

**LA DENSIDAD DE DRENAJE DEL VALLE DE LA PAZ
EL CARRIZAL, BAJA CALIFORNIA SUR
Y SU RELACIÓN CON LA RECARGA
DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS**

Emigdio Z. Flores**
Héctor J. García**
Ramón Pimentel H.*
José A. Pérez V.*

Resumen

La densidad de drenaje, una variable geomorfométrica, fue la herramienta empleada en la regionalización del Valle de La Paz - El Carrizal, BCS. Esto permitió prospectar zonas con potencial de recarga y/o almacenamiento de agua subterránea, así como detectar posibles controles estructurales o litológicos sobre el flujo subterráneo.

Tres franjas longitudinales, orientadas N-S, constituidas cada una por tres regiones, central y sur, y éstas a su vez por zonas, aproximadamente homogéneas en cuanto a la densidad de drenaje, constituyen la regionalización mencionada.

Siete zonas de depósito, con material susceptible de almacenar agua subterránea, y varios posibles controles estructurales fueron detectados; entre estos últimos destaca el que domina la comunicación, del flujo subterráneo, entre los valles La Paz y El Carrizal.

La regionalización de un área en función de la variable densidad de drenaje es mostrada como una metodología útil y sencilla, previa a estudios de mayor detalle y adecuada para conocer e inferir características de interés del subsuelo, en relación con el agua subterránea.

Summary

The density of drainage, a geomorphometric variable, proved to be an useful tool to make a regionalization of the Valle de La Paz - El Carrizal. This allowed to prospect zones with potential to recharge and/or storing groundwater, as well as to detect possible structural or litological controls on the groundwater flow.

Three longitudinal fringes, oriented N-S, composed each one by three regions, north, central and south, subdivided by zones approximately homogeneous in terms of the drainage density, form the regionalization.

The former led to prospect seven deposit zones, susceptible to store groundwater, and several possible structural controls, among them there is a prominent one, which governs the groundwater flow in between the valleys of La Paz and El Carrizal.

The study shows how useful is to handle a methodology such as the regionalization of an area in function of the drainage density variable, previous to detailed studies, to know and to infer underground characteristics in relation to groundwater.

* Profesores - investigadores del Área Interdisciplinaria de Ciencias del Mar, Departamento de Geología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Apdo. Postal 99-B, La Paz, BCS.

** Profesores - investigadores del Área Interdisciplinaria de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Agronomía, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Apdo. Postal 99-B, La Paz, BCS.

I. Introducción

Este trabajo es parte de una serie de publicaciones que constituyen un estudio hidrogeomorfológico del Valle de La Paz - El Carrizal (nombre genérico utilizado para denominar el área de estudio), Baja California Sur y su relación con la recarga de los sistemas acuíferos. El primero de ellos fue El Relieve del Valle de La Paz - El Carrizal, BCS, y su relación con la recarga de los Sistemas Acuíferos (Pimentel, *et al.*, 1989).

