

Aplicación de imágenes satelitales

para determinar el clima y la radiación solar en el estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte

Rogelio Ramos Aguilar*, Alejandro Rivera Domínguez**, Raúl Mayorga Rapozzo*** y José Luis González Guevara****

Recepción: febrero 27 de 2003

Aceptación: julio 9 de 2003

* Universidad Tecnológica de Puebla, Electricidad y Electrónica Industrial. Antiguo Camino a la Resurrección No. 1002-A. Zona Industrial. C.P. 72300. Puebla, Puebla.

Correo electrónico: rogelio_ramosa@yahoo.com

** Secretaría de Gobernación de Puebla, Estación Terrena de Satélites. Av. Reforma 1305, altos. C.P. 72000.

Correo electrónico: nemo50@yahoo.com.mx

*** Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, CUPREDER. 4 Sur 305.

Correo electrónico: rmayorga@siu.guap

**** Universidad Iberoamericana, Plantel Golfo-Centro.

Correo electrónico: jgg@yahoo.com

Resumen. Se presentan las características de modelación de condiciones climáticas en el Estado de Puebla, los resultados han sido comparados con mediciones satelitales y se ha obtenido información muy importante para contribuir a las ciencias atmosféricas en el estado de Puebla.

Palabras clave: radiación solar, clasificación kopen, geohidrología, clima, infrarrojo.

The application of satellite images to determine the climate and solar radiation of the state of Puebla and the geohydrology of its northern zone.

Abstract. This study presents the characteristics of climate in the state of Puebla. The results have been compared to measurements taken by satellites, and the findings constitute a very valuable contribution to Atmospheric Sciences in the state of Puebla.

Key words: solar radiation, kopen classification, geohydrology, climate, infrared.

Las condiciones atmosféricas en el estado de Puebla están relacionadas con el sistema volcánico compuesto por el Popocatepetl e Iztaccihuatl, en la mesa central de la República Mexicana; se localiza entre los 18°45' y 19°15' latitud Norte, con una orientación Norte-Sur, además de la Malintzin al noreste de la capital del estado.

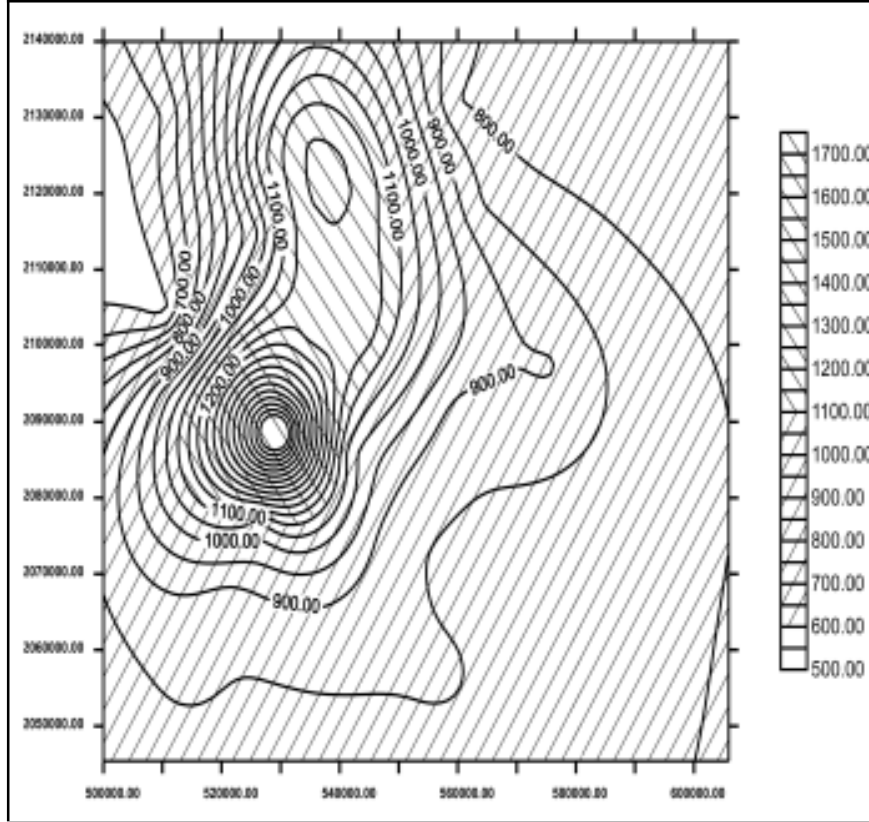
Los factores meteorológicos que afectan la región son: ondas tropicales u ondas del este, ciclones tropicales y por último los frentes fríos o invasión de aire polar. Las ondas tropicales son ondulaciones de la corriente básica de los alisios: se desplazan de este a oeste con una velocidad media de 15 km/h, lo que produce movimientos ascendentes

con nubes de gran desarrollo vertical; además, fuertes precipitaciones se presentan entre los meses de junio a octubre y con mayor frecuencia en agosto.

Un ciclón tropical es la circulación de huracanes por las costas del Golfo de México o las costas del Océano Pacífico que introducen humedad a la región y en algunas ocasiones se internan provocando lluvias persistentes y aguaceros. El periodo de huracanes, comprende los meses de mayo a octubre, de los cuales septiembre es el mes con más recurrencia de estos sistemas meteorológicos.

Los frentes fríos son masas de aire polar continental, los efectos de estos sistemas en la región se traducen en un

Figura 1. Acumulación en milímetros de precipitación pluvial. Unidades geodésicas en UTM (metros).



descenso brusco de temperatura acompañado en algunas ocasiones de precipitación pluvial.

Para modelar y graficar el comportamiento de estos fenómenos, se utilizó la información de temperatura media mensual y lluvia mensual de 24 estaciones climatológicas publicada en las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional durante los últimos doce años.

1. Tipo de clima según la clasificación de Köppen modificada por García

La variación del clima en las zonas montañosas o llanuras de altitud superior a los 800 m o 1,000 m depende de la altitud, de la latitud y de la exposición a los vientos húmedos.

El clima ET (clima frío) comprende una temperatura media anual entre -2° y 5 °C, y se encuentra entre las curvas de nivel de 4,000 m y 5,272 m; en este intervalo de altitud se considera que la temperatura es de 0 °C en los meses más calientes del año, por lo que la continua formación de hielo impide el desarrollo de vegetación (ver figuras 1 y 2).

1. La letra w representa la presencia de canícula, el símbolo i (isotermal) indica una oscilación térmica menor de 5 °C, e (i') indica poca oscilación, es decir, entre 5 y 7 °C.

El clima EF (clima muy frío), también conocido como de nieves perpetuas, tiene una temperatura media anual menor de -2 °C, y está presente a una altitud mayor de 5,272 m.

Descendiendo en altitud, después de los 4,000 m está presente el clima C(w2)(w), semifrío subhúmedo con lluvias en verano, temperatura promedio mensual mayor de 10 °C. Después de este clima y rodeando los volcanes a una altitud de 2,500 m está el clima C(w2)(w)(i'), semifrío húmedo, cuyo límite térmico superior son los 12 °C de temperatura media anual, y el inferior de 5 °C, con más de cuatro meses con temperatura promedio de 12 °C y temperatura media del mes más caliente de 22 °C (ver figuras 3 y 4).¹

Al oriente como al poniente están presentes los climas: C(w2)(w), templado subhúmedo con verano fresco largo, lluvia anual mayor a los 55.3 mm por cada grado de temperatura me-

dia anual; el C(w1)(w), templado subhúmedo con verano fresco largo, lluvia anual entre 43.2 y 55.3 mm por cada grado de temperatura media anual, y finalmente el clima tipo C(w0)(w), templado subhúmedo con verano fresco largo, lluvia anual menor a 43.2 mm por cada grado de temperatura media anual.

