



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFISICA

**Utilización de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica
como Herramientas de Apoyo para obtener la Vulnerabilidad del Acuífero de
Calvillo, Aguascalientes**

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(CON ORIENTACIÓN EN PERCEPCIÓN REMOTA)

PRESENTA:

HÉCTOR MANUEL MÉNDEZ MONTEALVO

TUTOR:

DRA. JUDITH GUADALUPE RAMOS HERNÁNDEZ
Instituto de Ingeniería, UNAM

MÉXICO, D. F. Febrero 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Quiero expresar mis agradecimientos a:

A DIOS.

A mi Padre José Cirilo Méndez Gómez y mi madre María del Carmen Montealvo de Hernández (q.d.e.p), por sus apoyos durante todas las etapas de mi formación en la vida.

A mis hermanos y hermanas.

José de Jesús, Luis Enrique, Salvador, María Guadalupe y María Angélica Méndez Montealvo. Por su apoyo así como su comprensión.

Instituto Nacional Estadística y Geografía. INEGI y a la coordinación Estatal Jalisco.

Universidad Autónoma Nacional de México (UNAM) y al Instituto de Geofísica.

A la Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández por su asesoría para este trabajo.

A los Drs. José Alfredo Ramos Leal Campos, José Ramón Torres Hernández, M. C. Leticia Padilla e Ing. Rogelio Mondragón Bonilla por sus valiosos comentarios sobre este trabajo y su apoyo durante mi trayectoria profesional y académica.

A mis compañeros y amigos (as) de la maestría, en especial a M. C. Noemí López González, M. C. Jorge Cerino Rodríguez, Ing. Lorena Santiago Reyes y Lic. Cecilia González Yáñez. Por su apoyo y amistad durante mis estudios en la maestría.

A Gabriela Anguiano Rodríguez por su gran amistad.

Así como a todos los profesores de la maestría Ciencias de la Tierra que nos compartieron sus conocimientos.

RESUMEN

Dada la importancia que tienen los recursos hídricos para el estado de Aguascalientes y, en especial, la zona de Calvillo debido a que depende totalmente de la explotación de los mantos acuíferos para su abastecimiento. Este trabajo contempla, un análisis para conocer la vulnerabilidad del acuífero de Calvillo empleando los métodos de GODS y SINTACTS y aplicando técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG).

La obtención de la vulnerabilidad se sustentó en: modelos digitales de elevación (MDE), información vectorial de geología, edafología, hidrología de subterránea y superficial de la serie II del Instituto Nacional Estadística y Geografía (INEGI), imagen del satélite Landsat ETM+, a la cual se le aplicó la corrección atmosférica por método de Chavez para reducir los efectos de la dispersión atmosférica, y datos recolectados en el recorrido de campo.

En este trabajo se caracterizó la zona de estudio a fin de separar tipos de vegetación, suelo y, en particular, indicadores de la presencia de lineamientos. Se contó con firmas espectrales (USGS), logrando una mejor separación en función de las bandas disponibles. Posteriormente, se emplearon los procesos de clasificación no supervisada y supervisada, y, por último, la aplicación del método de análisis de componentes principales (PCA) que junto con la imagen pancromática de Landsat se realizaron los elementos que ayudaron a localizar los lineamientos. Así, se identificaron dos direcciones preferenciales: N22 - 45°E y N22 - 45°O, y con esta información se ubicaron las zonas de mayor permeabilidad

El método GODS se emplea actualmente en el Instituto Nacional Estadística y Geografía (INEGI) en la cartografía de hidrología subterránea. El método SINTACS se usó para tener un punto de comparación, debido a que involucra un mayor número de variables. El análisis de las variables en SINTACTS llevó a considerar con especial atención dos de ellas: la recarga neta (In) y la conductividad hidráulica (C), donde la recarga por retorno de riego y la densidad de lineamientos, fueron claves para establecer la disponibilidad de agua en la zona y el grado de riesgo a la contaminación.

Finalmente, con la información obtenida de la densidad de lineamientos y las lecturas de los niveles estáticos se delimitaron las zonas de recarga, las cuales se encuentran al norte y flancos del valle de Calvillo, en particular, a las zonas agrícolas. Asimismo, se identificó que pese a existir alta densidad de lineamientos y estructuras geológicas, la mayoría de los pozos tienen una profundidad somera. La comparación de los métodos de vulnerabilidad muestra que el empleo de métodos con bajo requerimientos de datos como el GOD, con tres parámetros, lo hace versátil y práctico en áreas extensas pero no tan preciso como el método SINTACS donde se tiene mayor variabilidad en los grados de vulnerabilidad. Todo ello permite contar con datos más cercanos a la realidad, precisos y actualizados para tomar las acciones necesarias en la protección de los mantos acuíferos y zonas de recarga.

| INDICE | Pág. |
|--|-------------|
| Resumen | |
| INTRODUCCIÓN | i |
| Estudios previos | iii |
| Objetivo general | v |
| Objetivos particulares | v |
| Hipótesis | v |
| CAPÍTULO 1. VULNERABILIDAD | 1 |
| 1.1 <i>Vulnerabilidad</i> | 1 |
| 1.2 <i>Método GOD</i> | 7 |
| 1.3 <i>Método SINTACS</i> | 12 |
| 1.3.1 <i>Profundidad del nivel estático (S)</i> | 13 |
| 1.3.2 <i>Recarga neta o infiltración (In)</i> | 13 |
| 1.3.3 <i>Efecto de atenuación de la zona no saturada (N)</i> | 16 |
| 1.3.4 <i>Atenuación por tipo de suelo (T)</i> | 17 |
| 1.3.5 <i>Características hidrogeológicas del acuífero (A)</i> | 18 |
| 1.3.6 <i>Conductividad hidráulica del acuífero (C)</i> | 18 |
| 1.3.7 <i>Pendiente topográfica (S)</i> | 20 |
| 1.3.8 <i>Normalización de la vulnerabilidad</i> | 20 |
| CAPÍTULO 2. PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA | 22 |
| 2.1 <i>Percepción Remota</i> | 22 |
| 2.1.1 <i>Energía electromagnética</i> | 22 |
| 2.1.2 <i>Espectro electromagnético</i> | 27 |
| 2.1.3 <i>Adquisición de datos usando percepción remota</i> | 28 |
| 2.1.3.1 <i>Fuente de energía</i> | 29 |
| 2.1.3.2 <i>Transmisión de la energía en la atmósfera</i> | 30 |
| 2.1.3.3 <i>Interacción de la energía en la atmósfera</i> | 32 |
| 2.1.3.4 <i>Sensores</i> | 35 |
| 2.1.3.5 <i>Formato de las imágenes</i> | 39 |
| 2.2 <i>Sistema de Información Geográfica (SIG)</i> | 40 |
| 2.2.1 <i>Generación de las bases de datos</i> | 42 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2 Estableciendo una posición | 43 |
| 2.3 Aplicaciones de PR y SIG en Geología | 47 |
| 2.4 Pre-procesamiento de imágenes | 48 |
| 2.4.1 Corrección atmosférica | 48 |
| 2.4.2 Corrección geométrica | 49 |
| 2.4.3 Corrección radiométrica | 50 |
| 2.4.4 Componentes principales (ACP) | 51 |
| 2.4.5 Clasificación supervisada | 52 |
| CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | 54 |
| 3.1 Fisiografía | 54 |
| 3.2 Clima | 55 |
| 3.3 Vegetación | 55 |
| 3.4 Geología | 56 |
| 3.4.1 Geología Estructural | 59 |
| 3.4.2 Geología de subsuelo | 61 |
| 3.5 Hidrología superficial | 61 |
| 3.6 Hidrología subterránea | 62 |
| 3.6.1 Unidades Hidrogeológicas | 63 |
| CAPÍTULO 4. DATOS Y MÉTODOS | 64 |
| 4.1 Datos disponibles | 64 |
| 4.1.1 Imagen de satélite | 64 |
| 4.1.2 Firmas espectrales de minerales y rocas | 65 |
| 4.1.3 Hidrogeología | 67 |
| 4.1.4 Topografía- DEM | 69 |
| 4.2 Metodología | 70 |
| 4.2.1 Mediciones de campo | 72 |
| 4.2.2 Procesamiento de la imagen de satélite | 72 |
| 4.2.3 Métodos de vulnerabilidad | 74 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS | 76 |
| 5.1 Procesamiento de la imagen de satélite | 76 |
| 5.1.1 Correcciones de la imagen | 76 |
| 5.1.2 Clasificación no supervisada | 78 |

| | |
|--|-----|
| <i>5.1.3 Clasificación supervisada</i> | 79 |
| <i>5.1.4 Componentes Principales</i> | 83 |
| <i>5.2 Estructuras Geológicas</i> | 85 |
| <i>5.3 Hidrogeología</i> | 87 |
| <i>5.4 Aplicación de los métodos de vulnerabilidad</i> | 93 |
| <i>5.4.1 Método GOD</i> | 93 |
| <i>5.4.2 Método SINTACS</i> | 100 |
| <i>5.4.3 Comparación de los métodos SINTACS y GOD</i> | 111 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES | 113 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 117 |
| ANEXOS | 127 |

FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura I.1. Municipios que forman parte del estado de Aguascalientes | ii |
| Figura 1.1. Ciclo hidrológico incluyendo el movimiento del agua subterránea | 2 |
| Figura 1.2. Mapa de vulnerabilidad creado a partir del método GOD | 8 |
| Figura 1.3. Esquema para la aplicación del método GOD | 11 |
| Figura 1.4. Esquema en detalle para el parámetro O estableciendo el 1 tipo predominante de suelo y su correspondencia con el 2 índice de vulnerabilidad obtenido por el método GOD | 12 |
| Figura 1.5. Profundidad del nivel freático | 13 |
| Figura 1.6. a) Coeficiente de Infiltración Potencial y b) Infiltración, mm año^{-1} | 15 |
| Figura 1.7. Capacidad de atenuación de la zona no saturada | 16 |
| Figura 1.8. Efectos de migración de los suelos | 17 |
| Figura 1.9. Características hidrogeológicas del acuífero | 18 |
| Figura 1.10. Conductividad hidráulica. | 19 |
| Figura 1.11. Pendiente | 20 |
| Figura 1.12. Grados de vulnerabilidad porcentualizados para el índice SINCTACS | 21 |
| Figura 2.1. Campos eléctrico y magnético | 23 |
| Figura 2.2. Curvas de radiación de un cuerpo negro basada en la Ley de Stefan -Boltzmann | 25 |
| Figura 2.3. Curva de emitancia solar | 27 |
| Figura 2.4. Espectro electromagnético | 28 |
| Figura 2.5. A y D= son las fuentes de emisión, B= es la trayectoria de la energía emitida, C= los objetos que recibe la energía, E= satélites envían la información a las estaciones receptoras, F= almacenamiento y procesamiento de la información G= imagen salida | 29 |
| Figura 2.6. Interacción de la energía electromagnética entre la atmósfera y la superficie | 31 |
| Figura 2.7. Procesos que tienen lugar cuando la energía electromagnética interactúa con la superficie terrestre | 33 |
| Figura 2.8. Campo instantáneo a la vista (CIV) | 36 |
| Figura 2.9. Componentes del Sistema de Información Geográfica | 41 |
| Figura 2.10. Geoide y elipsoide para una región específica | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.11. Formación de la cuadrícula terrestre | 45 |
| Figura 2.12. Proyección UTM. | 46 |
| Figura 3.1. Ubicación del Valle de Calvillo. | 54 |
| Figura 3.2. Provincias fisiográficas de Aguascalientes | 55 |
| Figura 3.3. Mapa Geológico, 1:250,000 | 57 |
| Figura 3.4. Carta geológica | 59 |
| Figura 3.5. Rasgos estructurales y sistemas de fallamiento en el Bajío Norte. | 60 |
| Figura 3.6. Cuencas hidrográficas y principales río que forman el Acuífero de Calvillo | 61 |
| Figura 3.7. Acuíferos presentes en el estado de Aguascalientes. | 62 |
| Figura 3.8. Mapa de profundidades de nivel estático. | 63 |
| Figura 4.1. a) Imagen Landsat TM correspondiente al DOY27_2002 y b) Valle de Calvillo La imagen DOY27 contó con el archivo de metadatos | 65 |
| Figura 4.2. a) Cuarzo, b) Albita, y c) Sandino, son minerales de clase silicatos y subclase tectosilicatos, d) Riolita y e) Toba son rocas ígneas de subclase félsica | 66 |
| Figura 4.3. Pozos censados por la CONAGUA con registros de cortes Litológicos | 68 |
| Figura 4.4. Sección transversal A-A' del registro litológico de la parte Norte del acuífero libre | 68 |
| Figura 4.5. Sección transversal B-B' del registro litológico de la parte central del acuífero libre | 69 |
| Figura 4.6. Sección transversal C-C' del registro litológico de la parte central del acuífero libre | 69 |
| Figura 4.7. Modelo Digital de Elevación Digital para el valle de Calvillo | 70 |
| Figura 4.8. Esquema de los pasos seguidos para obtener el mapa de vulnerabilidad | 71 |
| Figura 4.9. Proceso seguido con la imagen de satélite para obtener el mapa de lineamientos | 73 |
| Figura 5.1. Histogramas de las bandas originales y corregidas de la imagen DOY27_2002 valores máximo, mínimo, promedio y la desviación estándar | 77 |
| Figura 5.2. Mapa obtenido al aplicar la clasificación no supervisada a la imagen DOY27 | 78 |
| Figura 5.3. Mapa obtenido al aplicar la clasificación supervisada a la imagen DOY27 | 80 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.4. Diagrama de las firmas espectrales de la clasificación supervisada | 81 |
| Figura 5.5. Mapa de lineamientos obtenidos aplicando filtro High Pass (3X3) | 85 |
| Figura 5.6. Imagen pancromática con estructuras en el VC | 86 |
| Figura 5.7. Rosa de los Vientos mostrando las direcciones preferenciales de los lineamientos | 87 |
| Figura 5.8. Curvas de igual elevación del nivel estático en el acuífero libre de medio fracturado | 90 |
| Figura 5.9. Curvas de igual elevación del nivel estático (acuífero libre del medio granular) | 91 |
| Figura 5.10. Geología el VC con las secciones hidrogeológicas | 92 |
| Figura 5.11. Valores ponderados para el parámetro G. | 94 |
| Figura 5.12. Valores ponderados para el parámetro O | 95 |
| Figura 5.13. Valores ponderados para el parámetro D | 96 |
| Figura 5.14. Textura de Suelos para los Valores ponderados para el parámetro S | 97 |
| Figura 5.15. Vulnerabilidad del acuífero de Calvillo obtenida mediante el método GOD | 99 |
| Figura 5.16. Distribución de los pesos | 100 |
| Figura 5.17. Distribución del índice de profundidad del nivel estático (S) para el valle de Calvillo. | 102 |
| Figura 5.18.) Distribución de las áreas agrícolas y b) Distribución del índice de recarga (In) para el valle de Calvillo. | 103 |
| Figura 5.19. Distribución del índice de atenuación de la zona no saturada (N) para el valle de Calvillo | 104 |
| Figura 5.20. a) Tipos de suelos, b) Distribución del índice de tipo de suelo (T) para el valle de Calvillo. | 105 |
| Figura 5.21. Distribución del índice de tipo de acuífero (A) para el valle de Calvillo. | 106 |
| Figura 5.22. a) Distribución de densidad de lineamientos normalizado b) Distribución del resultado del índice de conductividad hidráulica (C) para el valle de Calvillo | 107 |
| Figura 5.23. Distribución del índice de pendiente topográfica (S) para el valle de Calvillo. | 108 |
| Figura 5.24. Índice SINTACS para establecer la vulnerabilidad del acuífero. | 109 |
| Figura 5.25. Mapa de vulnerabilidad una vez normalizado el índice SINTACS | 111 |

TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1. Valores puntuales de los parámetros de vulnerabilidad del método GOD | 8 |
| Tabla 1.2. Confinamiento hidráulico del agua subterránea | 10 |
| Tabla 1.3. Granulometría y litología sobreyacente | 10 |
| Tabla 1.4. Profundidad del agua subterránea | 10 |
| Tabla 2.1. Categorías de sensores observando la superficie terrestre portados en satélites | 38 |
| Tabla 4.1. Características de Imágenes Satélite Landsat TM | 64 |
| Tabla 5.1. Valores de máximos y mínimos de las bandas originales y corregidas para la dispersión atmosférica de la imagen DOY27 | 76 |
| Tabla 5.2. Matriz de error mostrando los errores por omisión y comisión | 82 |
| Tabla 5.3. Matriz de correlación entre bandas | 83 |
| Tabla 5.4. Autovalores y autovectores de la matriz de correlación | 84 |
| Tabla 5.5. Correlaciones entre componentes y bandas | 84 |
| Tabla 5.6. Aprovechamientos visitados para toma de niveles piezométricos | 88 |
| Tabla 5.7. Aplicación de los valores ponderados para obtener la vulnerabilidad mediante el método GODS | 98 |
| Tabla 5.8. Pesos asignados a cada parámetro en función del tipo de acuífero presente | 101 |
| Tabla 5.9. Comparación entre los métodos de vulnerabilidad empleados para la parte sur del VC | 112 |



Of. No. PCT/ELFM/527/11

Asunto: Aprobación de tema, asesor de tesis
y cambio de jurado para examen de grado.