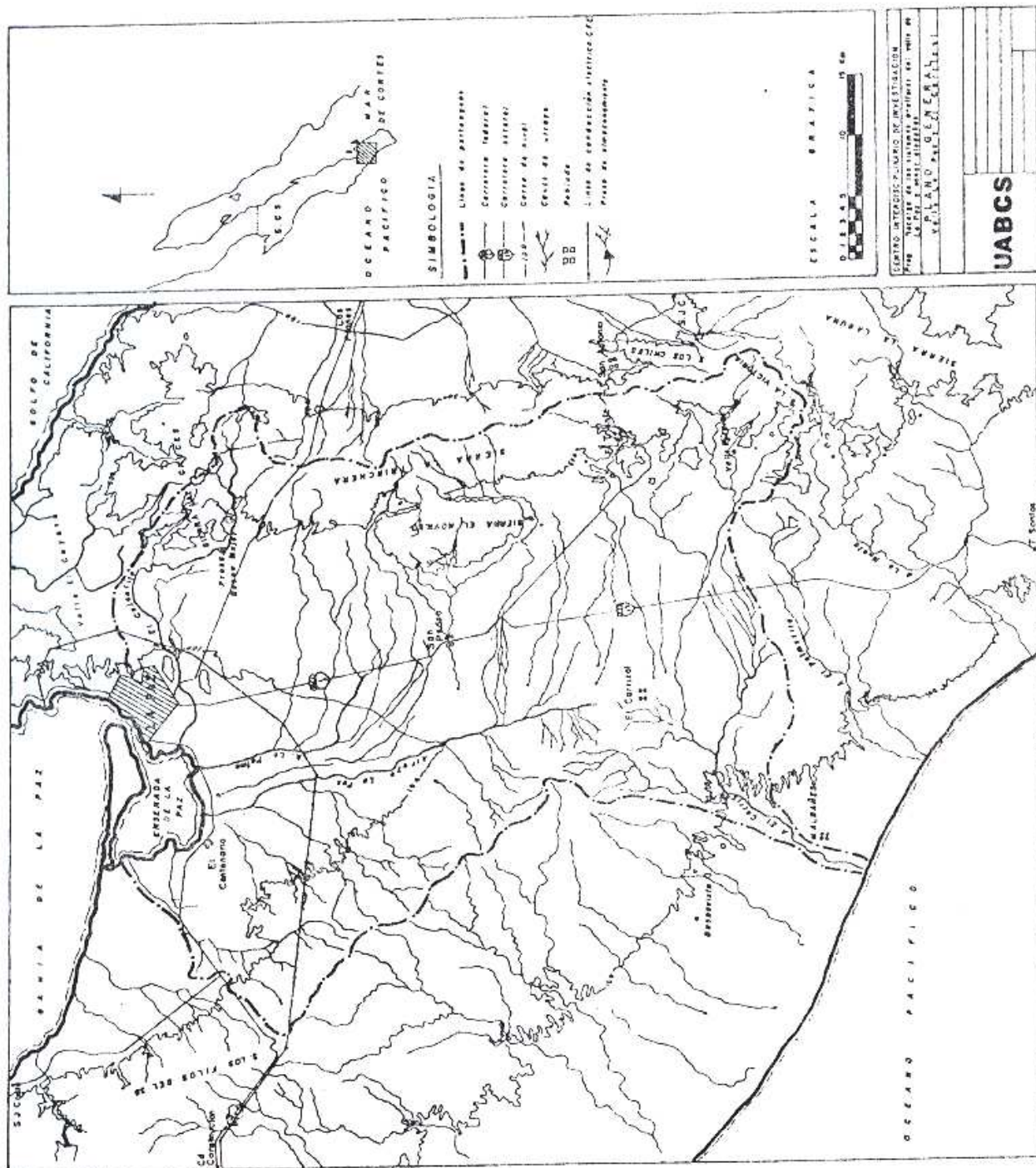
La cuenca hidrográfica Valle de La Paz - El Carrizal cubre una superficie aproximada de 1 800 km² y está localizada al sur de la ciudad de La Paz en BCS (carta 1). El área de estudio, que es mayor que la cuenca, comprende seis hojas topográficas, escala 1:50 000, del INEGI (La Paz, El Centenario, La Victoria, San Antonio, Melitón Albañez y El Rosario) y cubre aproximadamente 5 560 km² (carta 1). Además, el estudio está basado en las cartas provisionales, las cuales marcan una red de drenaje más completa que las definitivas.

El interés de este trabajo consiste en mostrar como una técnica morfométrica (cuantificación de formas) sencilla, semejante a la empleada por Lugo y Martínez (1980) y Lugo (1981), y una metodología, la regionalización de un área específica mediante una variable, la densidad de drenaje, constituyen una herramienta útil para tratar de conocer o prospectar áreas con potencial de recarga y almacenamiento de agua subterránea.

Conviene aclarar, también, que a lo largo del estudio se trató, al máximo, de no utilizar información geológica y geofísica, con el propósito de probar todo el potencial de la metodología propuesta. Estudios posteriores sobre el área han confirmado gran parte de las inferencias y conclusiones hechas a lo largo del trabajo. Sin embargo, como éste forma parte de un estudio hidrogeomorfológico, futuras publicaciones mostrarán la integración de la información aportada por diferentes enfoques o aproximaciones empleadas.

II. Densidad de drenaje

Un plano de densidad de drenaje o de disección horizontal del terreno muestra, cuantitativamente, la cantidad de corrientes o cauces en espacio, es decir, en un área determinada, por medio de un número que expresa la longitud total de cauces, L , por unidad de superficie, A . Este parámetro es conocido como densidad de drenaje, D , e indica el total de kilómetros de cauce por kilómetro cuadrado de superficie. Asimismo, es interesante observar que el inverso de D es un indicador de la separación promedio entre cauces, L_c ; i.e. un valor pequeño de la densidad de drenaje, o lo que es lo mismo una cantidad pequeña de cauces por unidad de superficie, implica una gran separación, promedio, entre ellos.



Carta 1. Localización del área de estudio, Valle de La Paz - El Carrizal y zonas aledañas, estado de Baja California Sur.

$$D = L/A \quad (\text{km}/\text{km}^2 = 1/\text{km})$$

$$Lc = A/L \quad (\text{km}^2/\text{km} = \text{km})$$

Un plano de drenaje clasifica la red de drenaje con base en los patrones típicos de las corrientes y respeta los parteaguas, ajustándose a las cuencas hidrográficas. No obstante, en muchas ocasiones la litología o las estructuras rebasan al simple relieve del terreno. Es aquí, donde el plano de densidad de drenaje trasciende al de drenaje, pues al cuantificar el número de corrientes por unidad de superficie no queda restringido por la topografía del terreno, y sí maneja adecuadamente los cambios litológicos y estructurales.

