D_{fp} en las subcuencas no fue directa, ya que existió menor fracturamiento en cuencas con mayor D_d (CMZQ, CPLM y CSLZ).

El análisis de decisión multi-criterios (ADMC) de diez parámetros morfométricos (D_d , F_s , R_b , R_c , S_b , T , D_{fp} , I_H , S y K) realizado indicó que las cuencas CSAL, CPRT y CPLM son las más favorables para la captura de agua (Tabla 3). Los valores de ponderación promedio ordenada (OWA) (Borouhaki y Malczewski, 2008) obtenidos después de 10 iteraciones reafirman que estas cuencas integraron los parámetros morfométricos para una mayor captura de agua.

DISCUSIÓN

Las rocas del basamento cristalino expuestas en la región occidental de la CHSJC representan una zona de interés por su capacidad de 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 sugiere 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 hacia los depósitos aluviales de la CHSJC (Figura 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 interconectividad suceda a profundidad. Esta propiedad está presente 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.

Los valores obtenidos de densidad de fracturamiento y longitud de fracturas en las subcuencas permiten inferir *a priori* que no hay relación directa con los parámetros morfométricos y tectónico calculados, ya que las subcuencas presentaron valores de baja actividad tectónica, en comparación con áreas tectónicamente muy activas (Keller y Pinter, 1999); pero con un alto índice de densidad

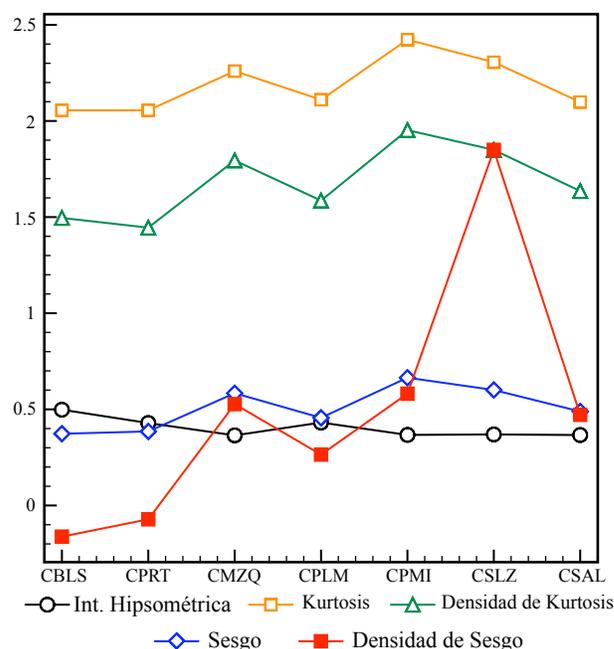


Figura 7. Valores de los principales momentos estadísticos de las curvas hipsométricas para cada una de las subcuencas.

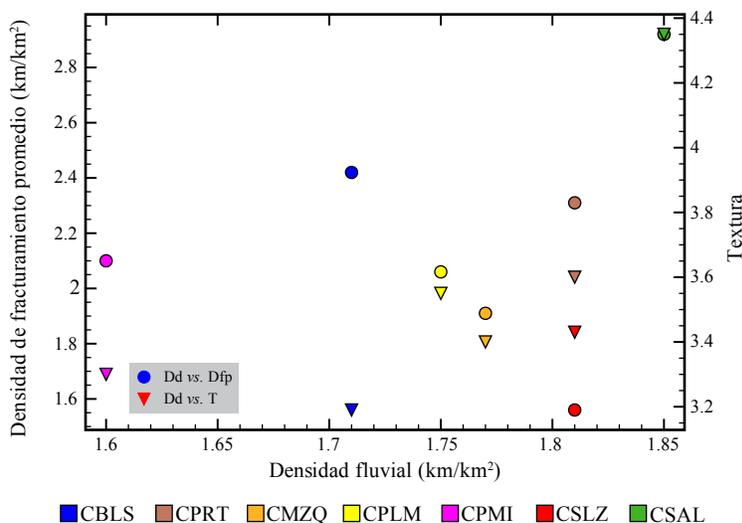


Figura 8. Gráfico de correlación de parámetros morfométricos: Densidad fluvial (Dd), Textura (T) y Densidad de fracturamiento promedio (Dfp) en cinco subcuencas.

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 como lo indican las curvas hipsométricas, densidad fluvial, y textura, pero no así su densidad de fracturamiento (Figura 8). 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. Inferimos que estos valores dependen de la geología subyacente (rocas cristalinas), capacidad de infiltración del basamento y los aspectos de relieve en las subcuencas. Por último, el incremento de la densidad de sesgo es notable para la CSLZ, que es atribuido a cambios de pendiente dentro de la cuenca (parámetro de relación de relieve).