Hacia el suroeste están presentes los climas (A)C, semicálidos del grupo C; (A)C semicálidos del grupo A, hasta el grupo Aw0(w)(i'), cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y con poca oscilación térmica.

Esta variación del clima en las laderas sureste y suroeste es el efecto de la exposición directa a los vientos procedentes del Océano Pacífico y del Golfo de México, que en verano son cálidos y húmedos.

2. Radiación solar

El Sol provee alrededor de 99.7% de la energía calorífica requerida para los procesos físicos de la atmósfera, y cada minuto es radiada una cantidad de calorías de energía denominada constante solar. La constante solar es normalmente conocida como el flujo de la radiación solar en la alta atmósfera recibida sobre una superficie en forma perpendicular a la distancia media entre la Tierra y el Sol. La

constante solar para el estado de Puebla podemos denominarla por S :

$$s = \frac{56 \times 10^{26} \text{ cal/min}}{4\pi(1.5 \times 10^{13} \text{ cm})^2} = 2.0 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

Las equivalencias son las siguientes:

- $56 \times 10^{26} \text{ cal/min}$ es la energía que el Sol irradia en su superficie, por su temperatura que es alrededor de $5,750 \text{ }^\circ\text{C}$.
- $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}$ es la distancia media Tierra-Sol.
- $1 \text{ Langley} = 1 \text{ cal/cm}^2$

Si esta energía es uniformemente irradiada sobre la superficie de la Tierra, la cantidad recibida por unidad de área y tiempo en la alta atmósfera es:

$$Qs = \frac{S}{4} = 0.5 \text{ ly/min}$$

La energía solar total interceptada por la tierra en unidad de tiempo es:

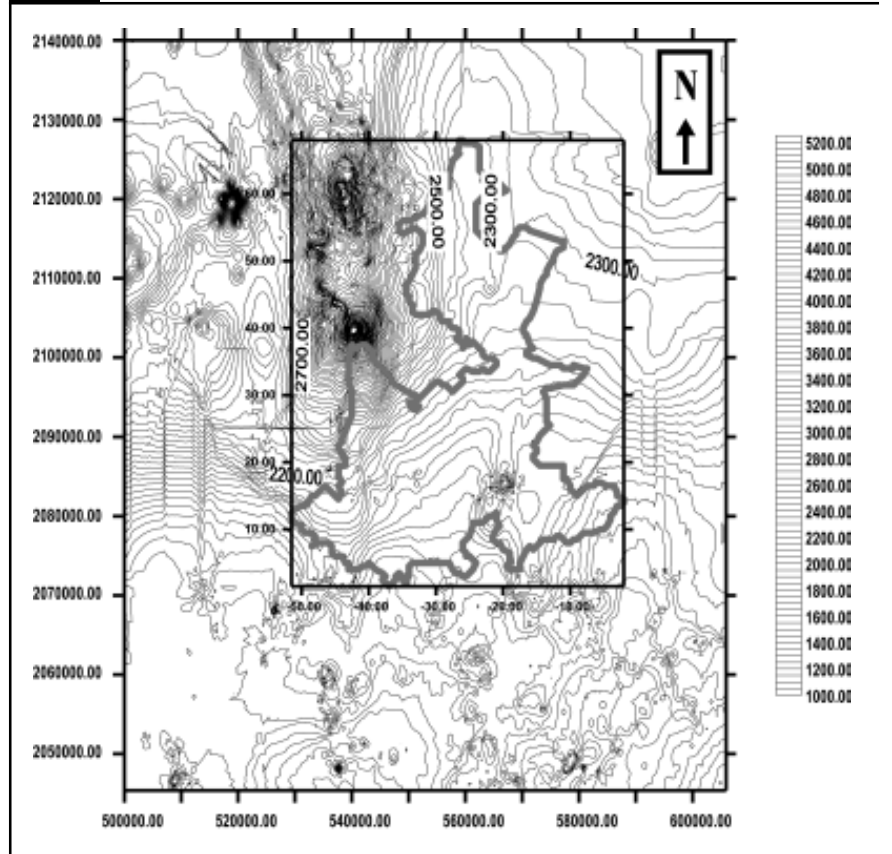
$$\begin{aligned} st &= \pi a^2 S = 2.55 \times 10^{18} \text{ cal/min} \\ &= 3.67 \times 10^{21} \text{ cal/día} \\ a &= \text{radio terrestre} = 6.37 \times 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

Si $3.67 \times 10^{21} \text{ cal/día} = k$:

- La energía liberada por un ciclón sería $\sim 1 \times 10^{-3}$ de k .
- La energía liberada por un huracán sería $\sim 1 \times 10^{-4}$ de k .
- La energía liberada por una bomba nuclear sería $\sim 1 \times 10^{-8}$ de k .
- La energía liberada por una lluvia moderada sería $\sim 1 \times 10^{-8}$ de k .

Si se considera el 100% de la radiación solar que llega a la alta atmósfera, 16% es absorbida por la atmósfera, 1% lo absorben las nubes, la Tierra absorbe 26% como radiación directa, 14% como radiación difusa y 11% como radiación dispersa, 25% es devuelta al espacio exterior por nubes y polvo, y 7% reflejada por la superficie terrestre conocida como albedo. Todas estas cantidades varían de acuerdo con el ángulo de incidencia de los rayos solares, así como de la nubosidad, estación del año, latitud, etc.

Figura 2. Distribución de la altitud en el estado de Puebla. Unidades UTM.



3. Metodología para calcular la temperatura reducida

Si se supone que se desea calcular la temperatura reducida de la estación A, cuya altura es de 2,320 m sobre el nivel del mar (recordemos que la ciudad de Puebla tiene una altitud sobre el nivel del mar de 2,162 m), y presenta una temperatura media anual de $16.4 \text{ }^\circ\text{C}$, se aplicará la siguiente fórmula:

$$T_R = (h \times gt) + t$$

donde

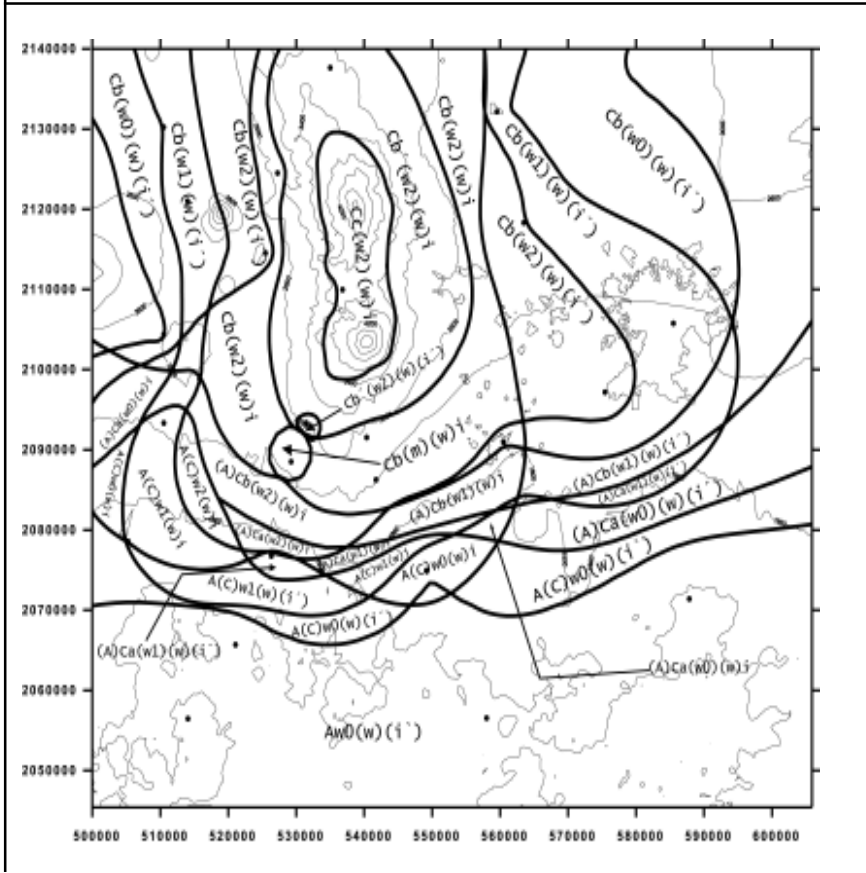
- T_R = Temperatura reducida;
- h = Altitud en m;
- gt = Gradiente térmico normal;
- t = Temperatura de la estación.

Sustituyendo valores:

$$T_R = (2320 \text{ m})(0.0065 \text{ }^\circ\text{C/m}) + 16.4 \text{ }^\circ\text{C} = 31.48 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, $31.48 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de la estación A si estuviera al nivel del mar.

Figura 3. Digitalización de los diferentes tipos de clima en el estado de Puebla. La ciudad mantiene una distribución media de los climas (A)Csemicálidos hasta Aw''0(w) (f') cálido subhúmedo, temperatura media anual de 24 °C y con poca oscilación térmica.



El valor del gradiente térmico normal no se aplica cuando se trabaja con precisión en estudios regionales, por lo que a veces es necesario calcular dicho gradiente de la manera siguiente: se supone que se tiene una estación A cuya altitud es de 1,050 m, con una temperatura de 18.5 °C, y otra estación B a una altura de 128 m y una temperatura de 23.8 °C, se desea conocer el gradiente entre las estaciones A y B.

Primero se determina la diferencia de altura entre las estaciones y la diferencia de temperaturas.

Diferencia de temperatura = 23.8 °C – 18.5 °C = 5.3 °C
 Diferencia de altura = 1,050 m – 28 m = 922 m

Esto indica que a 922 m la temperatura varía 5.3 °C, y por lo tanto en 1 m variará:

$$\frac{5.3}{922} = 5.7483 \times 10^{-3} \text{ °C/m}$$

El valor 0.0057483 °C/m es el gradiente térmico entre las estaciones A y B.

Este valor nos sirve para calcular temperaturas que se encuentren entre los puntos A y B.

Por ejemplo, nos interesa saber la temperatura del punto Z del cual sólo se conoce la altura y se encuentra localizado entre los puntos A y B. La altura del punto es de 649 m.

Se determina la diferencia de altura entre A y Z o entre B y Z; lo consideramos entre A y Z, lo que resulta: diferencia de altura entre A y Z = 1050 – 649 = 401 m. Nótese que se pasa de un lugar alto a uno bajo.

Si en un metro la temperatura varía 0.0057483 °C, en 401 m variará:

$$401 \text{ m} \times 0.0057483 \text{ °C/m} = 2.3050683 \text{ °C}$$

Este valor se suma a la temperatura del punto A debido a que se pasa a un lugar más bajo, lo que ocasiona que la temperatura sea mayor. Por lo que la temperatura calculada con el gradiente del punto Z será:

$$18.5 \text{ °C} + 2.3 \text{ °C} = 20.8 \text{ °C}$$

El gradiente térmico normal para la región de Puebla es: GTN = 0.0065 °C/m. El calentamiento del aire es medido de la superficie del suelo hacia arriba (la temperatura del aire disminuye con la altura).

- 1 ha = 10,000 m²
- 1 km² = 1,000,000 m²

La resolución por pixel en una imagen satelital High Resolution Picture Transmisión (HRPT) o Automatic Transmission Picture (ATP) es de 1.1 km², es decir 110 ha.

4. Resolución espacial de imágenes satelitales

Las imágenes utilizadas fueron tomadas del sistema digital HRPT, con resolución de 1.1 kilómetros cuadrados de pixel en el nadir (110 hectáreas), lo que nos permitió trabajar a una escala regional 1:2,000,000, aplicando las señales digitales transmitidas por los satélites estadounidenses NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Las imágenes son capaces de mostrar la absorción de la radiación visible; dos bandas del espectro, la gris (430 nm) y la gris claro (600 nm), muestran la cantidad de energía absorbida; en contraste, la banda del infrarrojo cercano (750-1100 nm) actúa justo de forma inversa. La mayor absorción del gris claro y gris, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano (en negro) es la diferencia espectral de la respuesta de todo el suelo, y será utilizado como forma de diferenciación de las superficies con y sin vegetación.

Cabe mencionar que la imagen de los satélites polares están captadas a una altura media de unos 840 km por encima de la superficie terrestre, con un ancho de la imagen de 2,700 km aproximadamente; por lo que se compararon algunas imágenes de los satélites geostacionarios de la familia GOES, que reciben imágenes con resoluciones de 1, 4 y 36 km. Las imágenes también corresponden a los canales visible e infrarrojo.

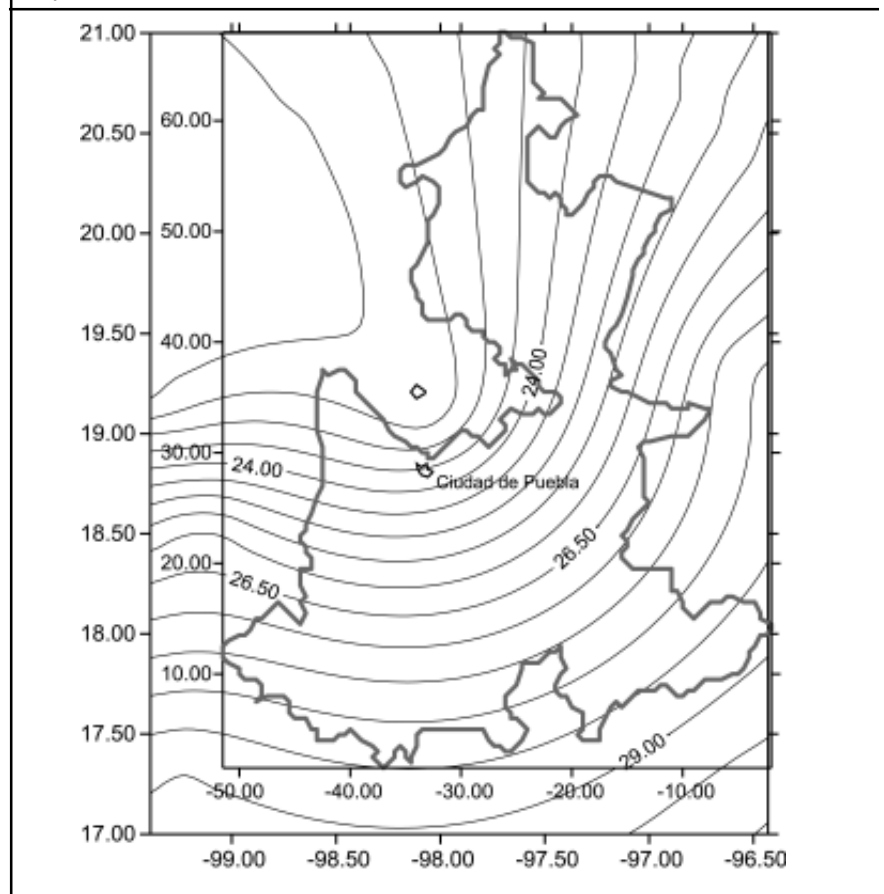
El sistema GOES se utiliza en el hemisferio occidental, desde América del Norte a Sudamérica, para vigilar sistemas meteorológicos importantes en el Pacífico, Mar Caribe, Atlántico y Golfo de México.