HÉCTOR MANUEL MÉNDEZ MONTALVO

Estudiante de Maestría
Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 24 de mayo del año en curso, aprobó el tema de tesis titulado "Utilización de los Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica como herramientas de apoyo para la obtención de la vulnerabilidad del acuífero de Calvillo". Así mismo ratificó a la Dra. Judith Ramos Hernández como asesora del mismo y designó a los siguientes investigadores como jurado para su examen de grado.

| | |
|-------------------------------|------------|
| Dra. Rosa María Prol Ledesma | Presidente |
| Dr. Ramiro Rodríguez Castillo | Vocal |
| Dra. Judith Ramos Hernández | Secretario |
| Dr. Raúl Aguirre Gómez | Suplente |
| Dr. José Alfredo Ramos Leal | Suplente |

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 27 de mayo de 2011.
COORDINADORA DEL PROGRAMA

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ

ELFM'Imf

INTRODUCCIÓN

El estado de Aguascalientes se caracteriza por una extracción intensiva de agua subterránea para cubrir sus requerimientos socioeconómicos. Prácticamente todo el sector primario que incluye a las actividades: agrícola (empacadoras, sistemas de riego, etc), pecuario, silvícola, pesquero y minero demanda el 73% del agua extraída del subsuelo aunque aporta sólo el 5 % del PIB (COTAS-CONAGUA-CMM, 2006). El sector secundario, donde se encuentran las industrias manufactureras, y de la construcción, requiere cerca del 1% del agua extraída al igual que el sector terciario con el comercio, servicios, turismo, transporte, almacenaje y servicios financieros, profesionales y comunales, aportando cerca del 32% y 63% del PIB, respectivamente (COTAS-CONAGUA-CMM, 2006).

Aguascalientes cuenta con cinco acuíferos de los cuales sólo cuatro tienen datos y de estos se ha estimado un volumen total extraído de $478 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ con una recarga de $234 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ mostrando un déficit del 50%. El acuífero más grande corresponde al del Valle de Aguascalientes, donde se ubica la ciudad de Aguascalientes, así como, la totalidad de localidades de Cosío, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos, Tepezalá, y parcialmente, Aguascalientes, Jesús María, San Francisco de los Romo y San José de Gracia (Fig. 1.1). El segundo, por el volumen de recarga, es el acuífero del Valle de Calvillo abarcando las localidades de Calvillo, Jesús María, San José de Gracia, una parte del municipio de Jalpa, en el Estado de Zacatecas. En tercer lugar está el acuífero del Valle del Chicalote que incluye el municipio de Asientos y, una pequeña porción de los municipios de San Francisco de los Romo y de Aguascalientes, hasta los límites con el Estado de Zacatecas. Finalmente, se tiene el acuífero de El Llano en cuarto lugar.

El acuífero del Valle de Calvillo presenta una extracción de 41.8 hm^3 con una recarga de 25 hm^3 , lo que deja un déficit de 16.8 hm^3 . Este volumen de extracción hace del acuífero una fuente sobreexplotada, que difícilmente podrá cubrir el abastecimiento de agua a los diferentes usuarios, lo que al final limita el desarrollo económico de la región.

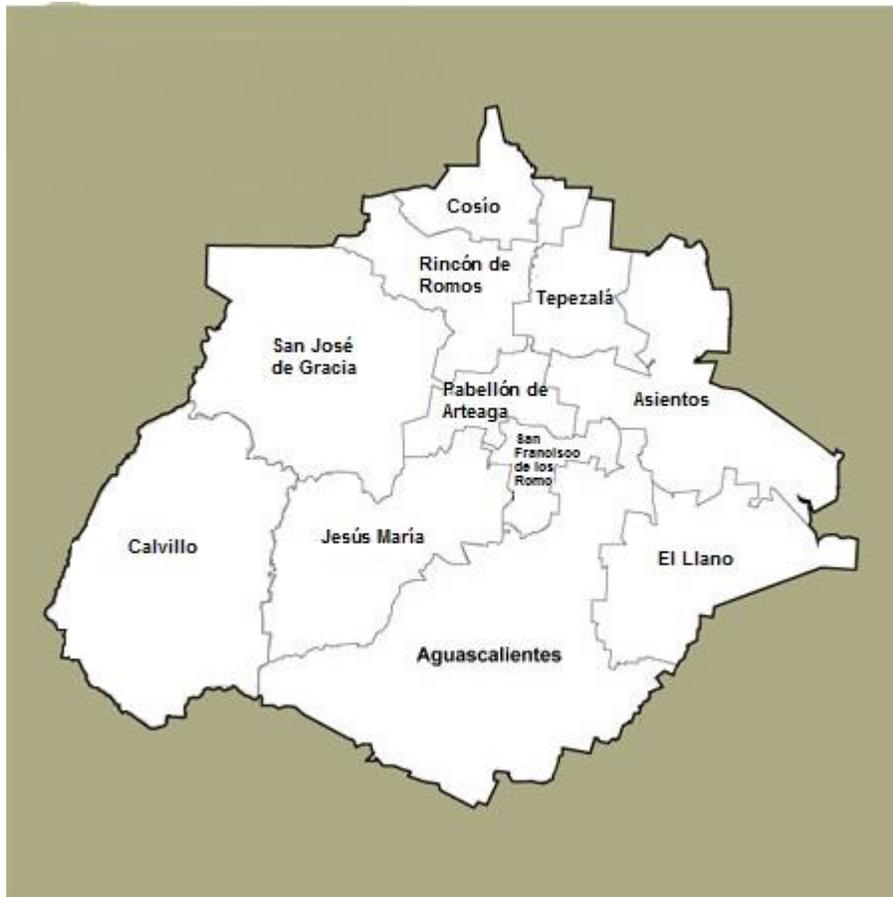


Figura I.1. Municipios que forman parte del estado de Aguascalientes

Pese a reconocer la importancia del agua subterránea y que las políticas nacionales se han venido establecido para proteger y manejar en forma sostenible este recurso, el continuo incremento en la demanda de agua aumenta la sobreexplotación y la contaminación, lo que se traduce en el requerimiento de nuevas políticas las cuales se fundamentan en un conocimiento adecuado del sistema, esto es, caracterizar cuantitativa y cualitativamente el sistema modelando y planeando mediante el uso de tecnologías y aproximaciones que lleven a lograr ese conocimiento. Obtener la caracterización química, física y biológica del acuífero es difícil debido a la heterogeneidad de la zona y las variaciones climáticas. Para eliminar estas barreras y lograr un manejo eficiente del agua, se han desarrollado técnicas basadas en tecnología espacial como es el uso de percepción remota (PR), Sistemas de Información Geográfica (SIG), además de métodos geofísicos (eléctricos, electromagnéticos y sísmicos), simuladores de código del flujo de agua subterránea (ej. MODFLOW) que permiten la obtención de algunos parámetros para definir el estado actual que guarda un acuífero.

Este manejo eficiente del agua debe empezar por evaluar la sensibilidad¹ del medio, esto es, determinar el impacto ambiental al que está sujeto. Para ello, se desarrolló el concepto de “vulnerabilidad del acuífero” por Margat (1968), donde vulnerabilidad² se refiere al grado de protección que el medio provee contra el ingreso de contaminantes al acuífero. Vrba y Zaporozec (1994)³ indican que esa sensibilidad está en función de las actividades humanas y naturales del sistema, para lo cual junto con Doerfliger et al. (1999) y Gogu y Dassargues (2000) reconocen dos vulnerabilidades: intrínseca (solo incluye factores hidrogeológicos) y específica (incluye factores hidrogeológicos y carga de contaminantes). Kouli et al. (2010) consideran que para cartografiar la vulnerabilidad de los acuíferos se deben considerar factores como: topografía, geología, tipo de acuífero, etc., por ello, es deseable lograr una clasificación geográfica del área para evaluar su susceptibilidad más que usar modelos de agua subterránea; en especial, cuando los requerimientos de información no son cubiertos. Diferentes métodos se han desarrollado para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero, los cuales incluyen métodos estadísticos, de índices y de capas de información (Tesoreiro et al., 1998).

Uno de los métodos empleados es el GOD (confinamiento hidráulico del agua subterránea/estratos/nivel freático) desarrollado por Foster (1987) donde se consideran las características y procesos en el suelo y la zona no saturada, no así los procesos de transporte en la zona saturada. El método GOD fue adoptado en México en 2004 como el método para estimar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación (DOF, 2004) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) lo implementó para obtener el mapa de vulnerabilidad de **aguas subterráneas**.

Estudios previos

El Calvillo, ubicado al sureste de la ciudad de Aguascalientes, ha sido estudiado por diversas instituciones universitarias y públicas, de esos avances se cuenta con lo siguiente:

¹ La sensibilidad es el grado en el que se ve afectado un sistema, ya sea adversa o benéficamente, por impactos externos (McCarthy et al., 2001).

² La vulnerabilidad es el grado en el cual un sistema es susceptible o incapaz de afrontar los efectos adversos de los impactos que recibe. La vulnerabilidad es función del carácter, magnitud y rapidez del cambio y de la variación a la que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación (McCarthy et al., 2001).

³ Vrba y Zaporozec (1994) definen a la vulnerabilidad como la propiedad natural del sistema de agua subterránea, que depende de la sensibilidad a los impactos naturales y/o humanos.

- Instituto Nacional Estadística Geográfica e Informática, (INEGI, 2002 y 2008) llevó a cabo la cartografía a escala 1:250,00 de la carta F1309 de los temas siguientes:
 - Carta geológica Serie I: describe en la zona de estudio, las características hidrogeológicas de las distintas unidades litológicas presentes en el valle Calvillo.
 - Carta de hidrología. Aguas subterráneas Serie I, describe la calidad fisicoquímica del agua subterránea la cual corresponde a dos familias principales: cálcica bicarbonatada y sódica-cálcica bicarbonatada. Hay dos tipos de acuíferos: libre y semiconfinado.
 - Carta edafológica Serie II, describe los diferentes tipos de suelo de acuerdo a la clasificación de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB; World Reference Base).

- Estudio Hidrológico del Estado de Aguascalientes (INEGI, 1993). Reporta un sistema de acuíferos libres, principalmente en fosas tectónicas y la calidad fisicoquímica del agua de la zona.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2002). Estudio para determinar la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Calvillo en función de los sedimentos continentales de los cuales está relleno el graben, el abatimiento medio anual y la calidad geoquímica de las aguas subterráneas.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1998). Elaboró la carta Geológica Minera F1309 a escala 1:250,000 que incluye a los estados de Aguascalientes, Jalisco, Zacatecas y Nayarit.
- Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, llevó a cabo varios trabajos entre ellos destacan:
 - Cartografía Geológica de las Hojas Espíritu Santo, Pinos, El Obraje, Ojuelos, Estados. De San Luís Potosí, Jalisco, Guanajuato y Zacatecas.
 - Folleto Técnico No. 93 (1983). Describe la columna litológica.
 - Folleto Técnico No. 88 (1983). Comparación Hidrogeoquímica de Aguas Subterráneas Termales de Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y San Luís Potosí y Control Geológico Estructural del Agua Subterránea entre San Luís Potosí – Aguascalientes y Zacatecas.
 - Folleto Técnico No. 97 (1984). Origen del agua subterránea y comparación hidrogeoquímica de la Zona Ahualulco – Mexquitic con la Cuenca de Ojuelos, Jal.

- Folleto Técnico No. 110a (1986). Reporta estudios hidrogeoquímicos del área Norte de Mexquitic y Oriente de Ahualulco.
- Instituto Geología, Universidad Nacional Autónoma México, desarrollo la Geología Preliminar del Graben de Aguascalientes (Aranda-Gómez, 2002).

Objetivo general

Establecer índices para cartografiar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero del Valle de Calvillo ante impactos externos naturales y humanos empleando análisis de la información geoespacial disponible (ráster y vectorial), a fin de conocer el estado actual del acuífero y proponer soluciones ante una sobreexplotación intensiva.

Objetivos particulares

- Determinación de lineamientos y unidades litológicas empleando técnicas de percepción remota.
- Determinación del uso de suelo aplicando técnicas de percepción remota.
- Obtención de isolíneas del nivel estático de pozos a partir de un censo de aprovechamientos con lecturas piezométricas
- Estimar y comparar la vulnerabilidad de un acuífero con los métodos de GODS y SINTACS.
- Obtener un mapa de las zonas de recarga y descarga, con el fin de identificar las áreas que son susceptibles de ser contaminadas.

Hipótesis

Este trabajo plantea si la identificación de unidades litológicas, en particular, lineamientos y otros factores hidrogeológicos pueden ser obtenidos de manera confiable mediante técnicas de percepción remota, proporcionan información relevante para determinar la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero.

CAPITULO 1. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS: CONCEPTOS Y MÉTODOS

En este capítulo se hace una revisión del concepto y de las metodologías que se han desarrollado para determinar la vulnerabilidad de un acuífero.

1.1 Vulnerabilidad

De acuerdo con Loeches-Garrido y Rebollo-Ferreira (2007), las aguas subterráneas son el factor determinante para la presencia de vegetación y del paisaje en la superficie. Adicionalmente, los acuíferos son importantes para el abastecimiento del ser humano; así como, para cubrir otras necesidades básicas que definen el desarrollo económico de una población.

La principal fuente que da lugar al agua subterránea es la precipitación en forma de lluvia o nieve. De ésta, una parte es interceptada, otra escurre y otra es evapotranspirada hacia la atmósfera y el agua restante se infiltra en el terreno (Fig. 1.2). De manera general, de agua que regresa a la atmosfera como vapor de agua, el 80% se evapora de los océanos y cerca del 20% del agua continental y de la transpiración de las plantas y animales. Parte del agua transpirada por la vegetación corresponde al agua interceptada la cual, dependiendo de las características de la vegetación y condiciones climáticas, es del orden de 20 a 40% del agua precipitada. El agua infiltrada primeramente genera una lámina de agua sobre el suelo seco, poco a poco el agua penetra en una zona donde aún está presente aire en los espacios intersticiales de las partículas de suelo, conocida como zona no saturada o de aireación. A mayor profundidad el aire es liberado y los huecos se llenan de agua saturando el suelo, lo que se conoce como zona saturada y su nivel superior está definido por el nivel freático. El comportamiento de los niveles del agua con respecto a la superficie del terreno, está gobernado por la distribución de la recarga y el bombeo, el relieve topográfico y por las características hidráulicas del acuífero (Arnel, 2002).

El tipo de acuífero está definido por la porosidad y estructura misma del suelo y el movimiento del agua subterránea. Esta se mueve de forma cíclica y se almacena en el estrato geológico, por ejemplo en los suelos porosos como arena, gravas y aluvión. En algunos casos, se almacena en fisuras o fallas de rocas compactas no permeables como las metamórficas y volcánicas (Arnel, 2002).



Figura 1.1. Ciclo hidrológico incluyendo el movimiento del agua subterránea.

Fuente: USGS, 2011

En general, el agua que se infiltra al acuífero está libre de contaminantes y es incolora e insípida. Sin embargo, las actividades humanas como agricultura, ganadería, industria, generación de residuos urbanos y agua residual, contaminan el suelo, en consecuencia, el agua que se infiltra. Al mismo tiempo, fenómenos naturales como incendios, deslizamientos y otros procesos disminuyen o aumentan la capacidad de infiltración exponiendo o cubriendo las rocas y el suelo o bien incrementan la cantidad de contaminantes que se mueven en el subsuelo. Asimismo, el problema de las fallas, subsidencias o hundimientos del terreno agravan la condición del acuífero generando daños en la superficie siendo estos más evidentes en las ciudades.

En la protección del agua subterránea por la presencia de contaminantes asociados a causas naturales y actividades humanas se realiza en primer lugar la evaluación de la sensibilidad del medio, esto es, establecer el intervalo de valores de una o diversas varias variables donde no cambia la vulnerabilidad del acuífero ante los contaminantes (Werz y Hötzl, 2005). Para ello, se desarrolló el concepto de “vulnerabilidad del acuífero” (Margat, 1968), el cual se refiere al grado de protección que el medio ofrece contra el ingreso de contaminantes. Diversas definiciones se han dado para explicar el término después de Margat; sin embargo, no existe una definición estándar (Kouli *et al.*, 2008). Vrba y Zaporozec (1994) indicaron que la vulnerabilidad es resultado de las propiedades intrínsecas de los acuíferos (tipo de acuífero y cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.), las actividades humanas y eventos naturales a los que esté sujeto el sistema. Doerflinger *et al.* (1999) y Gogu y Dassargues (2000) reconocen dos tipos de vulnerabilidad: intrínseca y específica.

- La vulnerabilidad intrínseca considera la vulnerabilidad del acuífero a contaminantes generados por el ser humano, tomando en cuenta las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área, pero independiente a la naturaleza misma de los contaminantes y la atenuación de la contaminación.
- La vulnerabilidad específica considera la vulnerabilidad del acuífero a un grupo de contaminantes, tomando en cuenta sus propiedades y su relación con los diferentes componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

Al ser la vulnerabilidad una propiedad intrínseca de los acuíferos que depende de su sensibilidad a los fenómenos naturales o antropogénicos (Vrba y Zaporozec, 1994). Dicha sensibilidad se define en función de las características geológicas e hidrogeológicas de un área específica. De esta manera se define la capacidad del sustrato geológico que está sobre-yaciendo para atenuar cualquier agente extraño (natural y artificial) que cambie la calidad química o bacteriológica del agua (Foster, 2002). DeKetelaere et al. (2004) presenta el término **riesgo del agua subterránea** a las fuentes potenciales de contaminación resultado de las actividades humanas y que tienen lugar principalmente en la superficie. Asimismo, se presenta el término **intensidad del riesgo**, a la probabilidad de contaminar el agua subterránea por actividades humanas, por lo que un alto riesgo de contaminación existe cuando un agente peligroso es localizado en zonas donde existe un acuífero altamente vulnerable (Werz y Hötzl, 2005).