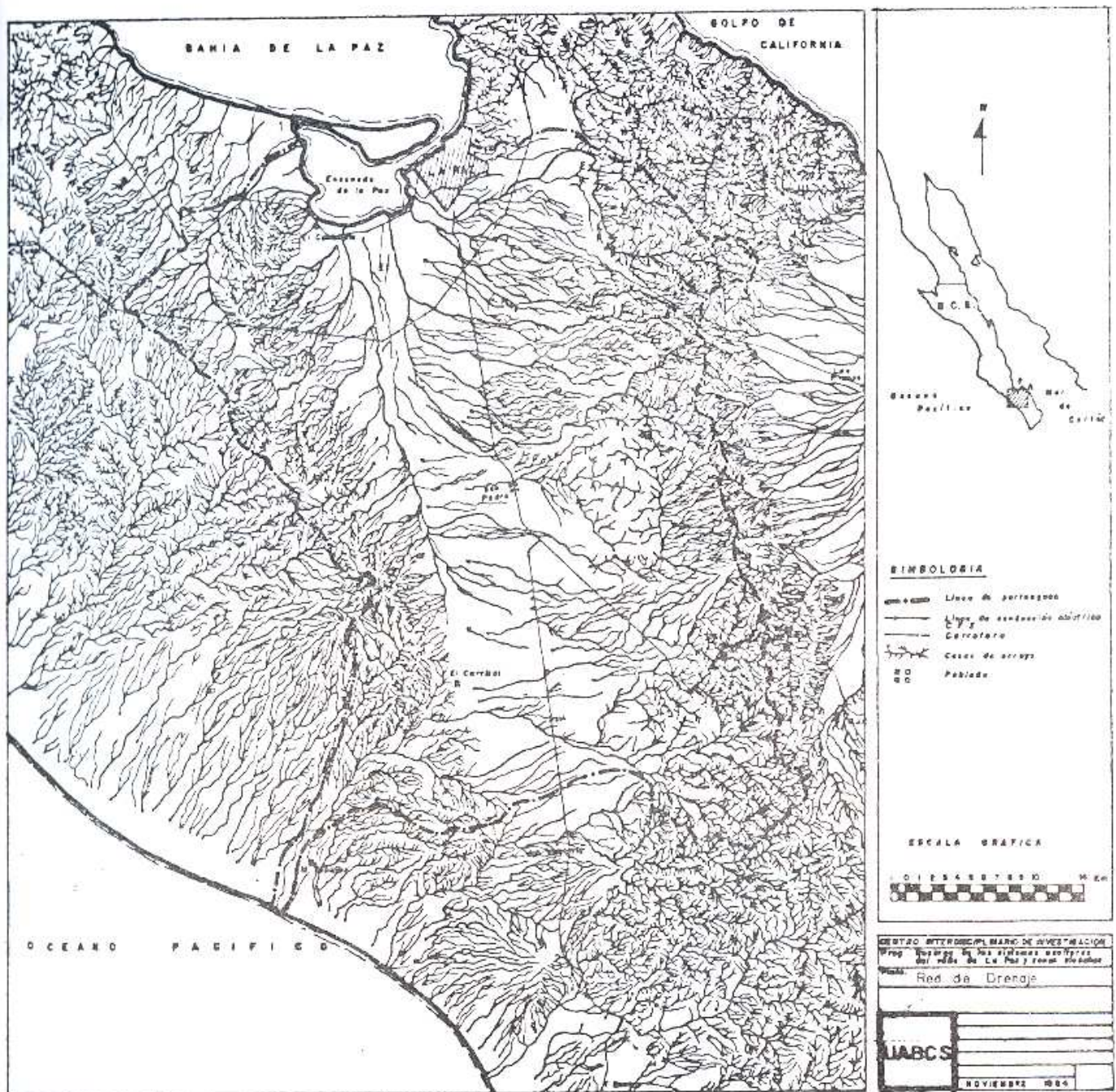
Para facilitar su manejo, los valores numéricos de densidad de drenaje en el texto y en la **carta 3** aparecen aumentados 100 veces.

La construcción de un plano de disección horizontal es sencilla, pero un poco laboriosa. Requiere contar con la red hidrográfica del área de estudio, lo más fidedigna posible (**carta 2**). En este caso, ésta fue obtenida de los planos topográficos provisionales, escala 1:50 000, de CETENAL (ahora INEGI). Además, puesto que la definición de densidad de drenaje involucra una superficie, es necesario discretizar la información, para lo cual se construye una malla. La cual es conveniente apoyar en coordenadas geográficas específicas, tales como paralelos y meridianos locales; para comparar e integrar esta información, si es necesario, con otra variable geomorfológica.