Las imágenes pueden procesarse en una banda en la región espectral visible (gris claro, 0.55-0.90 μm), una en la infrarroja cercana (en negro, 0.72-1.0 μm), una en la infrarroja media (3.55-3.93 μm) y una/dos en la infrarroja térmica (10.5-11.5/12.5 μm).

Una vez separados y analizados, los canales proporcionan información valiosa de diferentes fenómenos de la atmósfera o la superficie del océano y continental. Así, es posible obtener información detallada sobre la temperatura de la superficie oceánica, regiones nubosas, agrícolas o de afloramientos rocosos. Con la información se infieren resultados valiosos para conocer y planear acciones sobre el medio; de esto se desprende la importancia del manejo de imágenes satelitales aplicados en la prevención de efectos de tormentas tropicales, lluvias torrenciales u otros fenómenos importantes de consecuencias adversas.

En particular, la fotointerpretación geológica, con base en el despliegue de imágenes de satélite en perspectiva, nos

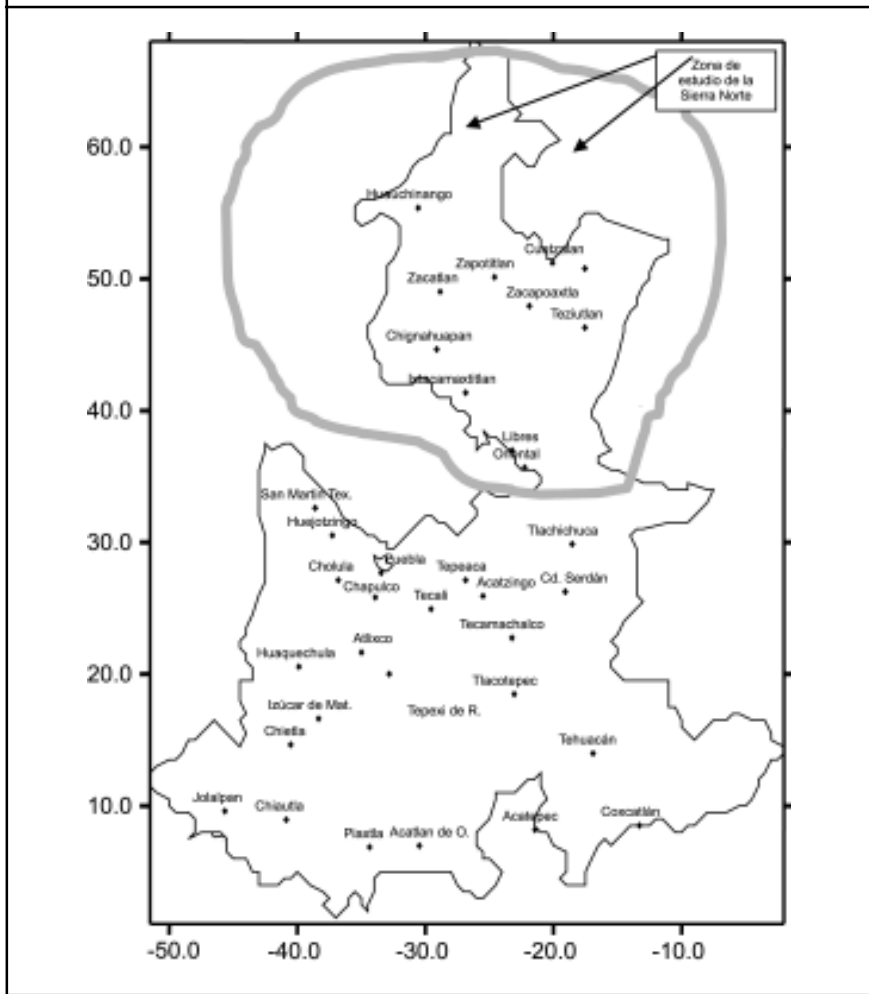
Figura 4. Digitalización de las isotermas en el estado y la capital de Puebla con un rango promedio de 25 °C en primavera.



puede ayudar a inferir las relaciones geométricas que guardan diferentes unidades litoestratigráficas, así como a discriminar la litología con ayuda de las características multispectrales de las imágenes de satélite. Las técnicas y criterios interpretativos utilizados no difieren sustancialmente de aquellos utilizados en la fotointerpretación tradicional de fotografías aéreas; método que es comúnmente aceptado y que también es considerado una técnica de percepción remota, utilizándose para estos estudios el método fotogramétrico y el método espectral.

La ventaja de las imágenes de satélite, además de su frecuencia y su economía, es que las imágenes infrarrojas deben entenderse como un mapa de temperaturas, en el que cada tono de gris indica una variable térmica, el cual está relacionado con un rango de altitudes de los toques de las nubes. El radiómetro del satélite mide los niveles de radiación, los cuales dependen de la temperatura del objeto radiante (nubes), y a estos niveles de radiación (clasificados por rangos) se les asigna un color. Observando los diferentes tonos y las formas de los contornos, es posible deducir los tipos de nubes y su extensión vertical y horizontal. En

Figura 5. En este mapa digitalizado se muestran los principales municipios del estado de Puebla y la zona de estudio que nos interesa enmarcada en gris.



este sentido, los contornos de color blanco indican nubes más altas que los contornos de color gris claro, por ejemplo. Hay que tomar en cuenta que en la atmósfera hasta la tropopausa, la temperatura disminuye con el aumento en la altura. Si se observa un contorno blanco, de forma redonda, probablemente debajo del mismo se hallen nubes que producen lluvias fuertes y tormentas eléctricas.

Las imágenes procesadas han sido calculadas a partir de un modelo estructural del SURFER (veáse figura 5). El índice de vegetación normalizado (IVN) se calcula a partir de las bandas 1 y 2 (rojo e infrarrojo reflejado) de las imágenes obtenidas por el sensor AVHRR de los satélites NOAA; el análisis de estos datos permite registrar la cubierta vegetal y el tipo de vegetación predominante en una región, por ejemplo en la observación de las zonas boscosas y su dramática reducción anual.

Con el fin de hacer óptimas las dimensiones propias de las medidas multispectrales a una sola dimensión (cober-

tura edafológica y geológica), se han definido los índices de vegetación, es decir, combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación o atmósfera.