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.

El ADMC indicó que las subcuencas CSAL, CPRT y CPLM son las áreas con mayor potencial para la recarga hacia los acuífero(s) de la CHSJC (Tabla 3); sin embargo, a pesar de que la CSLZ no presentó un mayor grado de fracturamiento identificado en la imagen, la infiltración se puede estar dando a través de la litología intemperizada, inferido a partir de relación de bifurcación y su relación de textura (T).

CONCLUSIONES

El análisis morfométrico y la cartografía geológica de la cuenca hidrológica de San José del Cabo contribuyó en la

Tabla 3. Valores estandarizados de los parámetros morfométricos empleados en el análisis de decisión multi-criterios y su valor ponderación promedio ordenado con potencialidad para la captura.

Subcuenca	Parámetro morfométrico										
	Rb	Dd	Fs	Rc	Sb	T	Dfp	IH	K	S	OWA
Boca de la Sierra	0.481	0.44	0	0	0.876	0	0.625	0	1	1	0.204
Portezuelo	0.127	0.84	0.26	0.714	0.608	0.353	0.551	0.538	1	0.966	0.446
Mezquite	0.975	0.68	0.14	0.214	0.392	0.181	0.265	1	0.459	0.276	0.240
La Palma	0.81	0.6	0.34	0.571	0.794	0.31	0.368	0.462	0.838	0.724	0.400
Palmilla	0	0	0.4	0.571	0	0.095	0.397	1	0	0	0.062
San Lázaro	1	0.84	0.06	0.5	1	0.207	0	1	0.324	0.207	0.250
El Saltito	0.177	1	1	1	0.474	1	1	1	0.892	0.621	0.744

Rb: Relación de bifurcación, Dd: Densidad fluvial, Fs: Frecuencia de cauces, Rc: Relación de circularidad, Sb: Relación de pendiente, T: Textura, Dfp: Densidad de fracturamiento promedio, IH: Integral hipsométrica, K: Kurtosis, S: Sesgo, OWA: Ponderación promedio ordenada.

identificación de potenciales áreas de recarga del acuífero. Herramientas como la percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica facilitaron el trabajo de análisis y la identificación de sitios o áreas de captura hídrica. Sin embargo, la complejidad del área de estudio, dada por su litología y su estructura, no ha facilitado la cuantificación y evaluación de la recarga a través del medio fracturado.

Las subcuencas de Portezuelo, La Palma, San Lázaro y El Saltito presentaron una interesante configuración estructural, hidrológica y geomorfológica; el buen grado de alteración desarrollada (relación de textura), zonas de fracturamiento moderado y mayor densidad fluvial son factores favorables para considerar a estas subcuencas como áreas de recarga de 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 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 el potencial de recarga de las subcuencas individuales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Fondos Sectoriales CONACYT-CONAFOR (C01-5671), a través de la Dra. Aurora Breceda Solís y forma parte de los resultados del proyecto “Programa de manejo para la cuenca hidrológica-forestal San José del Cabo, Baja California Sur”. Agradecemos a los revisores por sus atinadas sugerencias y comentarios. Por último, a todos aquellos que alguna forma contribuyeron en el trabajo.