Aunque los acuíferos tienen la capacidad de remover algunos contaminantes o reducir su impacto, no es posible lograr una adecuada descripción de la sensibilidad hidrogeológica, es decir, establecer con certidumbre qué o cuáles parámetros caracterizan el sistema, sino se evalúa el potencial del acuífero para atenuar el efecto de los contaminantes. En general, los acuíferos presentan sólidos disueltos producto de la descomposición natural del material del suelo y rocas. Algunos de ellos poseen olor, color, sabor, temperatura y microorganismos (ej. bacterias). De esta manera, la calidad del agua subterránea depende del medio y del movimiento del agua en él, y cambios naturales o humanos externos pueden alterar la condición natural y, en consecuencia, contaminar la fuente. El tipo, extensión y duración de los cambios ejercidos están controlados por la influencia que tengan sobre los procesos geoquímicos, físicos y biológicos que tienen lugar en el subsuelo. A fin de establecer los efectos de los cambios sobre

las condiciones naturales se debe conocer el nivel freático, el gradiente hidráulico, la distancia de los pozos con aporte de contaminantes y las propiedades de las rocas (ej. conductividad hidráulica). En general, el movimiento subterráneo de cualquier contaminante está influenciado por el contenido de agua y el balance de agua en la zona vadosa, el gradiente hidráulico y el balance de agua en la zona saturada. Estos parámetros a su vez están controlados por el volumen y flujo de agua en el sistema, los cuales dependen del clima, relieve y la conductividad hidráulica (Vrba y Zaporozec, 1994).

El nivel de contaminación del agua subterránea se determina por el proceso natural de atenuación que tiene lugar en la zona entre la fuente contaminante y el acuífero (zona no saturada). Por ello, para evaluar la vulnerabilidad del acuífero y el riesgo a la contaminación se emplea el modelo *fuentes-trayectoria-objeto*. La fuente se refiere a la ubicación del contaminante, la trayectoria comprende el movimiento del contaminante desde la fuente hacia el objetivo y éste último es el agua subterránea en el acuífero (Kouli et al., 2008).

Tres aspectos de la vulnerabilidad de un acuífero que se deben considerar:

- Tiempo de tránsito de un contaminante desde su fuente hasta el agua subterránea
- Atenuación a lo largo de la trayectoria como resultado de la actividad bacteriológica, retención física y reacción química en la zona no saturada de los contaminantes con la roca
- Duración de la permanencia contaminante en el agua subterránea

Es importante considerar que todo acuífero tiene algún riesgo potencial a la contaminación y cualquier evaluación de la vulnerabilidad tiene un grado de incertidumbre. De acuerdo Vrba y Zaporozec (1994) éste grado de incertidumbre está relacionado con la diversidad de los mismos sistemas hidrogeológicos que existen lo que no permite fácilmente la estandarización y, en consecuencia, se pierda de vista el detalle necesario para establecer el grado vulnerabilidad. Este grado de incertidumbre se acentúa en regiones con climas extremos (sequía, precipitación, calor y frío), (Vrba y Zaporozec, 1994).

Kouli et al. (2008), consideran que para realizar la cartografía de la vulnerabilidad de los acuíferos, se debe establecer que algunas áreas son más vulnerables a otras y, por ello, es deseable lograr una clasificación geográfica del área para

evaluar su susceptibilidad más que usar modelos de agua subterránea. Esto debido a que los datos requeridos no siempre están disponibles por series incompletas, o datos diferentes para el fin que se persigue. Los mapas de vulnerabilidad pueden obtenerse empleando un Sistema de Información Geográfica (SIG) que se construye a partir de datos geospaciales obtenidos de mapas temáticos y del empleo de técnicas de percepción remota (PR), con las que se procesan imágenes ráster para su interpretación, agregación, correlación y análisis. El objetivo final de cartografiar la vulnerabilidad, es lograr un manejo adecuado del acuífero proporcionando las herramientas necesarias para planear acciones, evaluar la contaminación y establecer programas de educación de los usuarios para evitar en lo posible la contaminación del acuífero. Estos mapas se pueden combinar con otros como el uso de suelo, datos de calidad del agua subterránea e inventarios de fuentes de contaminación, entre otros. Los mapas deben ser por lo general consistentes, comparables y estandarizados en expresiones gráficas o numéricas, entendibles, con buena legibilidad y acompañados de leyendas descriptivas y comprensibles. Los mapas de vulnerabilidad se generan con fines prácticos: por ejemplo, en el caso que se quiera ver la contaminación, se generan mapas espaciales y temporales que presenten diversos escenarios de la contaminación.

Vrba y Zaporozec (1994) mencionan que las técnicas para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero varían en función de la fisiografía del área, la cantidad y calidad de los datos y el fin del estudio mismo. Estos autores dividen en dos clases distintivas dichas técnicas: 1) universal, donde se tenía cualquier escenario fisiográfico y 2) local, empleado para un sitio en particular. Asimismo proporcionaron una clasificación con tres grupos: hidrogeológicos, paramétricos y de relación analógica y modelos numéricos. De igual forma, Tesoreiro et al. (1998), definen tres grupos para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero:

- Métodos de sobreposición de capas de información y obtención de índices,
- Métodos que emplean modelos de simulación basados en los procesos que tienen lugar en el sistema, y
- Métodos estadísticos

El método basado en sobreposición de índices tiene la ventaja de que combina factores que controlan el movimiento de los contaminantes desde la fuente y a través de la zona no saturada estableciendo índices a diferentes puntos. Factores

como lluvia y profundidad del nivel de agua subterránea son usados para cubrir el área para el estudio (espacialidad). Si bien sus ventajas son varias, su principal desventaja es la subjetividad al asignar valores numéricos a las entidades descriptivas del proceso y pesos relativos para los diferentes atributos. Los modelos de simulación estiman la migración del contaminante pero están restringidos por datos de almacenamiento y requerimientos computacionales (tiempo y capacidad de procesamiento) (Kouli et al., 2008; Thapinta y Hudak, 2003; Barbash y Resek, 1996).

Los métodos basados en la sobreposición e índices pueden distinguir grados de vulnerabilidad a escalas regionales respondiendo a diferentes litologías y pueden emplearse para proteger acuíferos de tipo poroso. Vrba y Zaporozec (1994), distinguen dos grupos:

- Sistemas paramétricos donde se construyen los sistemas a partir de aquellos parámetros o factores representativos de la vulnerabilidad del agua subterránea, como sistemas matriciales, índices, una combinación de índices y pesos. Algunos ejemplos de los dos últimos son: DRASTIC (Profundidad, Recarga, Acuífero, Suelo, Topografía, Impacto a la zona vadosa y Conductividad hidráulica, Aller et al., 1987), AVI (Índice de Vulnerabilidad del Acuífero, van Stempvoort et. al., 1995), SINTACS (Profundidad del agua subterránea, Recarga, Naturaleza de la zona no saturada, Tipo de suelo, litología del Acuífero, Conductividad hidráulica, Pendiente del terreno, Civita, 1994), GOD (Grado de confinamiento hidráulico, Ocurrencia del sustrato suprayacente y Distancia al nivel agua subterránea no confinado o al techo del acuífero, Foster, 1987). Otros métodos se enfocan al tipo de material como el EPIK (E= zona de intensa karstificación, P=cobertura de protección, I= condiciones de infiltración, K=red kárstica, Doerfinger et al., 1999).
- Sistemas no numéricos, los cuales se basan en la comparación de un área vulnerable con otras también vulnerables. Para ello se establecen clases con ayuda de la sobreposición de mapas temáticos y son aplicables a áreas extensas con variabilidad hidrogeológica, hidroestructural y morfológica. La evaluación de la vulnerabilidad se da en términos cualitativos (Civita, 1990; Vrba y Zaporozec, 1994).

De los métodos presentados para obtener la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Calvillo, se escogieron, para este trabajo, los métodos GOD y SINTACTS. El método GOD ha sido usado en el INEGI desde su aparición en la Norma Oficial Mexicana (NOM) 141-SEMARNAT-2004 (DOF, 2004) para el cual se han establecido manuales de operación (INEGI, 2010). Este método tiene una estructura simple y pragmática. GOD considera tres parámetros y ha mostrado buenos resultados en el diseño de zonas extensas (Kouli et al., 2008). A fin de comparar el método GOD se emplea el método SINTACS, el cual se desarrolló como una versión del método DRASTIC del cual solo conserva la estructura (Kouli et al., 2008). Dicha estructura considera siete parámetros, los cuales incluyen las características geológicas y ambientales del sistema, pero al depender de las características hidrogeológicas del área es posible usar, en el mismo mapa, diferentes pesos para diferentes puntos de la zona no saturada, esto es, utiliza gráficas de puntuación.

La comparación entre un método (GOD) que sólo comprende tres parámetros pudiendo ser definido únicamente por uno de ellos en caso de que los otros dos fueran igual a 1, con otro (SINTACS) que comprende una serie de parámetros que definen con mayor detalle las características del acuífero, es relevante ya que se pueden comprobar las ventajas o no de su empleo y su continuo uso por parte del INEGI.

1.2 Método GOD

El método GOD considera el suelo y la zona no saturada sin tomar en cuenta el proceso de transporte en la zona saturada. Este método usa un número mínimo de parámetros que en algunas áreas ha demostrado cubrir en forma exitosa las características del sitio (Kouli et al., 2008). Aunque Sigríst (2008) recomienda comparar con otro método para verificar su aplicabilidad. El intervalo de valores para obtener el índice de los tres parámetros va de 0 (vulnerabilidad mínima) a 1 (vulnerabilidad máxima) y el índice final se obtiene de la forma siguiente:

$$I_G = G \cdot O \cdot D \quad (1.1)$$

Donde G es el grado de confinamiento hidráulico, O es el de ocurrencia del sustrato suprayacente y D es la distancia al nivel agua subterránea (no confinado) o al techo del acuífero (confinado).

El índice del área de vulnerabilidad se calcula seleccionando un valor para el parámetro de la ocurrencia del agua subterránea y después se multiplica por el valor asociado a la litología así como con el valor para la profundidad del agua subterránea (Fig. 1.2).

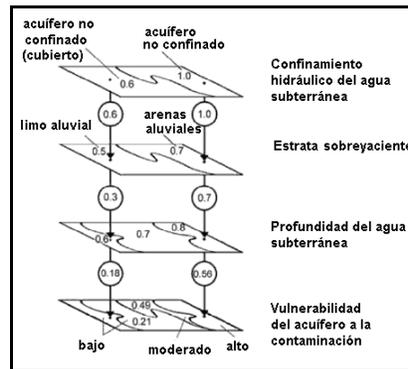


Figura 1.2. Mapa de vulnerabilidad creado a partir del método GOD

Fuente: Foster et al., 2002

El parámetro de litología contribuye al I_G sólo en el caso de que se trate de acuíferos no confinados. Puesto que los valores que se pueden asignar van de 0 a 1, el resultado será menor que el valor asignado a cada parámetro, pero en el caso de que dos parámetros sean igual a 1, el valor del I_G será igual al valor del tercer parámetro (Gogu y Dassargues, 2000). Como se observa en la Figura 1.10, en ningún caso el valor mínimo es cero (tabla 1.1), pero si algún parámetro es cero, eso significaría, que no hay un sistema vulnerable.

Tabla 1.1. Valores puntuales de los parámetros de vulnerabilidad del método GOD

| G (ocurrencia del agua subterránea) | Rango | No confinado | | | Confinado | |
|---|-------------------|-----------------|-------|--------------|------------------|---------|
| | Puntuación | | 1 | | 0.6 | |
| O (capas litológicas del acuífero) | Rango | Grava y piedras | Arena | Arena-limosa | Dolomitas y limo | Arcilla |
| | Puntuación | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |
| D (profundidad del nivel freático) | Rango (m) | 0 - 2 | 2 - 5 | 5 - 10 | 10 - 20 | |
| | Puntuación | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | |

Fuente: Draoui et al., 2008

Massone et al. (2011) define las cinco clases de vulnerabilidad que dan lugar al mapa de vulnerabilidad:

1. **Vulnerabilidad Despreciable (Vd).** Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.
2. **Vulnerabilidad Baja (Vb).** Presencia de contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continúa durante largos periodos de tiempo.
3. **Vulnerabilidad Media (Vm).** Acuíferos sujetos a algunos contaminantes que son continuamente descargados o lixiviados
4. **Vulnerabilidad Alta (Va).** Vulnerable a contaminantes, con excepción de los agentes altamente absorbibles o degradables por procesos químicos u orgánicos.
5. **Vulnerabilidad Extrema (Vex)** Vulnerables a contaminantes de impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.

En el INEGI (2010) se ha adoptado el método GOD a raíz de su aplicación en la NOM141-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) y para su aplicación se han planteado tres etapas que coincide con el procedimiento mostrado en la Figura 1.3:

- **Primero:** identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0.0 a 1.0 (tabla 1.2).
- **Segundo:** especificar las características del sustrato subyacente a la zona saturada del acuífero en términos de (tabla 1.3):
 - Grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras)
 - Tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad, contenido de humedad en la zona no saturada o retención específica) y, asignar un índice a este parámetro en una escala de 0.4 a 1.0

Tabla 1.2. Confinamiento hidráulico del agua subterránea

| Ocurrencia del agua subterránea | Índice |
|--|--------|
| Ausente | 0.0 |
| Surgente o artesiana | 0.0 |
| Confinado | 0.2 |
| Semi-confinada | 0.4 |
| Libre o freática | 0.6 |
| Subálvea o freática aflorante | 1.0 |
| <p>- Cuando exista duda acerca de la continuidad y las propiedades de la presumible capa confinante, se considerará la ocurrencia del agua como libre o freática.</p> <p>- Cuando la disponibilidad media anual del agua subterránea publicada en el DOF indique que la unidad hidrogeológica se encuentra sobreexplotada, se considerará su confinamiento próximo menor al real (Ejemplo: Un acuífero artesiano se considerará confinado cuando se encuentre sobreexplotado).</p> | |

Tabla 1.3. Granulometría y litología sobreyacente

| Estratos sobreyacentes | | | |
|---|---------------------------|---|---------------|
| No consolidadas | Consolidadas | | Índice |
| (sedimentos) | (rocas porosas) | (rocas densas) | |
| Arcillas lacustres/estuarías, suelos residuales | | | 0.4 |
| Limos aluviales, loess, till glacial | Lutitas, pizarras | | 0.5 |
| Arenas aluviales y fluvioglaciales | Limolitas, toba volcánica | Formaciones ígneas/metamórficas y volcánicas antiguas | 0.6 |
| Arena eólica | Areniscas | --- | 0.7 |
| Gravas aluviales y eluviales | --- | Lavas recientes | 0.8 |
| --- | Caliche, calcarenitas | --- | 0.9 |
| --- | --- | Calcretitas y calizas karstificadas | 1.0 |

- **Tercero;** estimar la distancia o profundidad al nivel del agua de acuerdo con los siguientes valores (tabla 1.4)

Tabla 1.4. Profundidad del agua subterránea

| Profundidad | Índice |
|---|---------------|
| Mayor a 50 m | 0.60 |
| Entre 20 y 50 m | 0.70 |
| Entre 5 y menos de 20 m | 0.80 |
| Menor a 5 m | 0.90 |
| <p>Sólo en los casos en que la capa sobreyacente al acuífero esté constituida por caliche, calcarenitas, lavas recientes, calizas karstificadas, el índice de profundidad del agua subterránea será 1.0.</p> <p>En casos en que no se cuente con datos directos para estimar la profundidad del agua subterránea, podrán elaborarse los estudios directos y específicos necesarios.</p> | |

Finalmente, para establecer la vulnerabilidad se usa la ecuación 1.1.

El diagrama propuesto por Foster et al. (2002), ver Figura 1.3, se ha seguido en el INEGI (2010) para aplicar el método de GOD.