La escala de los planos topográficos da un grado de definición de la red de drenaje que conduce, necesariamente, a definir un nivel de resolución, más allá del cual es difícil hacer inferencias. Por lo tanto, es claro que la D es una variable que depende de la escala de trabajo empleada. Asimismo, el número de cuadros (o el tamaño de cada celda) que constituye la malla, condiciona las inferencias a obtener, por ejemplo, un número reducido de cuadros oculta información. Aquí la dimensión asignada a cada celda, que resultó ser satisfactoria, es de 4.2 x 4.6 km, y está basada en el control geográfico de las cartas topográficas, escala 1:50 000. Sin embargo, conviene aclarar que la dimensión de un tamaño óptimo de celda o cuadro acorde a la escala, a la variable empleada y al objetivo planteado es todavía, en geociencias, un tema abierto de investigación.

Por medio de un aparato para medir longitudes (curvímetro) se obtiene la longitud total de cauces por cuadro y esta cantidad es dividida por el área del cuadro, calculándose así la densidad de drenaje de dicho cuadro o celda. En el centro de cada celda es anotado el valor correspondiente; con los cuales se dibujan las curvas de isovalores (**carta 3**). Con el objeto de resaltar aún más los altos y las depresiones, es conveniente iluminar el plano con una amplia gama de colores, que ayude a enfatizar todos aquellos rasgos peculiares.

Los valores bajos de la densidad de drenaje son un reflejo de la ausencia de cauces y, en general, pueden ser asociados a: zonas de acumulación detritos, o a rocas duras, cuando existen rocas cristalinas. Un ejemplo de la primera situación es la que ocurre en ambas costas (**cartas 2 y 3**), la del Golfo de California o Mar de Cortés y la del Océano Pacífico. Las cuales presentan condiciones favorables para el depósito de sedimentos, al contar con plataformas oceánicas poco profundas, a excepción de las porciones NE



Carta 2. Red de drenaje del Valle de La Paz - El Carrizal.

y SE, en donde la ausencia o gran profundidad a dicha plataforma, y quizá la dirección de las corrientes, propician un área de acumulación casi nula, representada por un alto gradiente de las curvas.

Los valores altos de la densidad de drenaje reflejan un alto grado de denudación, asociado no solo a las características del material superficial y a los procesos actuantes sobre él, sino también al material rocoso subyacente y a los procesos endógenos, que de cierta manera se manifiestan como fracturamientos o gradientes topográficos excesivos.

III. Regionalización

3.1. Introducción

Una regionalización es un proceso de descomposición espacial (geométrico) de un todo, un área específica, en sus elementos, aproximadamente homogéneos por sus atributos o comportamiento, en términos de un adjetivo calificativo, en este caso la densidad de drenaje. Este proceso sistémico permite obtener un gran cúmulo de información integrada y no aislada, como en el caso de una simple descripción geomorfológica. Lo anterior requiere de la definición o búsqueda de fronteras *ad hoc*. Los planos coloreados y las perspectivas tridimensionales son dos representaciones de la información que se complementan y facilitan la búsqueda, lo más objetiva posible, de fronteras.

A un nivel regional fue posible observar, visualmente, que la región de interés está formada por tres grandes franjas longitudinales, a saber: I, II y III, orientadas aproximadamente en dirección norte-sur (carta 3). Las cuales definen, respectivamente una zona de altos; otra con dos depresiones, una en el Valle de La Paz y otra en el Valle de El Carrizal (carta 1); y la última al oeste de la cuenca hidrográfica, formada por dos zonas longitudinales de altos, que dan lugar a una depresión intermedia y al norte a una zona con valores medios más o menos erráticos.

Las fronteras entre las diferentes franjas fueron obtenidas a partir de cambios en las formas de las isolíneas y de cambios bruscos en los valores de éstas, es decir, en gradientes pronunciados.

En el caso de la frontera entre I y II la curva 300 (3 l/km) define, aproximadamente, un cambio contrastante entre valores altos y bajos; la frontera entre II y III, curva 200, quizás está mejor definida que la anterior, pues aquí sí se observa un gradiente pronunciado y bien definido, reflejo de un cambio brusco en el sistema de drenaje, a excepción de la parte sur (carta 3).

Ambas costas definen claras zonas de acumulación de material transportado, es decir, con escaso drenaje. La sierra Las Cruces al Norte, la sierra Las Trincheras, la sierra Los Chiles y la sierra La Victoria, prosiguiendo hacia el Sur, forman el parteaguas Este de la cuenca (carta 1), un área con alta precipitación (en relación con el valle) y alta densidad de drenaje.