REFERENCIAS

- Borouhaki, S., Malczewski, J., 2008, Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS: *Computer & Geosciences*, 34, 399-410.
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S.L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J.M., Miranda-Viquez, E., Pineda-Velázquez, A., 1990, Clasificación de Regiones Naturales de México, escala 1:4,000,000: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, IV.10.2, 1 mapa.
- Chorley, R.J., Schumm, S.A., Sugden, D.E., 1984, *Geomorphology*: Londres, Inglaterra, Methuen, 607 pp.
- Cook, P.G., 2003, A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers, Land and water: Adelaide, Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 115 pp.
- Earth Resource Mapping, 2004, ER Mapper Software, v.6.4 (software): Earth Resource Mapping, Image Processing.
- Engman, E.T., Gurney, R.J., 1991, Recent advances and future implications of remote sensing for hydrology modeling, in Bowles, D.S., O'Connell, P.E. (eds.), *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*: Amsterdam, Kluwer Academic Publishers, 471-495.
- Fierstine, H.L., Applegate, 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: *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 100, 59-73.
- Fletcher, J.M., Pérez-Venzor, J.A., González-Barba, G., Aranda-Gómez, J.J., 2003, Ridge-trench interactions and the ongoing capture of the Baja California microplate—New insight from the southern gulf extensional province, en *Geologic Transects across Cordilleran Mexico*, Guidebook for the field trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting: Instituto de Geología, UNAM, Publicación Especial 1, 13-31.
- Gregory, K.J., Walling, D.E., 1973, *Drainage basin form and process: a geomorphological approach*: New York, Wiley, 456 pp.
- Hack, J.T., 1973, Stream-profile analysis and stream gradient index: *United States Geological Survey, Journal of Research* 1, 421-429.
- Hammond, E.H., 1954, A geomorphic study of the cape region of Baja California: University of California, Publications in Geography, 10, 45-111.
- Harlin, J.M., 1978, Statistical moments of the hypsometric curve and its density function: *Mathematical Geology*, 10, 59-72.
- Horton, R.E., 1932, Drainage basin characteristics: *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 13, 350-361.
- Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology: *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Hutchinson, M.F., 1989, A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits: *Journal of Hydrology*, 106, 211-232.
- Jenness, J., 2008, Surface tools for points, lines and polygons (surf_tools.avx), extension for ArcView 3.x, v.1.6a (software): Jenness Enterprises, <http://jennessent.com/arcview/surface_tools.htm>, acceso libre, consulta: 10 marzo 2009.
- Keller, E.A., Pinter, N., 1999, *Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape*: New Jersey, Prentice Hall, Earth Science Series, 338 pp.
- Kim, G.B., Lee, J.Y., Lee, K.K., 2004, Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue scripts: *Computers & Geosciences*, 30, 1117-1126.
- Lattman, L.H., Parizek, R.R., 1964, Relationship between fracture traces and occurrence of ground water in carbonate rocks: *Journal of Hydrology*, 2, 73-91.
- Lloyd, J.W., 1999, Water resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones: París, Francia, UNESCO, Studies and Reports in Hydrology, 58, 284 pp.
- 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: Boulder, CO, Geological Society of America, 141-166.
- Mayer, L., Martínez-Gutiérrez, G., 1997, Tectonic transition from proto-Gulf rifting to modern extension in Baja California Sur, Mexico (resumen), en *South-Central Section 31st Annual Meeting and Rocky Mountain Section 50th Annual Meeting*, El Paso, TX: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 29, 38-39.
- 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), en *Geological Society of America, Annual Meeting*, Salt Lake City, UT: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 37, 311-312.
- Meijerink, A.M.J., 2007, Remote sensing applications to groundwater:

- París, Francia, UNESCO, IHP-VI Series on Groundwater, 16, 311 pp.
- Miller, V.C., 1953, A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee: New York, Columbia University, Office of Naval Research, Technical Report, 3, 54 pp.
- Min, K.B., 2004, Fractured rock masses as equivalent continua: A numerical study: Estocolmo, Suecia, Kungl Tekniska Högskolan (KTH), Land and Water Resources Engineering, tesis doctoral, 187 pp.
- Mina Uhink, F., 1957, Bosquejo geológico del Territorio Sur de la Baja California: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 9, 139-269.
- Pantoja-Alor, J., Carrillo-Bravo, J., 1966, Bosquejo de la región de Santiago-San José del Cabo, Baja California: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 58, 1-14.
- Patton, P.C., 1988, Drainage basin morphometry and floods, *en* Baker, V.C., Kochel, R.C., Patton, P.C. (eds.), Flood Geomorphology: New York, 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: Computers & Geosciences, 35, 1214-1223.
- Petras, I., 2003, Basin1, v.1 (software): ESRI, <<http://arcscripits.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: Journal of the Hydraulics Division, HY5, 667-678.
- Rango, A., 1977, Applications of remote sensing to watershed management, *en* Guidelines for watershed management: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Conservation Guide 1, 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: Journal of Hydrology, 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: Journal of Hydrology, 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: Ada, OK, Dynamac Corporation, Technical Report, 66 pp.
- Schultz, G.A., 1988, Remote sensing in hydrology: Journal of Hydrology, 100, 239-265.
- Schultz, G.A., 1993, Hydrological modeling based on remote sensing information: Advances in Space Research, 13, 149-166.
- Schumm, S.A., 1956, Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey: Bulletin of the Geological Society of America, 67, 597-646.
- 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: Hydrogeology Journal, 14, 433-443.
- Sharma, K.D., Singh, S., 1992, Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model: Hydrological Sciences, 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: Amsterdam, Kluwer Academic Publishers, 15-42.
- Smith, K.G., 1950, Standards for grading texture of erosional topography: American Journal of Science, 248, 655-668.
- Strahler, A.N., 1964, Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks, *en* Chow, V.T. (ed.), Handbook of Applied Hydrology: New York, 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: Enschede, Netherlands, ITC, 437 pp.
- Wentworth, C.K., 1930, A simplified method of determining the average slope of land surfaces: American Journal of Science, 20, 184-194.

Manuscrito recibido: Julio 26, 2010

Manuscrito corregido recibido: Septiembre 6, 2010

Manuscrito aceptado: Septiembre 13, 2010