Basándose en la diferencia de reflectancia del suelo, que nos muestra 20% en la banda visible y 60% en el infrarrojo cercano (correspondiendo la banda 2 al infrarrojo cercano y la banda 1 al visible) de la región del espectro de las imágenes, el intervalo de valores obtenidos para identificar las imágenes varía entre (-1) y (+1); de ellos, sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, suelo desnudo y rocas.

Los estudios nos llevarán a la determinación de mapas de temperatura e hidrológicos que pueden enriquecer la cartografía de zonas de nieve, extensiones de agua y humedad del suelo; información sobre recursos re-

novables, detección y seguimiento de incendios forestales, análisis de usos de suelo, efectos urbanos, aplicaciones geológicas que se originan a partir de las propiedades de absorción de las distintas litologías y permiten la elaboración de cartografías litológicas e incluso tectónicas. Otra aplicación crucial es el análisis de riesgos provocados por fenómenos naturales, al detectar cambios en las señales del infrarrojo, provenientes de cráteres volcánicos o los cambios que podrían causar terremotos, inundaciones e incendios forestales y una gran variedad de resultados aplicables a estudios climáticos.

5. Colores y clasificación de nubes en la interpretación de las imágenes satelitales

Color:

- Gris claro: Cimas de nubes con temperaturas entre -10° y -20 °C.

- Gris oscuro: Cimas de nubes con temperaturas entre -21° y -31° °C.
- Gris: Cimas de nubes con temperaturas entre -32° y -80° °C (topes sobresalientes).
- Blanco: Cimas de nubes con temperaturas entre -81° y -110° °C (topes sobresalientes).

En esta gama de tonos, las nubes más frías y más altas corresponden al color blanco y las nubes más calientes y más bajas corresponden al color gris; las zonas que aparecen en tono gris claro corresponden a nubes muy bajas, en algunos casos, niebla.

Clasificación de nubes:

- Piso inferior (nubes bajas): altitud entre los 0 y 2 km. Tipo de nubes: estratos, nimbos, estratocúmulus, nimboestratos, cumulonimbos y cúmulos.
- Piso medio (nubes medias): altitud entre los 2 y 6 km. Tipo de nubes: altostratos y altocúmulus.
- Piso superior (nubes altas): altitud arriba de los 6 km. Tipo de nubes: Cirros, cirrostratos y cirrocúmulus.
- Estratos: nieblas altas de color gris y gotas de agua cercanas al suelo.
- Nimbos: precipitación continua, color gris claro.
- Estratocúmulus: capa de color gris blanquecino.
- Nimbostratos o nimboestratos: capa de color gris obscuro.
- Cúmulus: nubes densas y blancas, indican inestabilidad del aire y enfriamiento.
- Cumulonimbos: color obscuro, y altura de hasta 15 km en su estructura.

6. Geohidrología de la zona norte del estado

La constitución geológica general de la estructura en el norte de la sierra del estado de Puebla (desde la Oriental hasta Chignahuapan) posee las siguientes características: del terciario inferior en el centro y norte de dicha zona se encuentran rocas ígneas intrusivas, suelo duro en valles y suelo blando por filtración de aguas en los límites estructurales de valles y montañas. La roca característica es la andesita, con una presencia de diversos granos de basalto. Sobre estas rocas metamórficas impermeables el agua se desliza, pero en las rocas permeables penetra, se infiltra.

Es raro que una roca sea absolutamente permeable; la descomposición superficial permite filtraciones no muy profundas y, en cambio, por las grietas y fisuras el agua gana en profundidad. Las rocas calcáreas son permeables porque presentan grietas, algunas veces microscópicas; la arena también lo es por los espacios que hay entre sus granos

impermeables; y la creta, por ser de naturaleza esponjosa, es una de las rocas más permeables. La arcilla es homogénea y constituye para el agua un obstáculo infranqueable, llamado nivel del agua.

Sobre terrenos de pendiente brusca, el agua resbala, cualquiera que sea la permeabilidad de las rocas. Se han detectado canteras al descubierto con granitos, calizas, mármol, cal, fosfatos de cal, asperón, koolin.

Para la región norte del estado las rocas efusivas se agrupan en una serie que va de las más ácidas a las más básicas, comprendiendo los siguientes tipos: riolitas, traquitas, andesitas, basaltos y limburgitas. Las ácidas por lo general son de tonos claros y poco densas, mientras que las básicas son oscuras y muy densas.

La riolita típica de derrames lávicos es una roca amarillenta, gris o verdosa, con estructura fluidal con algunos microlitos de feldespato y biotita; la andesita existente en las cadenas de plegamientos de edad terciaria está compuesta de fenocristales de plagioclasa, andesina y piroxeno y los basaltos compuestas de olivino y augita.

La constitución geohidroológica de aguas en escurrimiento diagonal es por acción gravitacional normal, lo que origina cuencas hidroológicas temporales en época de lluvias, con una filtración continua.

En la figura 6 se presenta un acercamiento del estado de Puebla y la zona de estudio señalada, con la siguiente interpretación:

En color negro y blanco las zonas hidroológicas y sus respectivas ramificaciones, además de estructuras geológicas que determinan el movimiento de las aguas.

En color gris obscuro (nubes bajas de tipo estratos, nimbos, y estratocúmulus), con una altitud entre los 0 y 2 km.

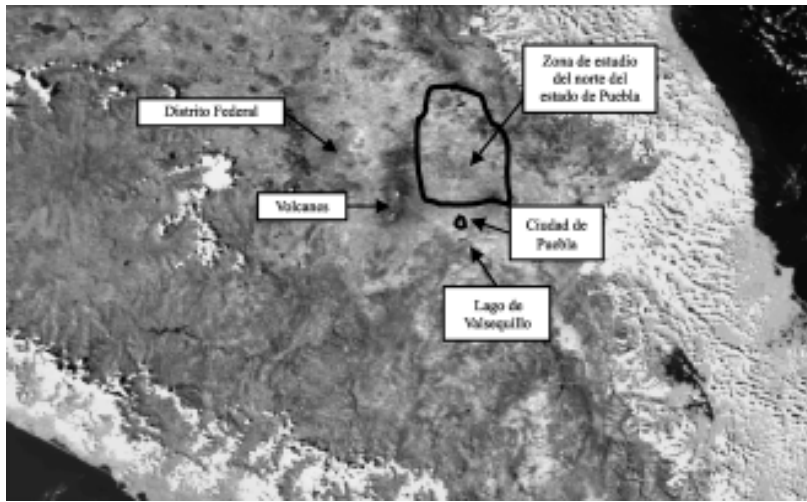
7. Vegetación

Las características vegetales en la zona norte del estado son muy diversas debido a la cantidad de humedad y calor que se presenta durante el año; se encuentran pastizales, bosques mixtos y praderías.

8. Aguas subterráneas

La mayor parte del agua subterránea procede esencialmente de la infiltración de las agua meteóricas (precipitaciones). Al encontrarse en el subsuelo, forman mantos de aguas casi inmóviles y éstos alimentan las fuentes y los pozos, o también pueden circular excavando las rocas, lo que origina que las aguas se detengan y además que se obstaculice su descenso a partes más bajas; a esta zona

Figura 6. Acercamiento del estado de Puebla y la zona de estudio señalada.