Un hecho de interés al estudiar la información del plano de densidad de drenaje es que al descender por el terreno una corriente de cierta importancia cada vez es menor el drenaje que se ubica en los alrededores del cauce principal, lo cual implica

un espaciamiento entre isolíneas cada vez mayor. Asimismo, donde se observan altos, semejantes a lomeríos alargados, éstos tienden a mostrar el cambio de orientación de un cauce principal.

Las figuras 1 y 2 (representación tridimensional de la densidad de drenaje, con base en el plano de isovalores) apoyan cualitativamente lo anterior e ilustran perfectamente las formas mencionadas. La figura 1 es una vista desde el Océano Pacífico hacia el Noreste, con una visual inclinada 45° sobre el horizonte (compárese con la carta 3); lo mismo ocurre con la figura 2, pero observando desde el Mar de Cortés hacia el Suroeste.

Un vez definido el nivel regional (franjas), una observación más cuidadosa, basada en los principios anteriormente señalados conduce a niveles de mayor resolución o niveles locales (regiones y zonas). A continuación son descritas, en estos últimos niveles, las diferentes franjas que forman el área de interés.

3.2. Franja I

Al Norte de I está localizada IN, una región con valores muy altos de D, hasta del orden de 425 (carta 3), con isolíneas cerradas, característica de un área bien definida y aislada, probablemente un cuerpo intrusivo bastante fracturado y tectónicamente activo; obsérvese que la separación promedio entre corriente, Lc, es únicamente del orden de 220 m.

La región central IC muestra una gran regularidad en sus altos, asociada posiblemente a una etapa avanzada de desarrollo de drenaje, que aunado a la alta densidad de drenaje da por resultado una alta producción de sedimentos, que es trasladada hacia las corrientes o cauces principales. También, los altos gradientes en ambos flancos, en especial el Este, probablemente están relacionados con un gran control estructural longitudinal, con dirección Norte-Sur. La zona IC2, con altos de hasta 400, parece ser una transición entre las regiones Norte y Central.

En la porción sur de I, región IS, sierra La Laguna, existe una zona con forma de cabeza de pato, con valores altos (hasta 325) desordenados, que indica actividad tectónica, no tan notable como en IN. El gradiente pequeño, en gran parte de IS, parece ser un reflejo de la homogeneidad del material rocoso constituyente.

La frontera entre las franjas I y II, en general, está definida por un gradiente pronunciado, y pasa entre la S. El Novillo y la sierra La Trinchera (carta 1), para continuar hasta la sierra La Laguna, alineación que concuerda con la Falla de La Paz. Esta anomalía en la densidad de drenaje es, quizás, el reflejo de sendos controles estructurales que dan lugar a uno o varios bloques caídos, que forman el graben La Paz - El Carrizal.

La frontera este de la franja, con un alto gradiente, indica la presencia de un control estructural, que junto con el de la Falla de La Paz muestran que la porción montañosa (franja I) es una enorme área de levantamiento.