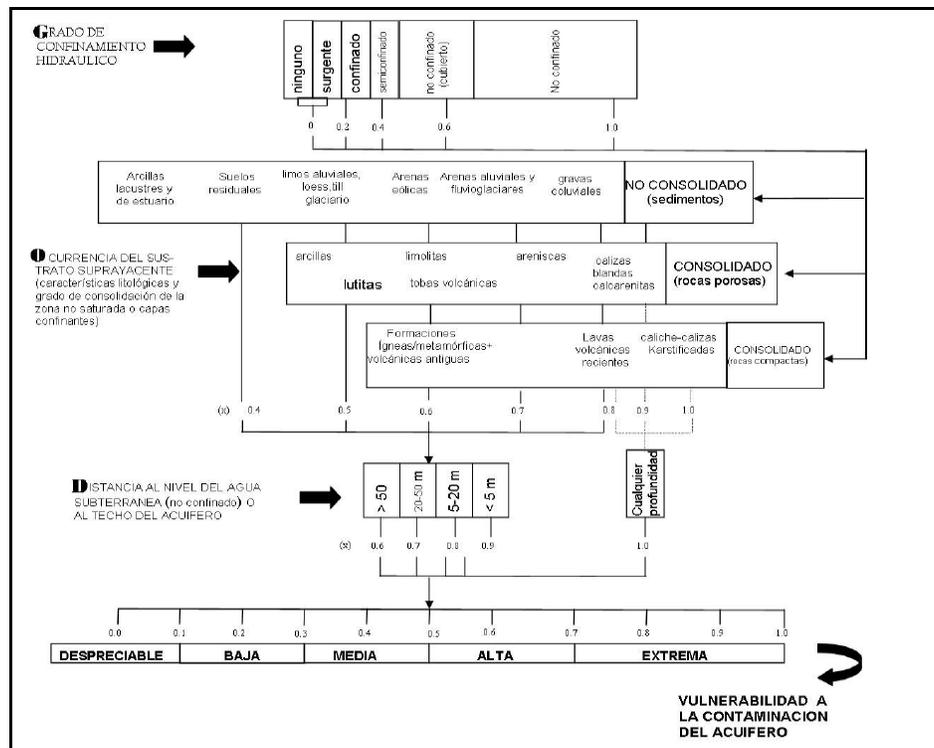


Figura 1.3. Esquema para la aplicación del método GOD (Foster 2002).
Fuente: Vrba y Zaporozec (1994)

En la Figura 1.3 se presenta el esquema seguido, así como el intervalo de valores y el peso que se le asigna a cada parámetro. Básicamente maneja una escala del 0 a 1, en donde 0 representa un riesgo de 0 (Vd) y 1 (Vex). El primer paso considera el parámetro G, al analizar los cortes litológicos y el tipo de acuífero existente. Los valores de ponderación varían de 0 a 1, siendo 0 ninguno o surgente y 1 no confinado. En seguida, se obtiene el parámetro O para establecer el tipo de sustrato presente que es el material geológico presente en la zona de interés. Los pesos van de 0 a 1, donde 0 corresponde a suelos residuales o lacustres y 1 es material consolidado. Después se obtiene D, que es la profundidad del nivel estático y/o profundidad del techo de la capa confinante con pesos de 0 a 1, donde 0 es mayor a 50 m y 1 se aplica para cualquier profundidad. El resultado de estos parámetros se multiplica entre sí.

La Figura 1.4 muestra un detalle en función del tipo de sustrato con lo cual se pueden asignar de manera más sencilla los pesos del parámetro O.

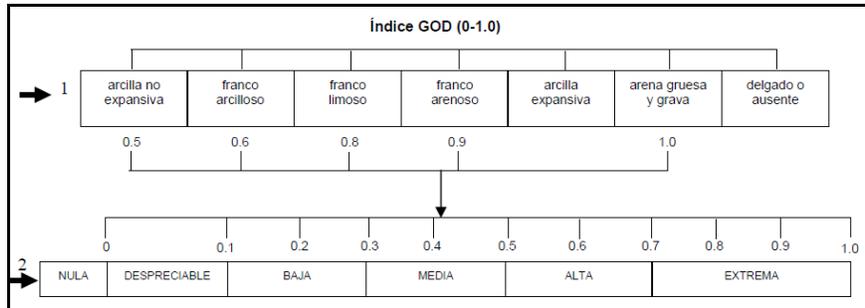


Figura 1.4. Esquema en detalle para el parámetro O estableciendo el 1 tipo predominante de suelo y su correspondencia con el 2 índice de vulnerabilidad obtenido por el método GOD

Fuente: Foster et al., 2002

1.3 Método SINTACS

El método SINTACS evalúa la vulnerabilidad vertical empleando siete parámetros:

S = Profundidad del nivel estático

I = Recarga neta

N = Atenuación o efecto de auto-depuración de la zona no saturada

T = Atenuación del tipo de suelo

A = Características hidrogeológicas del acuífero

C = Conductividad hidráulica del acuífero

S = Pendiente topográfica

Cada uno de estos elementos (r) es mapeado y se clasifica en intervalos de 1 a 10, los cuales se designan en función de su impacto contaminante. Los pesos asignados (w) a cada elemento (r) se establecen para balancear la importancia de cada elemento y van de 1 a 5. Al final, el proceso proporciona un índice de vulnerabilidad (Iv) como resultado de la suma de los siete elementos.

$$Iv = SrSw + Irlw + NrNw + TrTw + ArAw + CrCw + SrSw \quad (1.2)$$

Los pesos de cada factor dependen del tipo de acuífero que se trate (Normal, Cárstico, Medio fracturado, Severo y Seepage). Los valores de los índices varían entre 23 y 260, con grados de vulnerabilidad de muy bajo a muy elevado. Valores altos de la suma representan un alto potencial de contaminación del agua subterránea o un cierto grado de vulnerabilidad del acuífero.

1.3.1 Profundidad del nivel estático (S)

La profundidad del nivel estático, es la distancia que hay del nivel del terreno a la superficie del agua en el subsuelo (nivel freático). El método SINTACS considera profundidades entre 0 y 100 m. La obtención del rango del parámetro se basa en los lineamientos establecidos por el método como se muestra en la Figura 1.5.

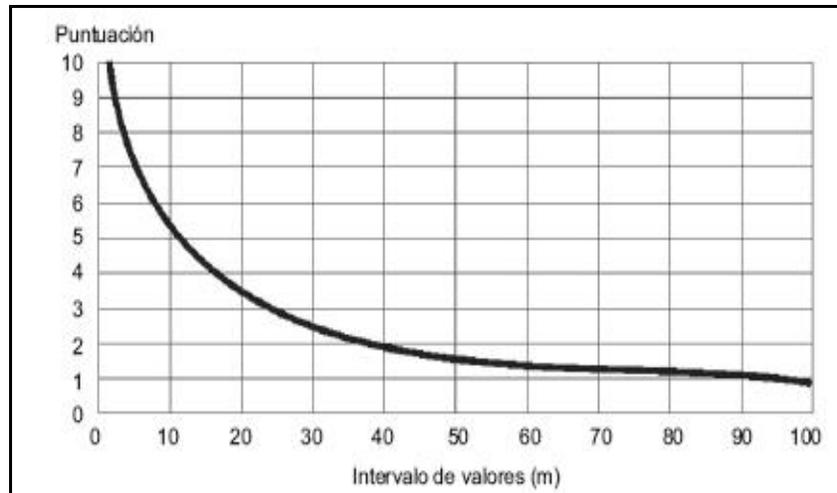


Figura 1.5. Profundidad del nivel freático

Fuente: Civita y De Maio, 2000

Es importante mencionar que en México se alcanzan profundidades hasta 150 m, lo que implica un re-escalamiento para obtener una mejor representación de este parámetro. El re-escalamiento se debe efectuar considerando el tipo de acuífero y que un gran espesor de la zona vadosa se puede asociar a una moderada o baja vulnerabilidad. Marisco et al. (2004) encontró que el parámetro S, en acuíferos cársticos, no presenta efecto alguno al reducir el nivel freático por la presencia de cuevas. A falta de datos, la curva de la Figura 1.5 para profundidades mayores de 100 m puede considerarse con poca variación y la puntuación estará entre 0-1.

1.3.2 Recarga neta o Infiltración (In)

Este parámetro tiene un papel significativo en la evaluación de la vulnerabilidad debido a que se arrastran hacia el subsuelo los contaminantes superficiales, los cuales se diluyen primeramente en la zona no saturada y, posteriormente, en la zona saturada.

El cálculo de la recarga requiere de datos climatológicos como: precipitación, temperatura, radiación solar. La temperatura y radiación solar son necesarias para estimar las pérdidas de agua en la atmósfera por evapotranspiración, así tener una idea de la cantidad de agua precipitada disponible para ser infiltrada o precipitación efectiva (Aller et al., 1985; Civita y De Maio, 1997).

$$I_n = P_m - ET \text{ (mm}\cdot\text{año}^{-1}\text{)} \quad (1.3)$$

Donde I_n es la recarga neta (mm), P es la precipitación media anual (mm) y ET es la evapotranspiración real anual (mm). La evapotranspiración real se puede calcular con la ecuación de Turc (en Civita y De Maio, 1997), la cual está en función de la temperatura y la precipitación (ec. 1.4). Es importante mencionar que la ecuación de Turc es una forma empírica que se ha empleado para conocer el valor de ET real (E_r) en una cuenca determinada.

$$E_r = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}} \text{ (mm/año)} \quad (1.4)$$

Donde el parámetro L depende de la temperatura media anual (T) y se evalúa mediante la ecuación:

$$L = 300 + 25 \cdot T_c + 0.05 \cdot T_c^3 \quad (1.5)$$

La temperatura media anual, T_c , se calcula mediante (Aller et al., 1985; Civita y De Maio, 1997):

$$T_c = \frac{\sum P_m \cdot T_m}{\sum P_m} \quad (1.6)$$

Donde P_m es la precipitación media mensual (mm) y T_m la temperatura media mensual. ($^{\circ}\text{C}$).

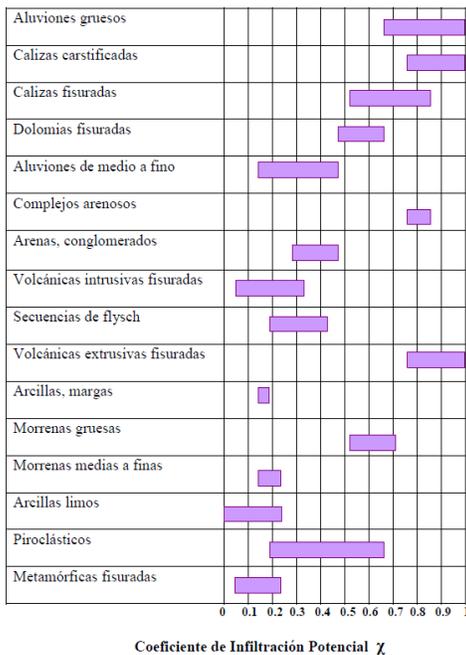
En áreas agrícolas se utiliza la variante de la Infiltración (ec. 1.7), la cual se basa en el cálculo del coeficiente potencial, C_p (Fig. 1.6a), la disponibilidad de agua, D (ec. 1.3), y el excedente promedio del riego, Ex_r (dato proporcionado por la

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA). El valor obtenido de I se proyecta en la grafica de la Figura 1.6b, y se obtiene el valor de infiltración.

$$I = Cp*(D+Exr) \quad (1.7)$$

Donde, D = Agua Disponible (ver ecuación 1.3) y Exr es el excedente de riego promedio.

a) Complejos Hidrogeológicos



b)

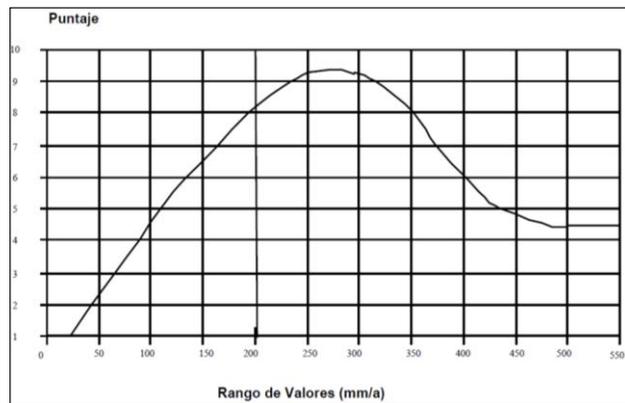


Figura 1.6. a) Coeficiente de Infiltración Potencial y b) Infiltración, $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$

Fuente: Civita y De Maio, 1997 y 2000

La recarga por excedente de riego es un parámetro importante que incluye las pérdidas en los canales de distribución. En general, es una recarga localizada que implica un movimiento horizontal del agua antes de que se dé el proceso de recarga (Lerner et al., 1990). Adicionalmente, en el proceso de recarga se debe tomar en cuenta la contaminación del agua subterránea por fuentes difusas (no puntuales) ya que se modifican sus condiciones hidrogeoquímicas. En particular, en zonas agrícolas se tiene contaminación por fertilizantes (orgánicos e inorgánicos) compuestos por nitratos, amoníaco, cloruros, fosfatos, sodio, potasio; patógenos fecales; salinidad; pesticidas en particular aldrinas, atrazinas y fungicidas (Kovalesky et al., 2004).

1.3.3 Efecto de atenuación de la zona no saturada (N)

De acuerdo con Sappa y Vitale (2001), en la zona no saturada tienen lugar procesos físicos y químicos que llevan a buscar la atenuación del contaminante. Por ello la capacidad de atenuación debe ser evaluada en términos de las características hidrogeológicas como la textura, composición mineral, tamaño del grano, fracturas, desarrollos kársticos (si aplican) como se muestra en la Figura 1.7.

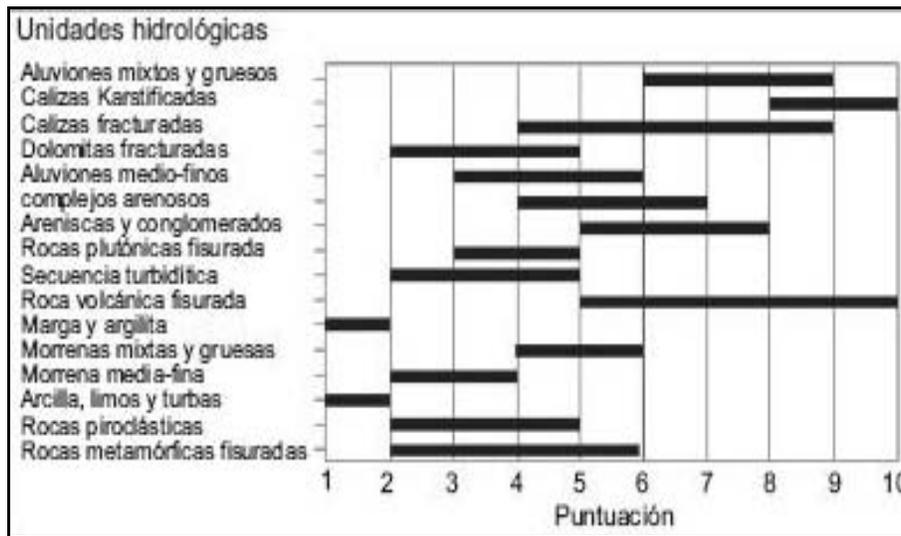


Figura 1.7. Capacidad de atenuación de la zona no saturada.

Fuente: Civita y De Maio, 2000

Los datos requeridos generalmente provienen de pozos de agua y barrenos mineros. Es importante contar con datos de coordenadas geográficas, datos de profundidad, diámetro del pozo, uso, profundidad del nivel estático y descripciones de los cortes litológicos. Esta información se obtiene considerando el peso medio del puntaje asociado con la columna base de la cual está formada el espesor de la zona no saturada y que puede consistir de diferentes unidades litológicas.

Para el cálculo de la zona vadosa con variaciones litológicas verticales se utiliza los cortes litológicos; así como, la profundidad del nivel estático. Aplicando la fórmula (Leonards, 1962; Civita y De Maio, 1997).

$$N = \frac{\sum b_i \cdot j_i}{\sum b_i} \quad (1.8)$$

donde:

N = Valor de la zona vadosa, la media ponderada del sitio.

b_i = Representa el valor del espeso de la capa

j_j = Representa el valor asignado de acuerdo al tipo del material

El valor de b_i se obtiene con la profundidad del nivel estático en el sitio y la descripción de los cortes litológicos.

Asimismo, se deben considerar la densidad y forma y encontrar la puntuación que mejor se adapte a ellos, teniendo como base las unidades reportadas por Civita y De Maio (2000).

1.3.4 Atenuación por tipo de suelo (T)

El movimiento de agua y contaminantes a través de la zona no saturada depende de las características de textura del suelo, donde en muchos casos el contenido de la arcilla está presente. Este tipo de información se puede obtener de cartas edafológicas (INEGI). Otro método alternativo indirecto es la percepción remota, ya que al conocer el tipo de suelo se pueden resaltar algunos de sus compuestos y con sus respectivas firmas espectrales se diferencian.

La Figura 1.8 muestra el intervalo propuesto en el método en función de la textura del suelo.

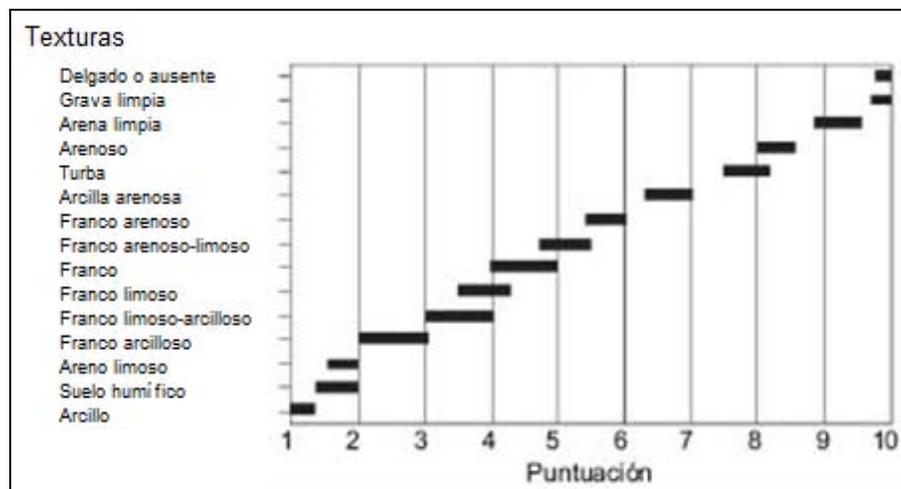


Figura 1.8. Efectos de migración de los suelos

Fuente: Civita y De Maio, 2000

Es importante mencionar que pese a considerar diferentes texturas de suelo, es posible que los mapas de suelo para un sitio en específico difieran de la Fig 1.8. En ese caso se deberán establecer la composición química y la conductividad hidráulica para cada asociación de suelos presente, y en función de ello definir una nueva puntuación siguiendo la Fig. 1.8 como referencia.