En negro y blanco las zonas hidrológicas y sus respectivas ramificaciones, además de estructuras geológicas que determinan el movimiento de las aguas. Piso inferior (nubes bajas, gris oscuro): altitud entre los 0 y 2 km. Tipo de nubes: estratos, nimbos y estratocúmulus.

donde el agua queda retenida se le llama zona vadosa o zona de aereación. Los espacios entre las partículas de esta zona se encuentran parcialmente llenos con agua y parcialmente con aire.

La zona de aereación o vadosa se subdivide en faja de humedad del suelo que se encuentra a unos cuantos decímetros desde la superficie según las lluvias recientes; parte del agua que penetra el suelo es suministrada para el crecimiento de las plantas y otra parte se evapora a la atmósfera, mientras que otra cantidad se desplaza hacia abajo.

El agua que se ha desplazado hacia abajo forma lo que se denomina faja intermedia, donde el agua puede quedar suspendida por el material poroso o permeable por encima del nivel de agua principal: en esta faja existe poco movimiento, excepto cuando hay precipitaciones.

En algunas partes no existe la faja intermedia; entonces la faja de humedad del suelo descansa sobre la tercera faja, que tiene el nombre de faja capilar o fleco capilar, donde la arena puede encontrarse muy empapada y el agua es retenida debido a la atracción molecular.

Es precisamente en la zona vadosiana donde las aguas subterráneas llevan a cabo la mayor parte de sus acciones químicas y el trabajo de disolución continua porque cada vez que el agua disuelve una partícula de roca (puesto que el descenso continúa) deja el sitio a otras aguas nuevas que también disuelven otras partículas, y así sucesivamente.

La zona que se encuentra debajo de la zona vadosa es la zona freática llamada también nivel de agua freática; el nivel freático es el nivel bajo donde el subsuelo se encuentra completamente saturado de agua y por encima del cual los

espacios vacíos en las rocas contiene aire y también agua; es una superficie de contacto donde el límite superior de esta zona no es plano sino ondulado; bajo el nivel freático se encuentra el agua subterránea y por encima se encuentra el agua colgada.

En general, el nivel freático suele seguir las irregularidades de la superficie del terreno, de esta manera el nivel freático alcanza elevaciones más altas bajo los cerros y los lomeríos y sus puntos inferiores debajo de los valles.

La capa freática se encuentra a profundidades variables a partir de la superficie: como en algunas regiones, ésta puede estar ausente o también puede alcanzar un espesor de más de cien metros por debajo del suelo.

9. Erosión provocada por las aguas subterráneas

El agua subterránea es un agente efectivo de la erosión debido a que contiene ácido carbónico (contenido en el agua de lluvia), el cual disuelve el carbonato que contiene las rocas llamadas carbonatadas, como son las calizas, dolomitas y mármoles.

Conforme desciende el agua de lluvia a la tierra, ésta penetra a través de las grietas de las rocas, la acción química y física del agua hace que las grietas se agranden, y se aíslan bloques de roca formándose una o varias cavidades alrededor de éstos y por los cuales circula el agua superficial.

En las rocas muy solubles, por ejemplo la caliza, se forman grutas de diversos tamaños y otras más pequeñas en la dolomita. El yeso y las rocas similares tienen una solución más rápida y esto provoca que las cavernas se derrumben debido al peso de las rocas superyacentes antes de que la erosión las abra a la superficie.

El agua puede originar precipitación de nuevos minerales o el crecimiento de los ya existentes debido a la saturación por la evaporación. El área que tiene gran cantidad de sumideros constituye lo que se llama la topografía kárstica. Donde abundan las cuevas y sumideros, y al desaparecer algunas de las cuevas se forma una topografía especial. En esta topografía la superficie está jalonada con una red de hendiduras y barrancos que terminan abruptamente cuando descargan el agua a través de canales subterráneos y por lo cual la superficie es accidentada.

Las rocas más solubles que la caliza, como la sal, gema y yeso, podrían ser más favorables para el desarrollo de un *karst*, pero la plasticidad de este tipo de rocas no permite el desarrollo de una red subterránea porque cierran sus cavidades.

Los terrenos de tipo arcilloso originan una circulación subterránea con formación de galerías y cavidades y esto se debe a que están fisurados por la desecación.

10. Movimiento de las aguas subterráneas

Al infiltrarse por el suelo, el agua de las precipitaciones no permanece quieta o estancada, sino tiende a moverse en direcciones distintas de acuerdo al tipo de rocas que se encuentre en su camino y también de la pendiente del nivel freático.

El agua se mueve hacia abajo debido a la fuerza de gravedad, llenando así todos los espacios vacíos disponibles del fondo hacia arriba, se mueve con rapidez al pasar por la zona vadosiana y al llegar a la capa freática se mueve con gran lentitud o su movimiento es nulo. En zonas donde las grietas son pequeñas y también entre los poros de las areniscas el movimiento del agua se reduce considerablemente por motivo de la fricción.

En las areniscas la velocidad es poca y la cantidad de agua que circula por ellas no puede compensar el agua que es extraída por los pozos y esto provoca que el nivel freático descienda.

El agua subterránea no viaja uniformemente en todos los tipos de rocas y esto se debe a la porosidad y a la permeabilidad de los materiales terrestres. La porosidad de una roca está determinada por la proporción que ocupan huecos o intersticios en su volumen total, esto es el porcentaje de una roca o suelo que representa los espacios vacíos o abiertos.

Cuanto más porosa es una roca, la cantidad de espacios abiertos que contiene es más grande, y por medio de estos espacios el agua subterránea debe circular. La variación de la porosidad en las rocas puede variar desde una fracción de 1% para las rocas ígneas que se encuentran frescas, hasta un 90% para el lodo recientemente asentado. Las rocas porosas absorben gran cantidad del agua superficial que logra infiltrarse.

La permeabilidad de una roca es la capacidad que tiene ésta para dejar pasar el agua bajo presión; una roca debe ser porosa para ser permeable, esto es si las rocas son permeables permitirán que el agua subterránea circule con facilidad o libremente a través de estas, y por lo tanto el movimiento subterráneo es más facilitado.

La velocidad con que una roca transmite agua depende de su porosidad total y también del tamaño de las conexiones entre sus aberturas.

Las rocas que son porosas y permeables y permiten el flujo libre del agua subterránea son las que forman la capa freática, mientras que las rocas que no permiten la infiltración del agua se dice que son impermeables o estancas.

El movimiento del agua hacia la zona de saturación se le llama circulación poco profunda o vadosa. En la zona de saturación el agua no se encuentra estacionaria y tiende a alejarse despacio por las líneas de menor resistencia a través de las rocas, pero si hay una salida inferior a lo largo del fondo de un valle, lago u otro depósito, el agua circulará por ahí aunque su ruta sea muy accidentada antes de salir otra vez a la superficie.

Debajo de la zona de saturación, la profundidad a la que el agua superficial penetra depende del carácter de las rocas. En algunas rocas, las aguas superficiales alcanzan profundidades de varios miles de metros, mientras en otras las profundidades sólo llegan a unos pocos centenares, obteniéndose poca agua.

De la misma forma que el agua de la superficie necesita una pendiente para moverse, el agua subterránea debe tener también una pendiente para su desplazamiento; esta pendiente del nivel freático se conoce como gradiente hidráulico.