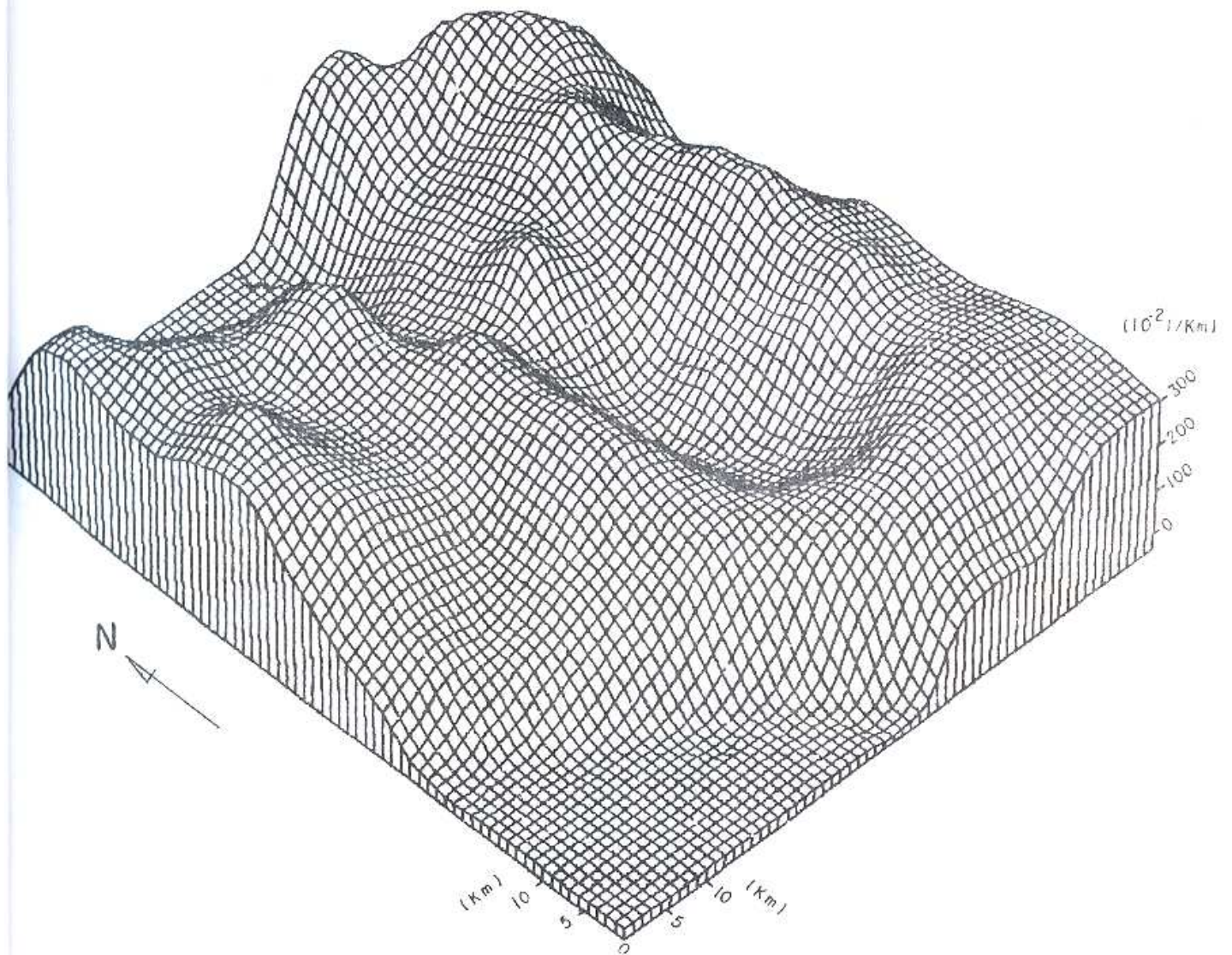


Figura 1. Bloque diagramático de la densidad de drenaje del Valle de La Paz - El Carrizal, visto desde el suroeste.