1.3.5 Características hidrogeológicas del acuífero (A)

Las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos describen los procesos que tienen lugar por debajo del nivel piezométrico cuando un contaminante se mezcla con el agua subterránea después de perder una pequeña o significativa parte de su concentración original al viajar a través del suelo y la zona no saturada. Estos procesos incluyen: dispersión molecular y cinemática, dilución, sorción y reacciones químicas entre la roca y los contaminantes. Los valores establecidos por el método se muestran en la Figura 1.9.

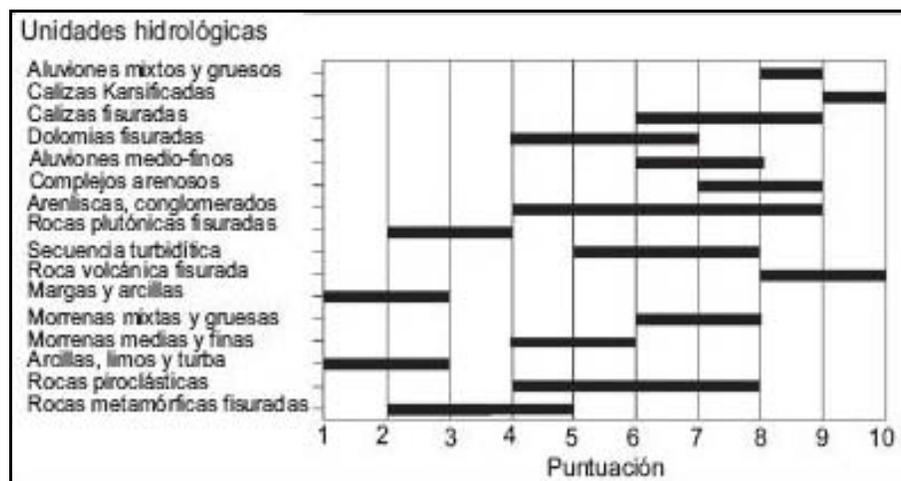


Figura 1.9. Características hidrogeológicas del acuífero

Fuente: Civita y De Maio, 2000

La identificación de las diferentes unidades hidrogeológicas es obtenida de cortes litológicos, secciones geológicas y mapas geológicos.

1.3.6 Conductividad hidráulica del acuífero (C)

Este parámetro representa la capacidad de movilidad del agua subterránea en medio saturado, esto es, el potencial de movilidad del contaminante transportado, el cual tiene una densidad y viscosidad similar al agua subterránea. Este parámetro es crucial ya que define el gradiente hidráulico y el flujo de agua

subterránea a través de secciones siendo igual al rendimiento unitario del acuífero y a la velocidad de flujo hacia la superficie favoreciendo al riesgo a la contaminación.

Los valores obtenidos se normalizan a un rango de 0 a 1. Aplicando la fórmula de la ecuación 1.9. Posteriormente se suma con los valores de la puntuación de la conductividad hidráulica.

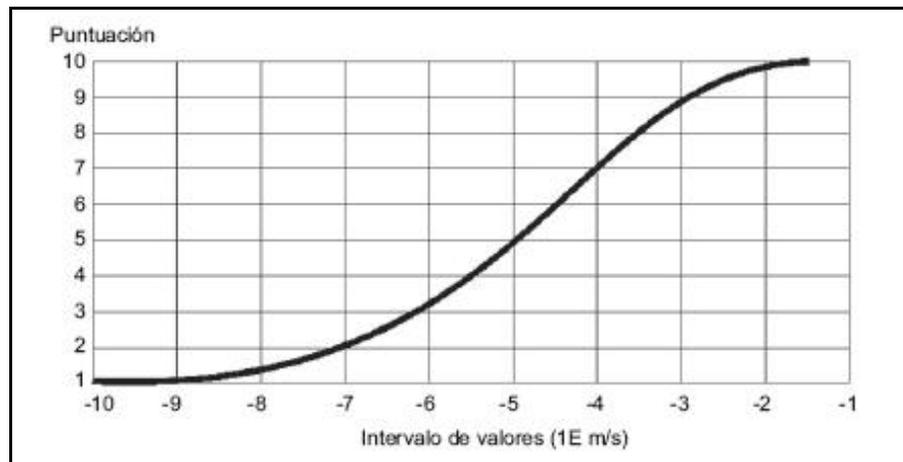


Figura 1.10. Conductividad hidráulica
Fuente: Civita y De Maio, 2000

Este tipo de información se obtiene principalmente de las pruebas de bombeo y permeabilidad que pueden ser consultadas en estudios previos. Para este trabajo se considera un agregado más, la densidad de lineamientos (grado de permeabilidad km/km^2) a partir de su identificación empleando imágenes de satélite Landsat (pancromáticas y ópticas). El trazo de los lineamientos (ríos, estructuras geológicas y rasgos geomorfológicos), se cuantifica a partir del método de Guerasimov (1970, en Silva et al., 2010) donde se divide el valle en cuadrantes de $2 \times 2 \text{ km}^2$, con el fin de darle un peso más a la conductividad en función de la permeabilidad del terreno.

$$\rho = \sum l_i / a_k \quad (1.9)$$

Donde:

ρ = Densidad de lineamientos

l_i = Sumatoria de la longitud de los lineamientos en cada cuadrante

a_k = Área de cada cuadrante

1.3.7 Pendiente topográfica (S)

Este parámetro define la cantidad de escurrimiento producido, la tasa de precipitación y la velocidad de desplazamiento del agua sobre una superficie. Valores altos se registran principalmente en las zonas de recarga. Aunque, la importancia de identificar zonas no relacionadas con las áreas de recarga, se fundamenta en que son delimitadas por las fuentes potenciales de contaminación.

Hasta hace algunos años la obtención de este parámetro era difícil de obtener; sin embargo, el uso de modelos digitales del terreno y los SIG han facilitado su estimación. El intervalo proporcionado para el parámetro se muestra en la Figura 1.11.

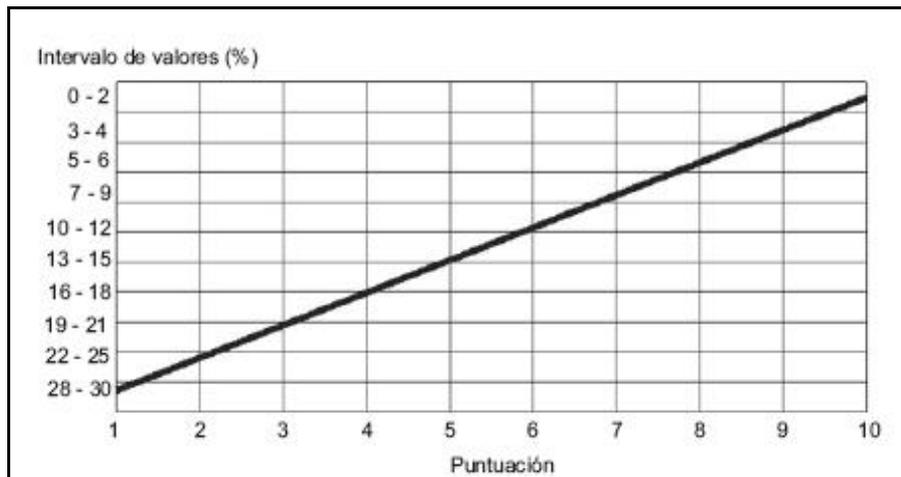


Figura 1.11. Pendiente

Fuente: Civita y De Maio, 2000

La pendiente se consideró por Civita y De Maio (2000) como un factor genérico del tipo de suelo y espesor que indirectamente afecta el potencial de atenuación del sistema hidrogeológico

1.3.8 Normalización de la vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad está en función del puntaje de los siete parámetros siendo multiplicados por un peso (ver ec. 1.2). Puesto que los valores del índice van de 23 a 260 puntos, se ha propuesto la normalización en términos de la puntuación porcentualizada, de manera que se manejen grados de vulnerabilidad en una escala de 0 - 100 (ver Fig. 1.12) (Civita y De Maio, 1997):

$$I_{vn} = 100 * (I_v - I_{v_{\min}}) / (I_{v_{\max}} - I_{v_{\min}}) \quad (1.10)$$

Donde:

I_{vn} índice normalizado

I_v índice antes del proceso de normalización

$I_{v_{\max}}$ índice máximo observado dado por el método

$I_{v_{\min}}$ índice mínimo observado dado por el método

La ec. 1.10 puede aplicarse a cualquier método, en este caso se aplicó al índice de SINTACTS.

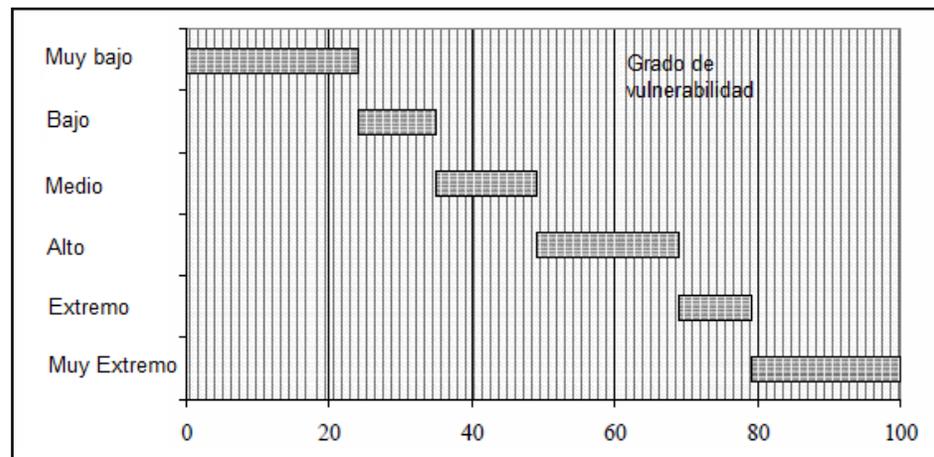


Figura 1.12. Grados de vulnerabilidad porcentualizados para el índice SINTACTS

Fuente: Sappa y Vitale, 2001

CAPITULO 2. PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA

Este capítulo presenta de manera breve los principios básicos sobre los cuales se basa la percepción remota y los sistemas de información geográfica para así identificar algunas de las aplicaciones en el área de la geología y funciones que permiten identificar los elementos de interés; por ejemplo, la identificación de lineamientos para hallar fallas geológicas.

2.1 Percepción Remota

Los métodos de percepción remota (PR) se basan en el uso de imágenes adquiridas por un sensor, como cámaras aéreas, escáner o radar, las cuales son una representación acotada del mundo real. Diferentes definiciones se han dado entre las cuales se mencionan dos de ellas:

PR es la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes que registran la interacción entre la energía electromagnética y los objetos en la superficie (Sabins, 1996).

PR es la ciencia y el arte de obtener información respecto de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand, 2004).

Como se puede observar en las definiciones mostradas se monitorean aspectos de la superficie mediante instrumentos que no están en contacto directo con los objetos medidos. Básicamente, por un sensor registra la energía electromagnética reflejada y emitida por la superficie terrestre.

2.1.1 Energía electromagnética

Las propiedades de la energía electromagnética se explican por dos modelos (Fig 2.1):

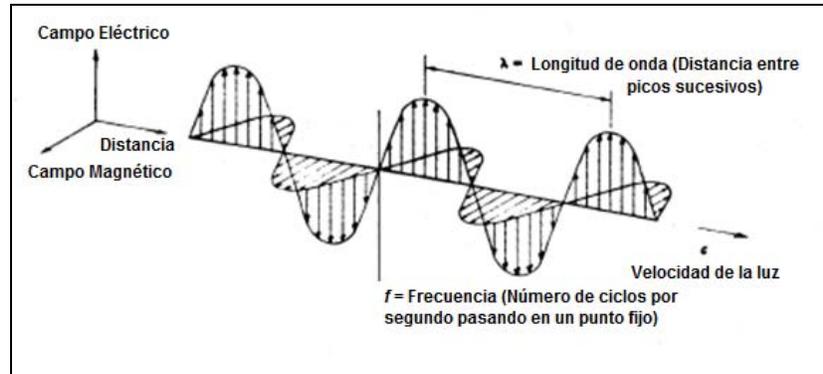


Figura 2.1. Campos eléctrico y magnético

A. Modelo de Ondas, donde la energía electromagnética se propaga a través del espacio en forma de ondas senoidales caracterizadas por campos eléctricos y magnéticos, perpendiculares entre sí y a una temperatura mayor al cero absoluto (0 K). En ambos campos, la propagación en el espacio se realiza a la velocidad de la luz.

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2.1)$$

Donde λ es la longitud de onda y se define como la distancia entre dos crestas sucesivas. La longitud de onda se mide en unidades de longitud (ej. metros, milímetros o micrómetros). ν es la frecuencia, esto es, el número de ciclos de una onda que pasa por un punto fijo sobre un periodo de tiempo específico. La frecuencia se mide en Hertz (Hz) que es equivalente a un ciclo por segundo. La velocidad de la luz, c es $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La mayoría de las características de la energía electromagnética se describe usando el modelo de onda; sin embargo, en ocasiones resulta mejor explicar la energía electromagnética en función de las unidades discretas, llamadas fotones, que la componen.

B. Teoría de partículas. La cantidad de energía de un fotón para una longitud de onda dada se define como

$$Q = h \cdot \nu \quad (2.2)$$

Donde Q es la energía del fotón (J), h es la constante de Planck ($6.6262 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) y ν es la frecuencia (Hz). De esta manera, entre mayor sea la longitud de onda, menor es el contenido de energía.

Ambas teorías se pueden relacionar resolviendo la ecuación 2.1 para ν y sustituyéndola en 2.2

$$Q = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Dado que todos los objetos con temperatura absoluta mayor de cero, irradian energía electromagnética debido a la agitación molecular, lo mismo que el Sol, la energía se desplaza en forma de ondas. La relación de la energía electromagnética y la temperatura se explica mediante el concepto de **cuerpo negro**, el cual se considera absorbe toda la energía electromagnética incidente y emite la máxima radiación a una temperatura y longitud de onda dada. De acuerdo con la ley de Planck, un cuerpo negro se describe en función de la temperatura termodinámica y la longitud de onda:

$$M_{B,\lambda} = \left(\frac{2\pi \left(\frac{hc^2}{\lambda^5} \right)}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right) - 1} \right) \quad (2.4)$$

donde:

| | |
|-----------------|---|
| $M_{B,\lambda}$ | Emitancia radiativa |
| h | Constante de Planck [6.626 x 10 ⁻³⁴ W·s ²] |
| k | Constante de Boltzmann [1.38 x10 ⁻²³ W·s ² ·K ⁻¹] |
| c | Velocidad de la luz [m] |
| λ | Longitud de onda [m] |
| T | Temperatura absoluta [K] |

La absorptividad (α) de un cuerpo es una expresión de su habilidad para absorber energía radiante y la emisividad (ε) es una característica inherente de un objeto o cuerpo. La ley de Kirchhoff define la emisividad de un cuerpo gris como la relación entre la emitancia del cuerpo gris (M) entre la emitancia de un cuerpo negro (M_B) a una temperatura dada:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_B} \quad (2.5)$$

El valor de ε es 0 a 1; donde 1 representa la emisividad de un cuerpo negro y 0 la de un cuerpo blanco que refleja al 100% la energía electromagnética.

La teoría del cuerpo negro permite evaluar la energía radiante emitida por un cuerpo en la superficie como $\alpha = \varepsilon$ cuyo valor máximo es 1. Sin embargo, los cuerpos reales presentan $\alpha \neq \varepsilon$, excepto los cuerpos grises donde $\varepsilon = \alpha$ pero con valores menores de 1, y los cuerpos opacos donde ε y α están en función de la capa superficial (Barrett y Curtis, 1999; Lillesand y Kiefer, 1994).

La relación entre la temperatura (T) y la radiación total emitida (M_B) por unidad de superficie en un tiempo dado se establece mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$M_B = \sigma T^4 \quad (2.6)$$

Donde M_B se expresa en $W \cdot cm^{-2}$, T es la temperatura absoluta (K) y σ es la constante de Stefan-Boltzmann que es igual a $5.6697 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$. La ley de Stefan-Boltzmann implica que la radiación emitida por unidad de área de un cuerpo negro caliente es mayor que la proveniente de un cuerpo negro frío. La Figura 2.2 muestra la energía emitida por longitud de onda, donde se observa que a mayor temperatura mayor contribución de longitudes de onda corta y viceversa.