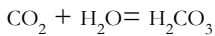
El movimiento de un líquido puede ser laminar o turbulento. En el movimiento laminar, el escurrimiento es ordenado y uniforme, en cambio en el movimiento turbulento se forman remolinos y movimientos irregulares. El agua subterránea tiene movimiento laminar y esto se verifica a velocidades reducidas; al escurrimiento laminar del agua subterránea a través de las rocas se le llama percolación.

Las aguas que se precipitan al introducirse en el subsuelo entran en contacto con las rocas a lo largo de su recorrido, principalmente con sus minerales, de esta forma incorporan y a su vez transportan los materiales que posteriormente modifican el subsuelo.

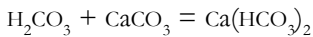
Toda agua subterránea contiene siempre una cantidad de material mineral en solución como el hierro y el sílice; estos compuestos se incorporan al agua cuando pasa a través del suelo y desciende hacia la zona de saturación. El agua adquiere también del suelo el bicarbonato de calcio y también al pasar por cualquier caliza.

La materia mineral disuelta son: los bicarbonatos y sulfatos de calcio, magnesio y sodio, y en menor cantidad los cloruros, silicatos y fosfatos y otros compuestos. Algunos de estos materiales entran en solución debido a la acción del dióxido de carbono que proviene de la atmósfera debido a la lluvia.

Las aguas que más abundan son las aguas carbónicas, que contienen ácido carbónico y carbonatos y éstas se encuentran tanto en manantiales como en aguas subterráneas. Para que las aguas carbónicas puedan disolver el carbonato cálcico (CaCO_3), deben contener anhídrido carbónico (CO_2), que se encuentra disuelto en ellas procedentes de la atmósfera y al reaccionar con el agua se forma el ácido carbónico:



Este ácido al reaccionar con el carbonato cálcico forma el bicarbonato soluble:



La acción disolvente de las aguas subterráneas provoca el aumento de la porosidad de las rocas, las superficies de las rocas se tornan más irregulares, también se forman los estilolitos, las grietas y diaclasas se ensanchan, se forman torcas y cavidades de hundimiento y se originan ríos perdidos, cavernas, puentes naturales y las llamadas topografías kársticas.

Conforme las aguas subterráneas incorporan y transportan los materiales de las rocas sus poros se hacen mayores hasta que nuevas depositaciones o derrumbes los vuelvan a llenar. Por la disolución las rocas se vuelven bastante porosas y el aumento de esta porosidad provoca su derrumbamiento.

La acción disolvente de las aguas subterráneas en conexión con la presión a la que se hallan sujetas las rocas provoca la formación de los estilolitos, los cuales son columnas, pirámides o conos tallados verticalmente en las calizas, dolomitas y raramente en otras especies petrográficas.

El deslizamiento del agua subterránea a través de las paredes de las diaclasas o fisuras provoca la disolución de los minerales que contienen éstas y los arrastra; de esta forma las grietas son ensanchadas y así pueden llegar a convertirse en huecos de suficiente amplitud por donde el agua puede moverse libremente.

Los materiales insolubles pueden acumularse en el cauce de la corriente subterránea y los de las partes altas pueden ser arrastrados por las aguas, continuando la circulación del agua y su acción disolvente principalmente a lo largo de las paredes de las rocas.

Los resultados y efectos más frecuentes de la acción mecánica que las aguas subterráneas realizan en la superficie son los corrimientos o deslizamientos de tierras y también los resbaladeros de rocas.

Si la velocidad de la disolución es más rápida que la depositación de los materiales insolubles, la oquedad se ensancha rápidamente y esto provoca una depresión superficial también llamada torca o agujero de hundimiento, y generalmente se forman sobre sistemas de cavernas en las cuales las aguas que descienden se depositan (véase figura 6).

Al entrar en contacto con el seno de rocas solubles –tales como yeso, cal, calcita y dolomitas– se forman las grandes cavernas, que son más frecuentes

en los terrenos horizontales, pero también se pueden formar sobre rocas inclinadas.

Los cementantes comunes de las rocas sedimentarias de grano fino y grueso como son calcáreo, silíceo o de óxidos de hierro, se componen generalmente de las aguas que percolan bajo la superficie y que precipitan los minerales.

11. Acción mecánica de las aguas subterráneas

La mayor parte del trabajo que llevan a cabo las aguas subterráneas es de carácter químico, como lo es la incorporación y deposición de material mineral, así como la erosión que realiza a través de su recorrido debajo de la superficie.

Los resultados y efectos más frecuentes de la acción mecánica que las aguas subterráneas realizan en la superficie son los corrimientos o deslizamientos de tierras y también los resbaladeros de rocas. Esta acción se realiza debido al movimiento del agua, por lo que sólo es posible cuando las corrientes subterráneas adquieren el volumen suficiente para moverse con gran rapidez y al mismo tiempo transportar partículas de rocas. Existe un factor que contribuye notablemente y de forma importante a los deslizamientos de tierras y resbaladeros de rocas, el cual es el factor de lubricidad que adquieren las arcillas y pizarras cuando se humedecen.

Para prevenir estos efectos, los satélites informan sobre la posibilidad de lluvias importantes en una región, de manera que con la combinación de la geología y lluvias, se puede advertir sobre riesgos a la población de regiones montañosas y la probabilidad de deslizamientos de las laderas de la montaña.

Si dichas superficies se encuentran situadas bajo una capa de roca de tipo poroso y también saturada donde éstas se convierten en planos ideales para el deslizamiento, a lo largo de los cuales las rocas pueden deslizarse hacia abajo, los bloques de arena descienden por las pendientes y grandes

masas de roca también se desprenden de las laderas de los montes y colonias.

Los resbaladeros constan de grandes acumulaciones de rocas destrozadas que pueden descender lentamente hacia los valles alcanzando de vez en cuando varios kilómetros de longitud. Este mismo procedimiento sucede en los montes donde de igual forma enormes cantidades de piedras se deslizan a través de las laderas dando lugar a otros resbaladeros.

El agua subterránea emerge de forma natural en los manantiales o filtraciones; en los manantiales el agua emerge desde un punto y en las filtraciones emerge de forma esparcida. El manto freático se forma cuando el agua subterránea se mueve libremente hacia abajo desde la superficie terrestre, hasta que logra alcanzar una capa de roca impermeable o hasta que llega al nivel freático donde comienza a moverse lateralmente para luego fluir; surgen a lo largo de las laderas o valles y se forman cuando arena, grava, arenisca u otros estratos porosos reposan sobre capas impermeables.

En las regiones húmedas, la mayor parte de las corrientes permanentes reciben una cantidad, por lo menos de su caudal, de los depósitos de agua subterránea. Las corrientes que escurren todo el año llegan a erosionar sus causes hasta que adquieren suficiente profundidad para intersectar el manto freático. Muchas de las excavaciones para carreteras dan lugar a este tipo de manantiales o filtraciones.

Cuando una capa impermeable se encuentra bajo una capa o estrato que tiene una mayor permeabilidad, el agua subterránea tiende a moverse hacia abajo siguiendo la pendiente que tenga esta superficie que se le llama de contacto: si esta superficie de contacto queda expuesta a la intemperie debido a la erosión o excavación se llegan a formar los manantiales o filtraciones de contacto.