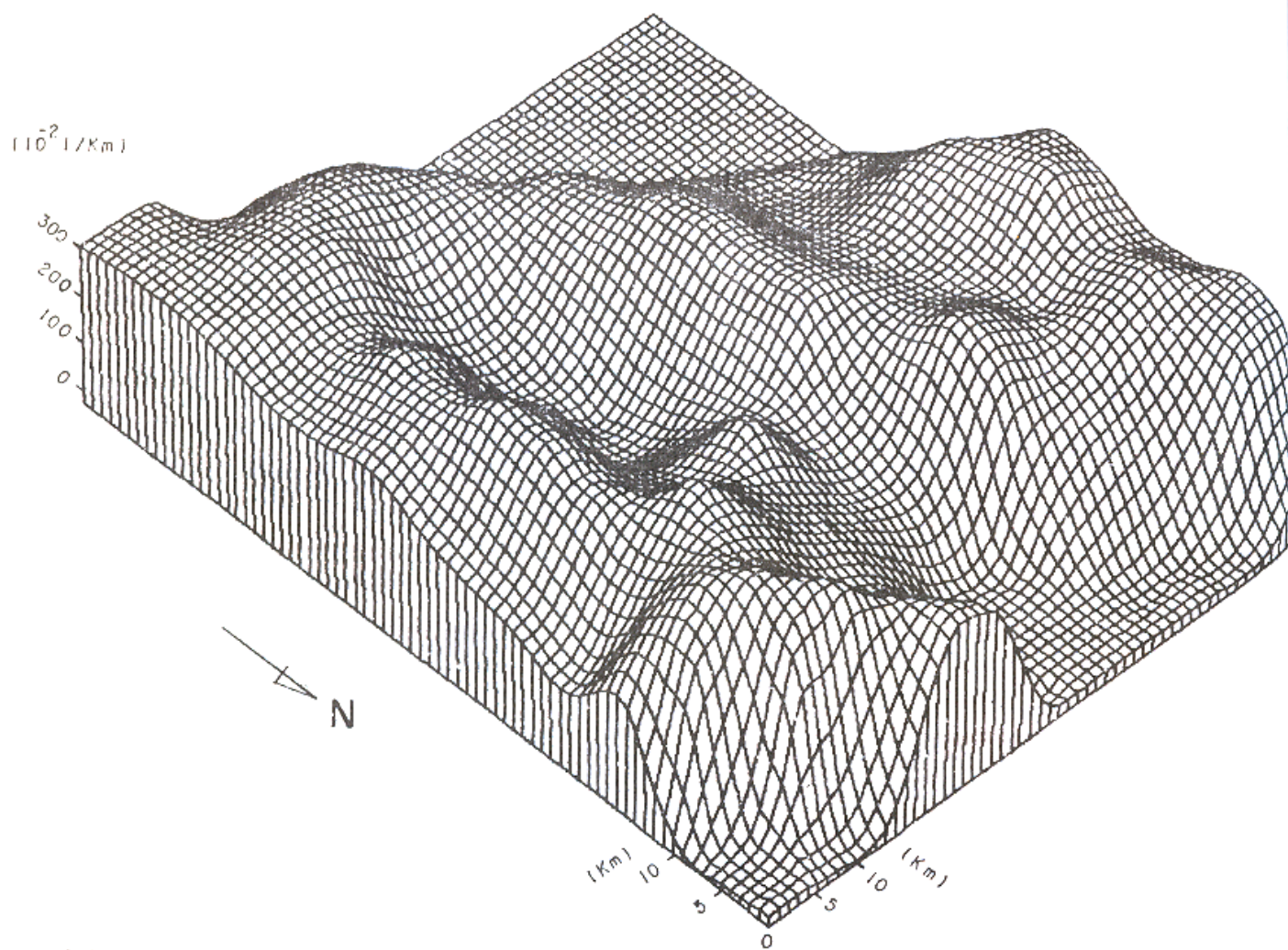


Figura 2. Bloque diagramático de la densidad de drenaje del Valle de La Paz - El Carrizal, visto desde el noroeste.

3.3. Franja II

La depresión IIN2, con valores de hasta 125, está localizada en el Llano La Laguna y se asocia al abanico aluvial del Arroyo El Cajoncito. Vecina a esta zona existe otra con valores bajos y altos gradientes, IIN4, seguramente ligada a una materia disímil al resto, pero semejante a IIN2 (carta 3). La zona IIN1 representa una zona intermedia entre la montaña y el valle, las curvaturas de las isolíneas están dominadas por un cierto número de corrientes principales y un probable control estructural al Sur. Su forma, análoga a la de una protuberancia topográfica, indica una zona de acumulación.

La zona IIN3 presenta la forma de una "V", semejante a la representación topográfica de un cauce, y puede ser asociada a una zona de erosión ligada al cauce denominado Arroyo la Paz (carta 1).

Asimismo, obsérvese la inexistencia de un manchón de valores pequeños que defina con precisión a la sierra El Novillo, que cuenta con escaso drenaje (cartas 1 y 2). Esto puede explicarse por la escala de trabajo utilizada, es decir, por el tamaño, relativamente grande, de los cuadros de la malla en relación con las dimensiones de la sierra. Sin embargo, aun así existe cierta deformación de las isolíneas.

Al NW de la sierra El Novillo es posible observar un alto, IIC2, con valores de hasta 350, que conectado con otro alto IIIC4, define la frontera transversal entre las regiones Norte y Central de la franja II. Condición debida, posiblemente, a un control estructural; lo cual está apoyado en la presencia de un gradiente pronunciado de las curvas de isovalores en los flancos de ambos altos, que definen dos grandes zonas de acumulación (IIN3 y IIC1), conectadas entre sí por un angostamiento.

La zona IIC1, debido a su gran extensión y bajos valores de densidad de drenaje, es un área con alto potencial para almacenar agua. Colindando con la sierra La Trinchera existe otra zona importante de acumulación, IIC3, que contribuye con agua subterránea a IIC1 (carta 3).

Desplazándose hacia el sur de la franja está localizada IIS1, una zona formada, en su mayor parte, por material sumamente homogéneo, con un bajo gradiente. La zona IIS2 es disímil por su alto gradiente.

3.4. Franja III

Al norte empieza a desarrollarse una pequeña zona de acumulación, IIIN1.

Al oeste del valle, IIIC4 presenta cuatro altos con valores hasta de 375. El primer alto, alargado, muestra gradientes muy pronunciados, reflejo, quizá, de una falla que continúa con cambios en dirección de 90° a lo largo de los otros altos, siguiendo la orientación del Arroyo La Paz, posiblemente controlado a su vez por dicha discontinuidad.

Al extremo oeste de la franja, en la región central, la zona IIIC2 está definida por tres altos, con un valor máximo de 400 en uno de ellos. Aquí es interesante señalar la alineación N-S, semejante a IIIC4, explicable por un posible reflejo de un control estructural enmascarado o quizás por un cambio en facies en las rocas sedimentarias de origen marino de la región. Las zonas de altos IIIC2 y IIIC4 definen a su vez a IIIC1,

una depresión con valores menores de 225 y una zona de transición, IIC3 (obsérvese su aleatoriedad, **carta 3**).

Al sur de IIC1 y constituida por valores menores a 200 está localizada IIS. Es una gran zona de acumulación que por su vecindad a la costa del Océano Pacífico probablemente está favoreciendo la intrusión de agua de mar; esta zona parece formar un todo con la depresión IIC1, y probablemente define toda una gran cuenca subterránea.