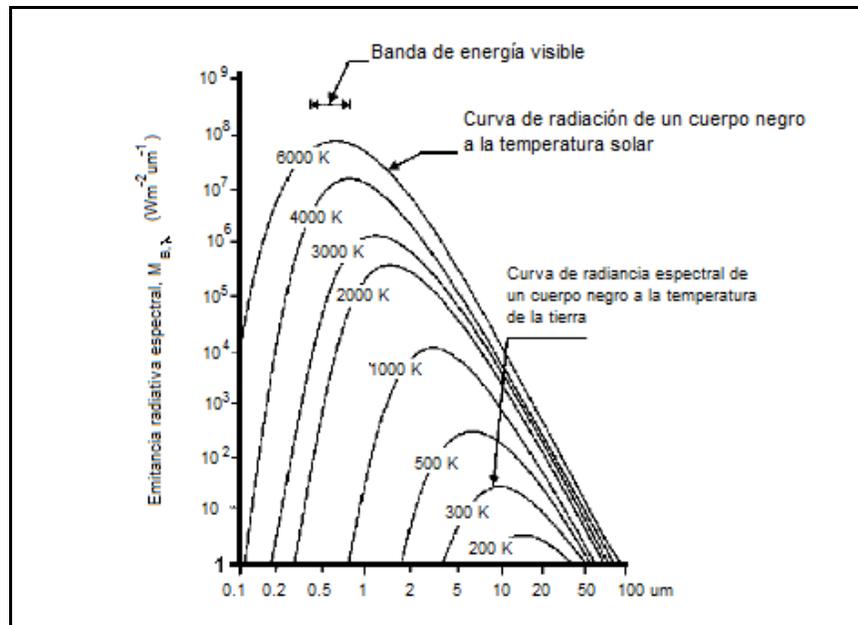


Figura 2.2. Curvas de radiación de un cuerpo negro basada en la Ley de Stefan - Boltzmann

Fuente: Chuvieco, 2000

Finalmente, la Ley de desplazamiento de Wien define la asociación entre la temperatura de un cuerpo negro y la longitud de onda de la radiación emitida, de acuerdo con:

$$\lambda = \frac{2897.8}{T} \quad (2.7)$$

Donde T es la temperatura en Kelvin (K). Con esta ley se puede seleccionar la banda más útil para identificar un objeto a una temperatura dada. Esta ecuación implica que la conversión de longitudes de onda de mayores a menores, hacen que la temperatura de un cuerpo negro se incremente. En otras palabras, el incremento de la temperatura de superficie cambia la energía electromagnética de un cuerpo negro hacia longitudes de onda menores (mayores frecuencias), lo que resulta en cambios de color (Düzgün y Demirel, 2011). La ley de Wien tiene gran relevancia en la selección de las bandas para detectar un objeto a una temperatura dada (Fig. 2.3).

El uso de las ecuaciones 2.3 a 2.7 permite identificar radiadores de difusión ideales (radiadores Lambertianos) y establecer la relación entre la radiancia espectral L_λ , y la exitancia espectral M_λ . L_λ ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) se define como el flujo de energía radiante por unidad de tiempo que atraviesa una unidad de área en un cono definido por una unidad de ángulo sólido (esteradian, sr) (Schultz y Engman 2000). La ecuación final para ejemplificar esta relación es:

$$L_\lambda = M_\lambda \cdot \pi^{-1} \quad (2.8)$$

Si el material no presenta cambios, la emisividad ε (λ) depende menos de la temperatura que de la geometría de observación.

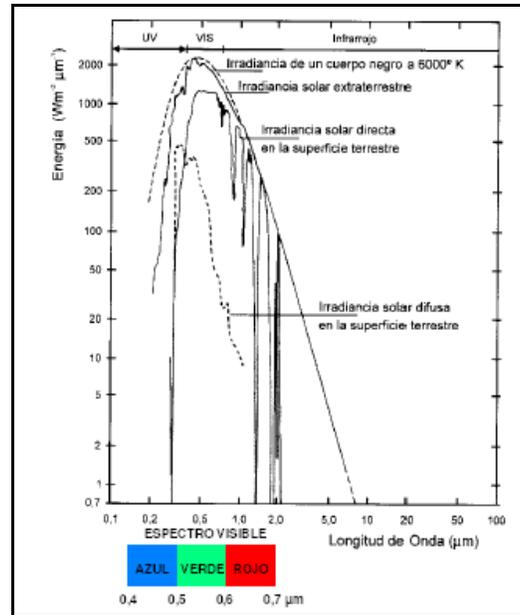


Figura 2.3. Curva de emitancia solar
Fuente: Chuvieco, 2002

2.1.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de ondas electromagnéticas (λ) en función de la longitud de onda, definida por la velocidad de la luz y la frecuencia. La percepción remota (PR) opera en diferentes regiones del espectro, la parte óptica del espectro se considera como aquella donde los fenómenos de reflexión y refracción se usan para definir la radiación. El intervalo óptico comprende desde los rayos X ($0.02 \mu\text{m}$) y pasa por la región del visible incluyendo el infrarrojo lejano ($1000 \mu\text{m}$). La porción ultravioleta (UV) tiene longitudes de onda más pequeñas (Kerle et al., 2004) Las regiones de longitud de onda más usadas en PR para la observación de la Tierra son: microondas, Infrarrojo y luz visible. La región del visible, VIS, ocupa una porción pequeña del espectro y se asocia con la luz y el concepto de percepción del color donde el azul (0.4 a $0.5 \mu\text{m}$), verde (0.5 a $0.6 \mu\text{m}$) y rojo (0.6 a $0.7 \mu\text{m}$) son los colores primarios. El espectro del infrarrojo cubre la región del cercano (IRC 0.7 a $1.3 \mu\text{m}$), medio (IRM 1.3 a $3 \mu\text{m}$) y lejano o térmico (IRL 3 a $5 \mu\text{m}$ y 8 a $14 \mu\text{m}$) (Bhatta, 2008). La Figura 2.4 muestra el espectro electromagnético.

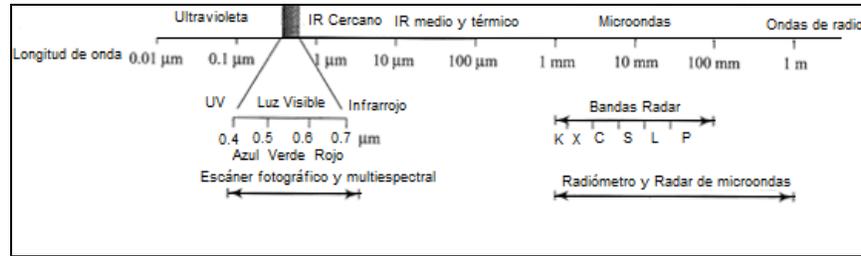


Figura 2.4. Espectro electromagnético

2.1.3 Adquisición de datos usando percepción remota

Una manera simple de entender el proceso y los componentes necesarios que intervienen en la PR es determinar su función individual en el sistema. Lillesand y Kiefer (1994) propusieron identificar los procesos para adquirir datos y los procesos para analizar los datos, así como sus componentes. De esta manera, los principales elementos para adquirir datos son los siguientes (Fig. 2.5):

- *Fuente de energía* que en caso de imágenes ópticas es el sol, fuente de energía natural, y en imágenes de microondas es una fuente artificial.
- *Transmisión de la energía en la atmósfera* es el medio que sigue la energía electromagnética desde la fuente hasta al objeto y de reversa.
- *Objeto* es el que recibe la energía electromagnética, el cual puede estar reflejando, absorbiendo o transmitiendo la energía, según sean sus propiedades. Por ejemplo diferentes tipos de vegetación, cuerpos de agua, rocas, suelos y zonas urbanas en la superficie terrestre.
- *Sensor*, es el instrumento que recibe la radiación reflejada y lo graba en formato numérico (archivo digital).
- *Estación receptora*, sensor envía la información a la estación donde la información es almacenada y procesada dando una imagen de salida.

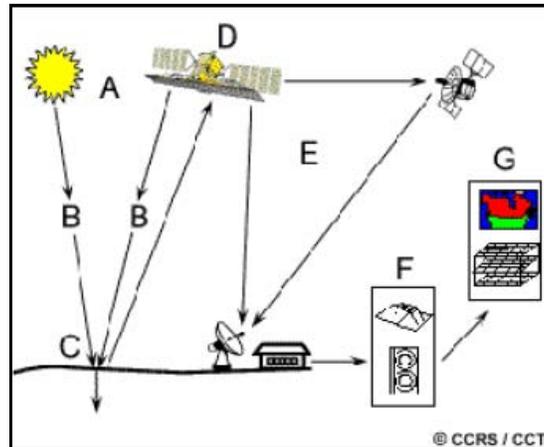


Figura 2.5. A y D= son las fuentes de emisión, B= es la trayectoria de la energía emitida, C= los objetos que recibe la energía, E= satélites envían la información a las estaciones receptoras, F= almacenamiento y procesamiento de la información G= imagen salida. Fuente: CCRS/CCT, 2010

2.1.3.1 Fuente de energía

La PR se basa en la detección de la energía electromagnética reflejada o emitida por un objeto, resultado de su interrelación con fuentes de energía. Estas fuentes de energía pueden ser naturales o artificiales. Cuando los sistemas crean su propia energía, se denominan sistemas activos, mientras que cuando se basan en una fuente externa son pasivos.

En PR, el sol es una de las fuentes de energía electromagnética gobernante y se considera como un cuerpo negro. Esto implica, que la longitud de onda de la energía emitida por los objetos (ej. rocas, suelo, bosques, océanos, edificios, etc.) se asocia a la temperatura de los objetos en la superficie a través de la ley de desplazamiento de Wien. Si la temperatura de la superficie terrestre (ej. suelo, agua, vegetación) es cercana a los 300K (27°C), la radiancia espectral máxima es de 9.7 μm , la cual corresponde a la región del infrarrojo térmico del espectro electromagnético. Esta energía es registrada mediante radiómetros o escáneres (Barrett y Curtis, 1999; Düzgün y Demirel, 2011; Schultz y Engman 2000).

Otra fuente de radiación común son los propios sistemas de radar que cubren el intervalo de longitud de onda de microondas. En los sistemas de radar activos, la energía que se propaga hacia la superficie terrestre es generada por el sistema mismo y la energía reflejada o emitida por los objetos en la superficie es medida como la energía retrodispersada. La principal ventaja de los sistemas activos es

que al tener una señal de iluminación controlada pueden operar durante noche y día y no están sujetos a la condición de la atmósfera.

2.1.3.2 *Transmisión de la energía en la atmósfera*

Un aspecto de gran interés es que independientemente de la naturaleza de la fuente de energía, toda la radiación detectada por los sensores remotos pasa a una distancia dada denominada *trayectoria de paso*. Esta trayectoria puede variar debido a las diferentes interacciones que tienen lugar en la atmósfera, como la presencia de algunos gases específicos de la atmósfera, los cuales afectan selectivamente la cantidad de energía que es transmitida denominándose *ventana atmosférica*. Engman and Gurney (1991) definen la ventana atmosférica como aquella longitud de onda donde la atmósfera tiene poco o ningún efecto en la intensidad de la radiación del Sol o en la radiación reflejada desde la Tierra.

El efecto neto de la atmósfera varía con las diferencias en la trayectoria de paso y con la magnitud de la energía a ser detectada, las condiciones atmosféricas presentes y la longitud de onda capturada. Düzgün y Demirel (2011) mencionan que para un sensor portado en una aeronave, la trayectoria y la distancia de la energía electromagnética viajando a través de la atmósfera son insignificantes, generando datos de alta calidad. No así, cuando se consideran sensores portados en plataformas satelitales, donde la energía pasa a través de toda la atmósfera (tropósfera, etc.) y donde el efecto neto de la atmósfera es significativo. Cuando la energía electromagnética debe viajar a través de la atmósfera entera, los cambios responden a tres efectos: dispersión, absorción y transmisión. La absorción y la dispersión son los principales efectos atmosféricos que están presentes en la trayectoria de paso y que atenúan la radiación electromagnética. La Figura. 2.6 muestra una representación esquemática de las diferentes interrelaciones que tienen lugar durante el viaje de la energía electromagnética a través de la atmósfera.

a) Dispersión es el cambio en la dirección de la energía. Esta redirección tiene lugar debido a la presencia de partículas o moléculas gaseosas. La cantidad de dispersión depende de diversos factores como la radiación de la longitud de onda, densidad y tamaño de partículas y gases, y distancia de la radiación viajando en la atmósfera. Para longitudes de onda en el visible, se tiene un efecto del 100% para condiciones de nubosidad y 5 % para atmósferas claras. Tres tipos de dispersión tienen lugar

Dispersión de Rayleigh, ocurre cuando el tamaño (diámetro) de las partículas suspendidas en la atmósfera son menores que la longitud de onda de la radiación. Algunos ejemplos son polvo y moléculas de nitrógeno (NO_2) y oxígeno (O_2). El efecto de la dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda: longitudes de onda pequeñas son dispersadas más que longitudes de onda largas. En ausencia de partículas y dispersiones, el cielo se vería negro. Durante el día, los rayos del sol viajan a una distancia corta a través de la atmósfera, por lo que la dispersión de Rayleigh genera que el cielo se vea azul debido a que es la longitud de onda más pequeña que el ser humano percibe. Durante el atardecer y anochecer, los rayos del sol viajan a una mayor distancia antes de alcanzar la superficie terrestre, por lo que las longitudes de onda pequeñas son dispersadas y sólo llegan las longitudes largas observando un cielo naranja o rojo.

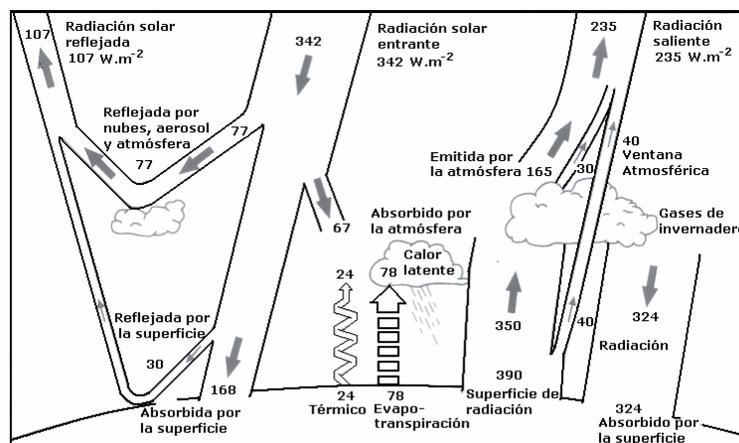


Figura 2.6. Interacción de la energía electromagnética entre la atmósfera y la superficie.

Fuente: Arnel, 2002

Dispersión de Mie, ocurre cuando la atmósfera contiene partículas suspendidas que tienen aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda del visible y cercano infrarrojo, como aerosoles que son una mezcla de gases, vapor de agua, polvo, polen, humo, etc. Este tipo de dispersión está restringido a la atmósfera baja (0-5 km) donde las partículas de mayor tamaño predominan y dominan bajo condiciones de nubosidad. Dado que todas las longitudes de onda del visible y cercano infrarrojo son dispersadas, las nubes y niebla se observan blancas. La dispersión de Mie influye el espectro de la región cercana al ultravioleta hasta el cercano infrarrojo teniendo un mayor efecto sobre las longitudes de onda largas.

Dispersión no-selectiva, tiene lugar cuando el tamaño de las partículas es mucho mayor la longitud de onda de la radiación. Partículas típicas son gotas de lluvia y polvo de mayor tamaño. Este tipo de dispersión es independiente de la longitud de onda, donde todas las longitudes de onda se pueden dispersar igualmente.

La dispersión de Rayleigh es el tipo más importante de dispersión debido a que causa distorsión de las características espectrales de la luz reflejada cuando se compara con mediciones realizadas en la superficie al sobreestimar las longitudes de onda cortas. Por ejemplo, puede limitar una clasificación exitosa al reducir el contraste en las imágenes.

b) **Absorción** implica la pérdida de energía a través de una sustancia o cuerpo como los constituyentes (gases) atmosféricos. Los principales gases son ozono (O_3), dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O). La energía de radiación retenida por la sustancia o cuerpo es transformada en energía calorífica y re-emitida a una longitud de onda mayor. En la superficie terrestre, la habilidad para absorber esta energía calorífica está determinada por la emisividad y es medida a través de ventanas atmosféricas. El calor emitido de la superficie de la Tierra se registra en ventanas de 3 a 5 μm y de 8 a 14 μm mediante escáneres térmicos. Escáneres multispectrales miden simultáneamente múltiples intervalos de longitud de onda específicos, los cuales pueden ubicarse en varios puntos de la región entre el visible y el infrarrojo térmico (Lillesand y Kiefer, 1994).

c) **Transmisión** es la energía electromagnética directamente pasando a través de una ventana atmosférica (Düzgün y Demirel, 2011). La habilidad de un objeto con un cierto espesor para transmitir energía electromagnética se expresa por la transmitancia cual se define como la relación de la energía transmitida con respecto a la energía incidente. Lillesand y Kiefer (1994) definieron la transmisión de la energía en cualquier medio como la relación inversa del producto del espesor de la capa y su coeficiente de extinción, el cual combina los efectos de absorción y dispersión por partículas. Esto es, al acumularse los efectos de dispersión y absorción, la transmitancia decrece.

2.1.3.3 *Interacción de la energía en la atmósfera*

La evaluación de la energía incidente y su interacción con el objetivo a ser registrado es fundamental para determinar las características de la superficie a

través de la atmósfera. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, la energía incidente se divide en diferentes fracciones: reflejada, absorbida o transmitida (Fig. 2.7).

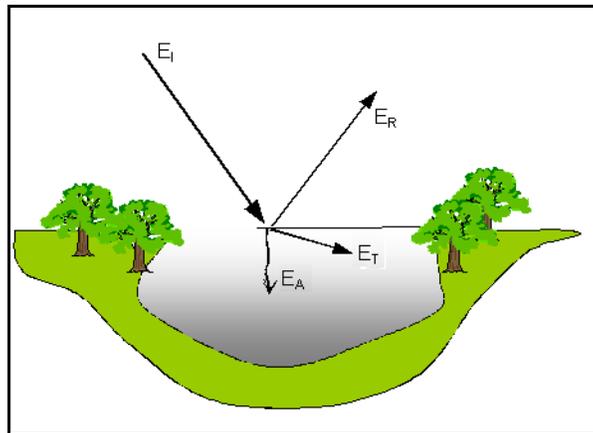


Figura 2.7. Procesos que tienen lugar cuando la energía electromagnética interactúa con la superficie terrestre

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (2.9)$$

Donde:

E_I : energía incidente

E_R : energía reflejada

E_A : energía absorbida

E_T : energía transmitida

La cantidad de energía que se presenta en cada forma depende de las características del objeto en la superficie, de la longitud de onda de la energía incidente y el ángulo al cual el objeto en la superficie es iluminado por la fuente (Düzgün y Demirel, 2011; Lillesand y Kiefer, 2000).