La mayoría de los mantos tienen un gasto variable de acuerdo a las épocas, desde los flujos intermitentes, los cuales desaparecen cuando el nivel freático se abate durante la época de sequía, pasando por los que tienen un escurrimiento muy pequeño, hasta los que pueden producir millones de litros por día. El agotamiento de los mantos ocasiona graves incidentes a la agricultura y el urbanismo, provoca el asentamiento del suelo desequilibrando las construcciones.

La magnitud del descenso del nivel freático se relaciona con la permeabilidad y con la velocidad de extracción; los cambios del clima pueden causar grandes problemas en los recursos hídricos de muchas zonas, principalmente en las

regiones áridas y semiáridas, y también en las zonas húmedas, en las cuales se ha provocado la escasez de agua. Al elevarse el manto freático, también aumenta el gradiente hidráulico y esto provoca que la filtración en las partes permeables de alrededor crezca.

12. Geología de la zona norte del estado de Puebla

El modelo geológico de la zona norte corresponde a una fosa tectónica de orientación NE-SW (noreste-suroeste) durante el Cenozoico, con ampliación en el extremo noreste; la fosa está constituido por varios metros de sedimentos aluviales y volcanoclásticos.

El modelo geológico regional indica que dicha zona tiene comunicación hidráulica entre sí a través de fracturas en las unidades consolidadas, así como por el material aluvial que subyace al relieve volcánico cuaternario. Considerando esto y la posición topográfica más alta del lugar, se considera que ésta es parte del área de recarga de las redes hidrológicas.

La superficie presenta una deforestación que ha propiciado directamente el incremento del escurrimiento superficial y consecuentemente ha disminuido la infiltración; existen intensos problemas de erosión de suelos, produciendo con ello una gran cantidad de sedimentos que han azolvado prácticamente a la zona.

El modelo geológico regional indica que dicha zona tiene comunicación hidráulica entre sí a través de fracturas en las unidades consolidadas, así como por el material aluvial que subyace al relieve volcánico cuaternario.

Las diversas actividades humanas se manifiestan en una degradación ambiental importante y evidente, conduciendo a cambios climáticos locales observables en los contenidos de humedad del suelo.

La zona de estudio tiene 575 km² de superficie, de los cuales 80 km² corresponden a planicie, el resto se distribuye entre relieves de lomeríos y zona montañosa.

Los modelos geológicos están apoyados en estudios geofísicos de campo (resistividad, gravimetría y magnetometría), y con base en esta información se definieron secciones geológicas para determinar el control hidrológico o efectos por la configuración del basamento y la topografía.

13. Geología estructural de la zona

Por medio de la imagen de satélite se identificaron rocas volcánicas en la parte oriental del Cinturón Volcánico Mexi-

cano, volcanismo básico en la parte oriental de Teziutlan y rocas volcánicas en el noreste de Libres.

El relieve está dispuesto en forma elíptica y en su interior encierra una planicie. En el sector norte se forma un relieve sin erosión, en el lado este, el relieve constituido por material piroclástico forma una meseta que se extiende de SE (sureste) a NW (noroeste), hacia el sur, la coexistencia de relieves terciarios y cuaternarios define más diversidad de relieve (valles aluviales, conos volcánicos y mesetas), sobresaliendo la esquina sureste donde se tiene la mayor elevación de unos 1,300 msnm (metros sobre el nivel del mar) en el relieve y paredes volcánicas de la Sierra.

Existen paredes y bloques semitabulares que forman mesetas, este relieve está orientado en una dirección NW-SE, hacia el occidente, el relieve del norte y del sur se aproximan uno a otro y forman el límite occidental de la zona de estudio, existiendo un estrecho valle y determinando así una cuenca cerrada.

En el periodo Cuaternario, al noreste de la zona de estudio afloran lavas andesíticas basálticas de color gris oscuro (ácida) y subyacen a rocas basálticas cuaternarias, la andesita tiene una matriz microlítica que presenta minerales de andesina y fenocristales pequeños de olivino.

Los sedimentos contienen horizontes de arena volcánica y toba lítica interstratificados, con depósitos fluviales y con una inclinación de unos 12° al SE; las capas de tobas y arenas miden algunos metros de grosor y hay entre ellas horizontes de arcilla.

La zona de Chignahuapan consta de piroclastos verticales de diferente granulometría; está integrado por una ignimbrita que intemperiza a colores claros y oscuros, tiene textura vitro-fluidal con abundancia de esferulitas y obsidiana, siendo capas de lapilli, pómez y ceniza fina de aspecto arcilloso.

La cantidad y distribución de las estructuras geológicas, responden a un sistema de fracturas y fallas de orientación predominante NE-SW y E-W, que ha sido relacionado a eventos tectónicos propios del cuaternario; todas las rocas volcánicas en esta zona presentan fracturamiento.

Las estructuras geológicas visibles en las imágenes NOAA-12, NOAA-15 y fotografía aérea, muestran una distribución de las rocas cretácicas y jurásicas cercanas a la zona de estudio, permitiendo relacionar la planicie de Chignahuapan con una depresión tectónica definida por lineamientos NE-SW y NW-SE.

Esta depresión está limitada al norte por un lineamiento asociado a los pliegues de la Sierra Madre Oriental y a fallas inversas paralelas a los pliegues NW de la zona.

Los datos obtenidos y los ya existentes en las mediciones de gravimetría y magnetometría permitieron conocer la pla-

nicie, la estructura geológica y la profundidad del basamento. En la interpretación de los datos gravimétricos se emplearon algoritmos para modelar en dos y tres dimensiones y considerar los efectos de la topografía.

Conclusiones

Este trabajo muestra los resultados obtenidos de las imágenes AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y ATP de la Estación Terrena de Satélites de la Secretaría de Gobernación del estado de Puebla, en colaboración con la Universidad Tecnológica de Puebla; los estudios se enfocaron al análisis, identificación e información de los aspectos relacionados a las ciencias de la tierra (geológicos, ecológicos y edafológicos, entre otros) y atmosféricas (seguimiento de fenómenos meteorológicos) en la zona de estudio.

Se obtuvo información de los diversos satélites localizados en el espacio, se procesaron las imágenes en los canales 1 al 5; el canal 1 con rango visible y los canales 2 al 5, infrarrojos (térmico).

Los estudios realizados en la zona norte del estado de Puebla nos han permitido identificar zonas de mantos freáticos y estructuras geológicas de mediana altitud, que muestran una filtración y acumulación de aguas que en época de lluvias es muy importante.

Se determinó, además, que su configuración geológica básica ocurrió durante el Cenozoico; el periodo Cuaternario se caracterizó por un intenso protagonismo tectónico y sísmico. Las zonas de mayor actividad volcánica se sitúan al sur de la gran falla transversal que sigue la línea del paralelo 19, que junto con la geohidrología determinada nos muestra una zona altamente potencial en aguas subterráneas.

Bibliografía

- Campbell, R. (1996). *Introduction to Remote Sensing*. Academic Press, USA. pp. 20-59.
- Galilei, A. (2001). *A Modern Spectra of Microwave Spectroscopy*. Esa/Esrin, USA.
- Godman, P. (1998). *Principles of Geographical Information Systems For Land Resources*. Springer, USA.
- Lennon, R. (2002). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Esa/Esrin, USA.
- Lira, J. (1987). *La percepción remota: Nuestros ojos desde el espacio*. Conacyt, México.