También es interesante mencionar que los máximos de densidad de drenaje no necesariamente coinciden con los parteaguas superficiales, por ejemplo, en la porción oeste de la cuenca los valores altos ocurren dentro de la cuenca (**carta 3**). La explicación de esto puede ser un control litológico o estructural sobre el patrón de drenaje; una situación diferente ocurre en la porción Este, donde los altos están localizados, aproximadamente, sobre el parteaguas de la cuenca.

IV. Conclusiones y discusión

4.1. Conclusiones

El área de estudio, cuenca de La Paz – El Carrizal y áreas circunvecinas, comprende siete zonas de depósito (detritus) con potencial para almacenar agua subterránea (**carta 3**), a saber:

- - - Abanico aluvial del Arroyo El Cajoncito (IIN2)
- - - Valle de La Paz (IIN3)
- - - Valle de El Carrizal (IIC1)
- - - Santa Rita – El Salto (IIC3)
- - - Zona costera de Buenavista (IIS)
- - - Depresión Occidental (IIC1)
- - - Área de Los Planes (al oriente de IC)

Además, fueron detectados posibles controles estructurales que influyen sobre el movimiento del agua subterránea, como son: los situados a ambos costados de las sierras las Cruces y La Trinchera, Falla de La Paz y Falla de Los Planes, respectivamente; el que va desde la margen oeste de la Ensenada de La Paz y sigue aproximadamente el Arroyo de La Paz (falla El Carrizal); otro que divide los valles de La Paz y El Carrizal, dejando libre una comunicación entre ellos; así como dos alineaciones N-S de altos (IIC2 y IIC4) que, quizás, junto con IIC1 indican un posible cambio de facies aunado a estructuras en el subsuelo, tal como un anticlinal en IIC1.

4.2. Discusión

Como es posible observar, la elaboración de un plano de densidad de drenaje y su subsecuente interpretación dentro de un proceso sistémico de regionalización resulta ser de gran utilidad, para entender la constitución y comportamiento de un área en cuanto al control del movimiento y almacenamiento de agua subterránea. Entre las ventajas que destacan, están: el escaso material e información necesario; la simple construcción del plano de densidad de drenaje; su relativa sencillez de interpretación hidrogeológica; y su potencial morfométrico, es decir, el manejo de variables susceptibles de ser cuantificadas con base en sus formas, como la densidad de drenaje, y de ser empleadas como parámetros de comparación con otras regiones.

La utilidad hidrogeológica de una regionalización con base en la densidad de drenaje puede ser:

- Regionalización de una región en relación con la acumulación de sedimentos y diferencias en grado de disección horizontal.
- Detección, a partir de gradientes pronunciados en las curvas de isovalores, de discontinuidades litológicas o estructurales, con sus correspondientes influencias sobre el flujo de agua subterránea. Lo anterior está basado en la hipótesis de que algunas estructuras subyacentes reflejan su presencia en la superficie como cambios en la densidad de drenaje.
- Prospección de áreas bajo el efecto de procesos denudativos, a partir de zonas de altos bien definidos.
- Obtención de homogeneidades litológicas, con base en gradientes pequeños de las isolíneas.
- Descripción de antigüedad morfológica relativa, con base en una alta regularidad de la curvatura de las isolíneas, que aunado a valores altos de la densidad de drenaje conduce a un alto potencial de arrastre de sedimentos.
- Detección de intrusivos, a partir de regularidades, cambios en dirección de los patrones de drenaje y altos gradientes circundantes.

Es importante mencionar que una regionalización de un área específica con base en una variable morfométrica, tal como la densidad de drenaje, implícitamente, considera elementos conspicuos del paisaje, como el relieve y el sistema de drenaje; reflejo a su vez de la geología local y regional, y de los procesos endógenos y exógenos que actúan sobre el paisaje. Lo cual es lo que imparte a la metodología propuesta un gran potencial. No olvidándose, sin embargo, que un estudio de esta índole debe formar parte de otro más completo, como es el hidrogeomorfológico en el caso actual, o ser el antecedente de una investigación hidrogeológica de detalle.

Referencias

- Lugo H., J. y V. M. Martínez L., "La disección del relieve en el sur de la Cuenca de México y porciones adyacentes", *Boletín del Instituto de Geografía*, núm. 10, UNAM, México, 1980, págs. 55-64.
- Lugo H., J., "La relación con la geomorfología de algunos yacimientos hidrotermales mexicanos", *Asoc. de Ing. Min. Met. y Geol. de México, Memoria Técnica, XVI*, Acapulco, Gro., Instituto de Geografía, UNAM, México, 1981.
- Pimentel H., R., E. Z. Flores, J. A. Pérez y H. J. García, El Carrizal, BCS, México y su relación con la recarga de los sistemas acuíferos, *Revista de Investigación Científica*, vol. 1, núm. 2, UABCS, 1989, págs. 3-17.