La reflexión se define como la redirección de la luz después de golpear una superficie opaca, así la cantidad de reflexión depende de la rugosidad de la superficie y la longitud de onda de la energía incidente. En general, la atmósfera se presentan dos tipos de reflexiones: por partículas y por superficies continuas que pueden asociarse en la superficie a la textura del suelo y al mar, respectivamente. La geometría del objeto por registrarse es importante y debe considerarse la superficie misma y la orientación que tiene el objeto, lo que define el tipo de reflectores: especular y difuso (Fig. 2.9). Los reflectores especulares son objetos semi-planos (con muy pequeñas irregularidades) que actúan como

espejos y el ángulo con el que se refleja la energía es igual al ángulo incidente (retrodispersión). Los reflectores difusos presentan superficies rugosas que reflejan uniformemente en todas direcciones. En una reflexión difusa perfecta (caso ideal), toda la energía incidente se dispersa proporcionalmente en todas direcciones. Otras superficies que pueden generar una reflectancia difusa se denominan superficies lambertianas.

La mayoría de los objetos en la superficie terrestre presentan ambos tipos de reflexión. La reflectancia difusa genera el color de los objetos registrados (Lillesand y Kiefer, 2000) y la forma en que los objetos son vistos a diferentes longitudes de onda (Düzgün y Demirel, 2011). Al final, las diferentes contribuciones a la radiancia espectral reflejada, $E_{R,\lambda}$, se muestra en la ecuación. 2.10.

$$E_{R,\lambda} = L_{p,\lambda} + L_{r,\lambda} + L'_{r,\lambda} \quad (2.10)$$

donde:

$E_{R,\lambda}$: radiancia espectral total reflejada

$L_{p,\lambda}$: radiancia dispersada en la atmósfera en dirección del sensor

$L_{r,\lambda}$: radiancia que llega al objetivo en la superficie terrestre con reflectancia $r_{s,\lambda}$

$L'_{r,\lambda}$: radiancia reflejada de las aéreas adyacentes al objetivo

Para un análisis cuantitativo la reflectancia espectral de la superficie, $r_{s,\lambda}$, o albedo, es requerido pues representa la relación entre la energía reflejada por el objeto ($L_{s,\lambda}$) y la energía incidente sobre el objeto (E_i).

$$r_{s,\lambda} = \frac{\pi L_{s,\lambda}}{E_{dir,\lambda} + E_{dif,\lambda}} \quad (2.11)$$

Donde $L_{s,\lambda}$ es atenuada en la atmósfera en un espesor óptico $\tau_\lambda(0,\infty)$; de manera que cuando llega al sensor se tiene

$$L_{r,\lambda} = L_{s,\lambda} \exp\left[\frac{-\tau_\lambda(0,\infty)}{\cos\theta_r}\right] \quad (2.12)$$

Por lo general, los valores promedio de albedo (medidos en $W \cdot m^{-2}$) son usados debido a que es un promedio de los factores de reflectancia en todas las bandas

espectrales, ponderando por el flujo de energía radiante que llega a cada banda (Irons et al., 1988).

2.1.3.4 Sensores

Una vez que se tiene en cuenta el efecto de las ventanas atmosféricas y los intervalos del espectro involucrados, el sensor que registra la energía reflejada o emitida debe elegirse cuidadosamente.

Los sensores detectan y registran la energía electromagnética reflejada, absorbida o emitida de los objetos los cuales están en línea de vista o en el campo de vista instantáneo (IFOV, por sus siglas en inglés) en el sensor. La mayoría de los sensores se basan en principios electro-ópticos y registran la energía reflejada en varios intervalos del espectro electromagnético generando curvas de reflectancia espectral de las diferentes cubiertas como agua, suelo, vegetación, nieve y desierto entre otros determinados por las diferentes propiedades de los objetos en la superficie terrestre. El calor emitido por los objetos debido a la interacción de la energía electromagnética con los objetos en la superficie es percibido por radiómetros que registran la porción del infrarrojo del espectro electromagnético. La absorción de la energía electromagnética es registrada por sensores usados en estudios meteorológicos para detectar CO₂, ozono y vapor de agua. La porción de microondas del espectro electromagnético permite la transmisión directa de la energía por tanto los sensores activos como los radares proveen la detección de nubes y precipitación; así como, determinar diversas características de la Tierra como la rugosidad superficial, la humedad de suelo, etc.

Dado que energía electromagnética reflejada, absorbida y transmitida por los objetos en la superficie terrestre varían en función del objeto y sus propiedades superficiales; la percepción remota provee información distinguiendo entre diferentes características; por ejemplo, empleando imágenes de radar activos se observa la arena de una playa lisa, mientras que al emplear sensores ópticos la misma arena se observa rugosa (Düzgün y Demirel, 2011).

Esta elección del sensor además de la interacción energía y el objetivo requiere:

- (1) sensibilidad espectral
- (2) presencia o ausencia de ventanas atmosféricas en los rangos de bandas espectrales

- (3) Establecer la fuente, magnitud y composición espectral de la energía disponible en los rangos seleccionados

De acuerdo con estos tres puntos, se tienen los sensores más empleados en percepción remota registrando longitudes de onda en: visible, infrarrojo, térmico y microondas (Fig. 2.8). La mayoría de los sensores que registran la energía reflejada son de tipo electro-ópticos, y está equipado con un sistema de detectores calibrados o filtros diseñados para seleccionar las longitudes de onda según sea su caso.

Es importante diferenciar entre la energía que llega a la superficie, energía incidente, como la irradiancia, de la energía que sale del sistema o energía reflejada como radiancia. Ambas irradiancia y radiancia se expresan en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. Así, los sensores registran la cantidad de radiación como la cantidad de energía que es convertida en bits en función de la respuesta recibida de la superficie.

Las mediciones de la energía electromagnética se realizan por sensores portados a una plataforma estática o en movimiento. Una plataforma es un vehículo usado para una actividad particular o propósito o para transportar equipos e instrumentos.

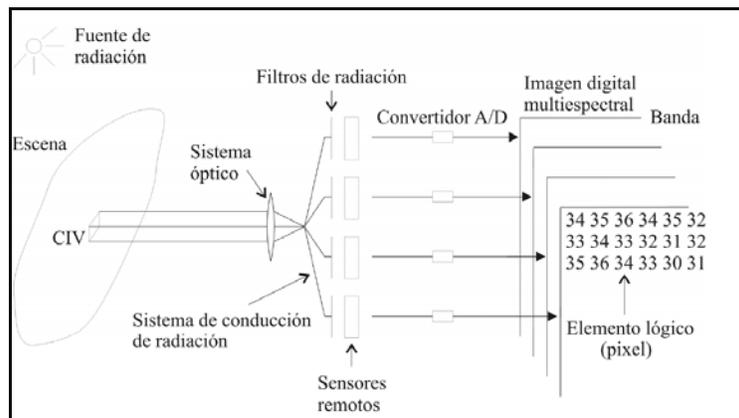


Figura 2.8. Campo instantáneo a la vista (CIV).

Fuente: Lira, 2010

Los sensores pueden dividirse en dos grupos sensores pasivos y sensores activos. Los primeros dependen de una fuente externa como el Sol, o incluso en algunos casos la Tierra. El espectro que cubren va desde 1 picómetro (rayos gama) hasta 1 m (microondas). Los sensores activos cuentan con su propia fuente de energía. Las mediciones por sensores activos no dependen de las condiciones

de iluminación por lo que son más controlables e incluye el intervalo de radar (detección y alcance de ondas de radio), lidar (detección y alcance de luz) y sonar (navegación del sonido) (ITC, 2004).

La Tabla 2.1 muestra diferentes categorías de los instrumentos portados en los satélites, su región espectral y su principal aplicación (Schultz y Engman, 2000). La ventaja de estar en aeronaves, comparado con satélites, es la capacidad para producir imágenes con una resolución espacial alta (20 cm o menos). La desventaja es que cubren un área pequeña y el costo es alto, lo contrario de algunos sensores portados en satélites los cuales tienen una extensa cobertura y se pueden conseguir a un precio relativamente económico. En general, los satélites en órbitas altas proveen datos con una baja resolución espacial (1 km tamaño de píxel), como es el caso de MODIS, NOAA, GOES. Satélites con resolución media (20-30 m tamaño de píxel) son Landsat y ASTER y de resolución alta (>10 m tamaño de píxel) como SPOT, IKONOS o QuickBird.

La selección del tipo de resolución espectral y espacial deberá estar ligada a la resolución espectral que se busque, y ambas en función del tipo de objetivo que se persiga en el análisis de la superficie terrestre (Shultz y Engman, 2000). Por lo que la combinación sensor-plataforma es un factor determinante del tipo de información registrada. Las plataformas fijas se emplean para obtener información detallada de áreas muy pequeñas de la superficie terrestre. La información disponible es altamente precisa y de buena calidad al estar libres o casi libres de las interacciones con la atmósfera.

Las principales plataformas en movimiento son las aeronaves y satélites. Las aeronaves incluyen aviones, helicópteros, globos, cometas, vehículos ligeros no tripulados, etc. Dependiendo de la plataforma y el sensor, las observaciones se pueden lograr a altitudes menores de 100 m y hasta 40 km.

Algunos de los satélites usados para observaciones terrestres se encuentran en órbitas entre 150 y 36,000 km de altitud. La selección del tipo de plataforma deberá responder a los objetivos que se persigan, en particular, si se requieren observaciones continuas de áreas extensas o bien observaciones puntuales de pequeñas áreas.

Las plataformas disponibles se encuentran en función de su órbita y se clasifican en dos tipos principales (Chuvienco, 2002):

Tabla 2.1. Categorías de sensores observando la superficie terrestre portados en satélites

| Tipo de Instrumento | Región espectral | Resolución Horizontal | Principal aplicación |
|--|------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Cámara fotográfica | VIS | 3-10 m | Mapeo de la superficie |
| Escáner multiespectral | VIS, SIR | 6-80 m | Mapeo de la superficie |
| Escáner multiespectral | VIS | 1-20 m | Mapeo topográfico |
| Espectrómetro | VIS, SIR | 0.25-1 km | Vegetación, geología, agua |
| Escáner de resolución media | VIS, SIR, TIR | 0.5-5 km | Superficie terrestre, nubes |
| Lidar Atmosférico | Active IR | 0.1-1 km | Propiedades atmosféricas |
| Radiómetro | VIS, SIR, TIR | 20-200 km | Balance de radiación |
| Sonar Atmosférico | TIR, MW | 10-100 km | Perfiles atmosféricos |
| Sonar Limb | TIR, MW | > 300 km | Gases traza atmosféricos |
| Radiómetro de escaneo MW | MW | 10-100 km | Tierra, océano, atmósfera |
| Imágenes de Radar | Active MW | 10-30 km | Tierra, océanos, nieve |
| Escatómetro | Active MW | 25-50 km | Velocidad del viento sobre océanos |
| Radar nubes/lluvia | Active MW | 5 km | Nubes, precipitación |
| Altímetro | Active MW | 1-5 km | Océanos y topografía de nieve |
| VIS: Visible, Infrarrojo; SIR: Solar; TIR: Térmico; y MW: Microondas | | | |

- Geosíncronicos o Geoestacionarios: se encuentran colocados en órbitas muy alejadas (36 000 Km) lo que permite sincronizar al movimiento de la tierra y moverse en la misma dirección, son capaces de registrar áreas de cobertura (1/3 de la superficie de la tierra) cada 30 minutos y observando siempre la misma zona. Su desventaja son algunas dificultades técnicas debido a la órbita alta y la cobertura en los polos reducida. Su principal uso son las telecomunicaciones y la climatología (Chuvienco, 2002). En estos se encuentran los satélites Meteosat, GOMS, Insat o GOES. Por ejemplo, la resolución espacial de Meteosat en su banda 1 es de 2.5 Km. x 2.5 Km. y en sus bandas 2 y 3 de 5.0 Km. x 5.0 Km.
- Heliosincrónicos: se encuentran colocados en órbitas cercanas con una inclinación entre 98 y 99 grados. Pasa por el ecuador al mismo tiempo solar cada día, lo que lo hace útil para análisis comparativos de datos multitemporales (Chuvienco, 2002). Este tipo de plataformas tienen la facilidad tecnológica y económica para obtener un desempeño adecuado

de los sensores, pero su área de cobertura es baja y existe una pérdida de datos por efectos climatológicos (ej. nubosidad). Las plataformas que se encuentran entre este tipo de satélites son: LANDSAT, TERRA, SPOT e IRS.

2.1.3.5 *Formato de las imágenes*

La información registrada por los sensores se puede proporcionar en formato análogo (fotografía aérea) y digital (imágenes de satélite). Datos digitales pueden ser registrados en una película fotográfica para obtener datos análogos, o bien los datos análogos pueden ser transformados en digitales usando escáneres. El término de imagen se asocia a datos en una fotografía, por lo que se cuenta con datos analógicos y digitales al mismo tiempo; sin embargo, las imágenes no siempre son fotografías, en especial cuando se trata de sensores infrarrojos.

Para extraer información útil se deben emplear técnicas de pre-procesamiento. La conversión de datos digitales a datos analógicos se basa en la separabilidad de los valores medidos de reflectancia en incrementos binarios. Los detectores de los satélites registran la cantidad de energía reflejada en bits y se representan por píxeles (picture element, en inglés) donde el rango de valores va de 0 a 255 (8 bits) representando 255 la brillantez y 0 los píxeles oscuros (Lira y Maletti, 2002).

La calidad de la imagen estará determinada, en primer lugar, por las características del sistema sensor-plataforma. Básicamente, una imagen se caracteriza por la información que proporcionan:

- *Espacial*, se define en función del tamaño del píxel y el área que cubre, lo que representará el objeto en la superficie.
- *Espectral*, refiere a las longitudes de onda a las cuales es sensible el sensor y que servirán para definir un objeto y sus alrededores
- *Radiométrica*, incluye a los niveles de energía medidos por el sensor, y
- *Temporal* al tiempo de adquisición

Las características espaciales y espectrales deben además definirse en función por la cobertura y su resolución que es el menor tamaño físico en la superficie y el menor intervalo del espectro que pueden registrar, respectivamente. Cuando un intervalo del espectro electromagnético es registrado en una imagen la cual tiene diferentes tonalidades de grises se denominan pancromáticas. Otros sensores

pueden registrar varios intervalos del espectro proporcionando un conjunto de imágenes, las cuales son multiespectrales.

2.2 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Folger (2009) define al SIG como un sistema a través del cual se puede capturar, almacenar, analizar (*manejar, procesar, integrar*) y *desplegar información geocientífica referida a un espacio*.

Aunque existen sistemas (software) que integran todas las funciones de un SIG, es necesario conocer la manera en que los datos son compilados, las rutinas necesarias para organizarlos y como se modifican los programas para satisfacer las necesidades de un proyecto. Así, la infraestructura (hardware) básica para un SIG deberá considerar que hospedará al software propio del SIG pero además deberá contar con la capacidad requerida para el almacenamiento y procesamiento de la información y los programas para ello. Por lo anterior, se debe contemplar el uso del sentido común, así como de capacidades (infraestructura) que contribuyan a lograr una inter-operatividad. Esta misma inter-operatividad puede ser llevada a la Web a través de visualizadores los cuales facilitan el desarrollo y uso de la información geoespacial (Bernhardsen, 1999; Demers, 2004) como se muestra en la figura. 2.9.

De esta manera, un SIG es un sistema basado en un sistema computacional que permite el estudio de fenómenos naturales y antropogénicos que tengan un comportamiento explícito en el espacio. Diferentes campos de investigación han empleado este tipo de herramientas como: ciencias del suelo, manejo de agricultura, fuentes de agua y bosques, planeación urbana, geología, exploración mineral, catastro y monitoreo ambiental.

Los datos geográficos se analizan en tres etapas:

- **Preparación y entrada.** Es la etapa inicial donde los datos para estudiar un fenómeno son colectados y preparados para ingresarlos al sistema
- **Análisis.** La etapa intermedia en la cual los datos colectados se revisan cuidadosamente y se cruzan para obtener información útil.
- **Presentación.** La etapa final en la cual los resultados iniciales son presentados en una manera apropiada según el fenómeno estudiado.

Datos espaciales o datos geoespaciales son aquellos que contienen valores posicionales relativos a la superficie de la Tierra o están georeferenciados. A diferencia de información que refiere a la interpretación de los datos espaciales. Los datos al ser preparados para prestar conocimiento sobre un fenómeno se agrupan en bases de datos, las cuales deben contener los datos bajo formatos específicos. Dichos formatos son conocidos como metadatos, los cuales se rigen por la International Standard Organización (ISO).

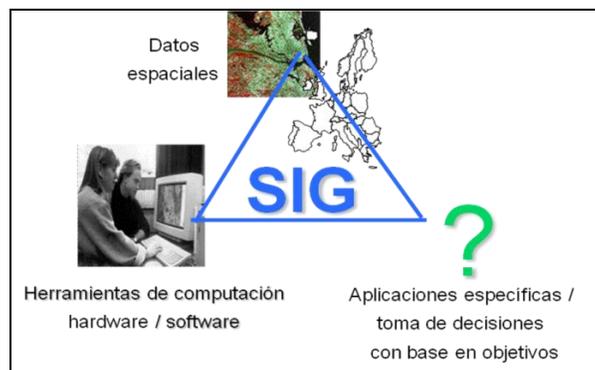


Figura. 2.9. Componentes del Sistema de Información Geográfica

Al estar la descripción completa de un fenómeno en función de los elementos que se tienen para caracterizarlo. El espacio geográfico puede contener un fenómeno que tiene un valor en una región o bien una localidad. En general, en el campo geográfico se tienen objetos (geográficos), los cuales están bien definidos. El espacio geográfico puede ser discreto y continuo. De hecho, se considera que un fenómeno natural se identifica en un campo geográfico, mientras que un fenómeno hecho por el hombre se distingue por objetos (ITC, 2004).

Como se indicó, el espacio geográfico puede ser continuo o discreto. En el primer caso se considera que los valores que caracterizan dicho espacio son graduales como es el caso de la temperatura del aire o la presión barométrica, entre otros. Que exista continuidad, la cual es diferenciable o medible por unidad de distancia y en cualquier dirección. En el segundo caso, un campo discreto puede contener un espacio dividido pero que una parte tenga valores similares. Por ejemplo, un espacio discreto pueden ser clases geológicas, tipo de suelo, tipo de uso de suelo, tipo de cobertura vegetal todas ellas empleadas para definir un espacio continuo representado por la clasificación del suelo.

2.2.1 *Generación de las bases de datos*

El SIG se integra con hardware, software y la base de datos geográficos que permite el diseño del sistema, para llevar a cabo la captura, almacenamiento, manipulación, análisis y despliegamiento en todas sus formas espaciales (Fig. 2.9). El software se refiere a las funciones y herramientas para trabajar con los atributos o características de los datos (gráficos y no gráficos) y los elementos geográficos que ofrecen los mapas. Los atributos gráficos son representaciones de objetos geográficos con una ubicación específica (puntos, líneas y polígonos) obtenidos a partir de la generación y manejo de bases de datos.

De esta manera, se establece que una de las funciones del SIG es relacionar la base de datos con información geográfica, a partir de un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital, conocido como atributos. Otra de las ventajas importantes del software es separar la información en diferentes capas temáticas y almacenándolas en forma independientemente, permitiendo trabajar de manera organizada, rápida y sencilla, lo cual ayuda a realizar localización, rutas, modelación, etc., de la información.

Los datos geográficos son representados y almacenados en dos formas tipo ráster y vectorial, los primeros conocidos también como estructura grid son la representación de una zona específica que divide el espacio en celdas regulares conocidas como píxel donde cada una de ellas representa un único valor. El espacio geográfico se compone por filas y columnas que son referidas a un sistema de coordenadas, ejemplo de estos datos son las imágenes de satélite (Landsat, Spot, Modis, etc.), Ortofotos, Modelos Digitales de Elevación (MDE) por mencionar algunos. La información ráster puede ser almacenada en diversos formatos como TIFF, JPG, sistemas binarios (BLOM).

Los datos de tipo vectorial representan las características de los objetos donde uno de los intereses es la localización de los elementos donde los fenómenos a representar tienen límites definidos. Cada uno de estos elementos geométricos están vinculados con a una fila de la bases de datos que contiene los atributos. Estos datos pueden ser creados respetando límites territoriales a partir de la aplicación de reglas topológicas como:

1. Puntos, se utilizan la ubicación de objetos como por ejemplo las ubicaciones de los pozos, picos de elevaciones o para la representación

geográfica de zonas a una pequeña escala, por ejemplo las ciudades en un mapa del mundo.

2. Líneas o polilíneas, esta geometría es usada para representar objetos con rasgos lineales como ríos, caminos, ferrocarriles, rastros, o líneas topográficas.
3. Polígonos, representan elementos geográficos que cubren un área particular de la superficie de la tierra, por ejemplo, lagos, edificios, provincias, usos del suelo.

El último elemento fundamental del SIG es la base de datos geográfica que contiene extensiones que permiten el almacenamiento, organización, consulta y manipulación de la información; el principal beneficio de éstas es conjuntar diferentes tipos de bases de datos.

Puesto que las información varía en tipo y características con respecto a una posición geográfica, ésta estará en función de una escala de manera que los datos para pequeñas escalas sobre extensas áreas tendrán un gran (1:5,000) o mediano (1:25,000) detalle, mientras que una escala regional o nacional implica datos con menor detalle (1:25,000-1:100,000) y aún un menor detalle para una escala global (1:1'000,000). Finalmente, los datos también estarán sujetos a la temporalidad con la que se hayan generado.

2.2.2 *Estableciendo una posición*

Un factor determinante en un SIG es la calidad de los datos que se ingresan al sistema, en particular atendiendo a la precisión requerida la cual se define como *lo más cercano de observaciones, cálculos, composiciones o estimaciones a los valores verdaderos o lo más parecido a la realidad* (NMD_USGS, 1990). Aunque la precisión no se restringe a establecer las coordenadas (error posicional) sino que incluye la medición cuantitativa de los atributos de los datos, la posición y en ciertos casos la elevación se toman como un parámetro de control considerando puntos libres de error (puntos obtenidos con sistemas GPS).

La precisión con la cual se define la posición, las etiquetas (clases) y la variación temporal son factores importantes que deben cuidarse, al igual que la información que proporcione la historia de los mismos datos, para lo cual se presentan los metadatos.

Al combinar en un SIG datos espaciales con datos espaciales globales obtenidos en mapas publicados con coordenadas establecidas con posiciones satelitales, es necesario manejar conceptos de referencia espacial. Algunos de estos conceptos implican conocer la construcción física/geométrica del medio, esto es, describir la geometría y movimiento de los objetos cerca o en la superficie. Esta descripción es definida en un sistema coordinado de referencia donde se establece con precisión el origen y orientación de los ejes coordinados ortogonales al cual se le denomina Sistema de Referencia Espacial (SRE). Existen diversos sistemas siendo uno de los más importantes el International Terrestrial Reference System (ITRS) realizado a través del International Terrestrial Reference Frame (ITRF), el cual es un catálogo de coordenadas estimadas.

Un marco de referencia espacial significa relacionar la rotación, traslado y deformación del polihedron (abstracción geométrica de la forma de la Tierra a un epoch). Sin embargo, no sólo es necesario definir un ITRF sino que se necesita describir en 3D (horizontal y verticalmente) la superficie terrestre. Para ello, se definen geoides y datum vertical, el primero establece una misma referencia de elevación en cualquier superficie terrestre considerando el nivel del mar como cero y el segundo considera líneas paralelas al geoide pero separadas entre sí, dicha separación es debida a variaciones locales como corrientes oceánicas, olas, vientos costeros, temperatura y salinidad del agua.

El geoide representa la altura de una superficie de referencia pero es una representación física y para lograr la descripción completa de la superficie es necesaria una representación de las coordenadas horizontales de los puntos de interés de tipo matemática que proporcione el nivel del mar a escala local. Esta representación se logra con un elipsoide rotacionalmente simétrico (Fig. 2.10).

El elipsoide es posicionado y orientado con respecto al nivel medio del mar mediante la adopción de una latitud (ϕ), longitud (λ) y altura (h) de un punto dado y un azimut a un punto adicional. De esta manera, el datum horizontal se define por una dimensión, coordenadas geográficas, elevación y un azimut.

Los datum vertical y horizontal se pueden establecer globalmente no sólo local, de manera que un elipsoide geocéntrico como el Geodetic Reference System (GRS) puede ser empleado por diferentes usuarios (ej. GRS80 o el World Geodetic System - WGS84). El sistema de coordenadas geográficas determina la posición

de la superficie terrestre utilizando dos coordenadas angulares alineadas al eje de rotación de la tierra: Ecuador y Meridiano de Greenwich (Fig. 2.11).

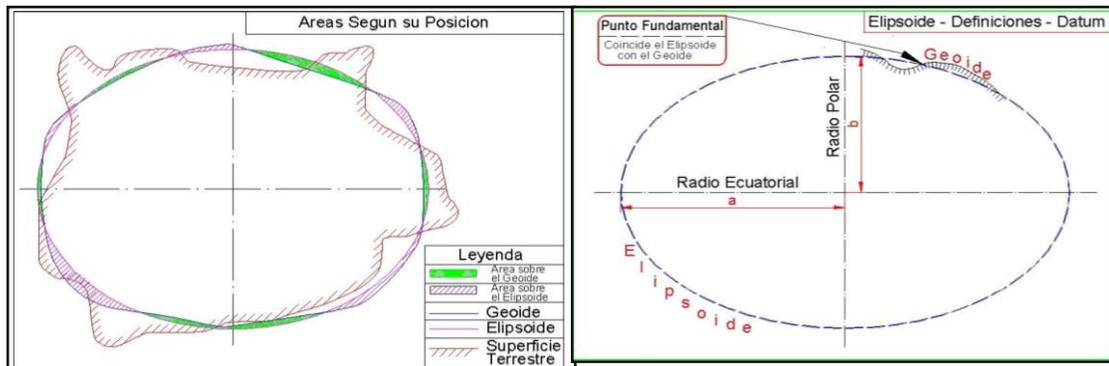


Figura 2.10. Geoide y elipsoide para una región específica
Fuente: Fernández-Coppel, 2001

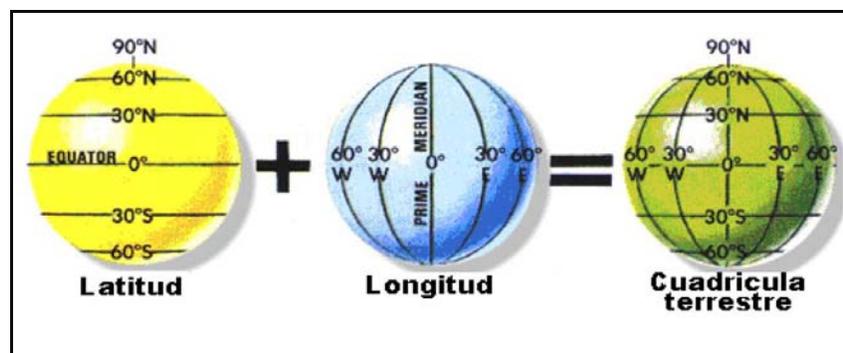


Figura 2.11. Formación de la cuadrícula terrestre
Fuente INEGI, 2007.

Pese a la representación geográfica lograda, un mapa proyectado se asocia con distorsiones, principalmente al tratar de poner en un plano una elipse o esfera. Para visualizar proyecciones geométricas sobre un plano se puede considerar un plano azimutal o una superficie intermedia, la cual se describe comúnmente por conos y cilindros.

La proyección Universal Transversa Mercator (UTM) es un sistema cilíndrico transversal conforme (conservan los ángulos), tangente al globo terráqueo a lo largo de un meridiano, que se elige como meridiano de origen. Esto es, se refiere a una proyección sobre un plano, en que se hace pasar un cilindro tangente a una esfera o elipsoide (que se considera como la forma de la Tierra) a lo largo del Ecuador. Se denomina transversal debido a que la tangencia no es realizada

sobre un paralelo, como se hace en la Proyección Mercator, si no sobre uno de los meridianos, siendo ese meridiano la única línea automecica de dicha proyección. La distancia entre los paralelos aumenta a medida que se alejan de la línea del Ecuador hacia los polos. Para eliminar la distorsión, cada zona sólo tiene 6° de longitud, luego el meridiano central de la zona está en 3° donde la distorsión es mínima. El sistema de coordenadas formado por la proyección del Ecuador, que forma el eje X y la proyección del meridiano tomado como tangencia, que constituirá el eje Y, es cartesiano. El plano cartesiano forma una red de cuadrícula, dividida en 60 partes iguales y cada división tiene una longitud de 6°, a que se le llama huso, lo que equivalen a 500,000 m, se tiene como referencia el antimeridiano de Greenwich en sentido Oeste–Este. Este sistema de proyección es uno de los más fáciles, ya que las medidas son en metros (Fig. 2.12) (INEGI, 2007). México está dentro las zonas UTM de la 11 a 16.

El elipsoide es posicionado y orientado con respecto al nivel medio del mar mediante la adopción de una latitud (ϕ), longitud (λ) y altura (h) de un punto dado y un azimut a un punto adicional. De esta manera, el datum horizontal se define por una dimensión, coordenadas geográficas, elevación y un azimut.

Los datum vertical y horizontal se pueden establecer globalmente no sólo local, de manera que un elipsoide geocéntrico como el Geodetic Reference System (GRS) puede ser empleado por diferentes usuarios (ej. GRS80 o el World Geodetic System - WGS84). El sistema de coordenadas geográficas determina la posición de la superficie terrestre utilizando dos coordenadas angulares alineadas al eje de rotación de la tierra: Ecuador y Meridiano de Greenwich (Fig. 2.11).



Figura 2.12. Proyección UTM.
Fuente: Fernández-Coppel, 2001

2.3 Aplicaciones de PR y SIG en Geología

En geología las aplicaciones se han dado de manera que los datos proporcionen información semicuantitativa, cuantitativa y cualitativa para delinear y definir aspectos hidrológicos, tipo de suelo, estructura regional y distribución de aspectos geomórficos y geológicos superficiales y subsuperficiales.

Hoy en día, la disponibilidad de diferentes tipos de información adquirida remotamente como las imágenes de satélite permiten caracterizar aquellas áreas con algún grado de potencial minero o bien identificar características geológicas. Algunas de estas características litológicas, estructurales, geofísicas, y tectónicas, pueden ser definidas, o bien ser ingresadas al análisis como información vectorial disponible de mapas temáticos o específicos del tema (Johnson y Peterson, 1988).

Una desventaja importante al analizar características geomórficas o geológicas es la estacionalidad ya que se puede encontrar en época seca, vegetación esparcida con una diferencia de tonalidades del suelo tenue, haciendo casi imposible identificar las principales unidades estratigráficas. En cambio en época húmeda con vegetación densa, las variaciones de color en la superficie son importantes debido a la litología de la roca madre. Algunas causas para una mejor observación en época de lluvia, es que las precipitaciones limpian la atmósfera y el suelo del polvo. Asimismo, la humedad del suelo favorece las diferencias de color y tono entre los diferentes tipos de roca y, dado que la vegetación crece de manera homogénea en cinturones donde el tipo de suelo contiene mayor humedad, la presencia de tonalidades no-homogéneas permite delinear patrones geológicos. Sin embargo, algunos defectos o marcas en la imagen pueden confundirse con características normales pero su identificación es crucial y mediante el uso de otras imágenes o de mapas geológicos se puede comprobar su naturaleza. En particular, los lineamientos pueden ser confundidos con la estela que los aviones dejan o con caminos en la superficie. Si bien la mayoría de los lineamientos están asociados a fallas o desplazamientos estructurales, esto no es un requerimiento estricto. Por ejemplo, largos lineamientos topográficos pueden estar definidos pero no depender de la litología. Otros lineamientos se presentan en zonas donde la corteza es frágil y pese a que no se presenten desplazamientos, las rocas pueden estar fuertemente fracturadas o susceptibles a erosión. Los lineamientos que coinciden con errores estructurales se denominan fallas. Los lineamientos son apreciables en imágenes de satélite tipo Landsat

debido a su bajo ángulo solar, la supresión de detalles espaciales y su cobertura regional (Sabins, 2007; Battha, 2008).

La ventaja de emplear un sistema SIG, es el empleo de las imágenes junto con cartas geológicas e información de campo que proporcione un registro discreto con valores discontinuos (p.ej. tipo de roca y suelo, etc.) Puesto que las fallas o lineamientos en el SIG son objetos que están en un espacio geográfico más no en el espacio geográfico real, cada falla tiene una ubicación en una dimensión (longitud), y adicionalmente se puede considerar su orientación.

2.4 Pre-procesamiento de imágenes

Una imagen digital consiste en un arreglo de elementos 2D, esto es, de igual tamaño llamado píxel. El arreglo espacial de los registros define la imagen o espacio de la imagen, por lo que dependiendo del sensor, los datos se registran en n bandas. Así para un píxel, los valores en dos bandas pueden arreglarse como componentes en un vector 2D, conocido como vector característico. En el caso de tres bandas estas corresponderán a una gráfica tridimensional donde los valores de cada vector son llamados espacio característico. Este espacio permite generar nuevas imágenes aplicando transformaciones lineales a una o varias imágenes. Las nuevas imágenes representan una descripción alternativa de los datos, en la cual los números digitales (ND) de un píxel están relacionados con sus ND originales mediante esa transformación lineal. La imagen transformada puede destacar ciertas características que no era posible discernir en los datos originales o, alternativamente, preservar la información esencial contenida en la imagen en un número menor de dimensiones. Las transformaciones pueden llevarse a cabo para realizar un mejoramiento de la imagen (una simple mejora visual hasta la restitución por distorsiones geométricas, presencia de dispersión, contaminación por píxeles o degradación ocasionada por cualquier otro factor) o un análisis previo a la aplicación de técnicas de clasificación (Ferrero et al., 2002).

Algunas de las correcciones efectuadas a las imágenes, se presentan a continuación.

2.4.1 Corrección atmosférica

Conocer las condiciones de la atmósfera en el momento que fue tomada la imagen o su determinación implica identificar diversos parámetros atmosféricos y

climáticos que por lo general no están disponibles. Las variaciones pueden proporcionar zonas con mayor afectación que otras debido a la presencia de aerosoles, partículas con diámetros mucho más pequeños que la longitud de onda de la radiación (dispersión de Raleigh), partículas esféricas con diámetros similares a la longitud de onda (dispersión de Mie) y partículas de mayor tamaño que la longitud de onda (dispersión no selectiva) como se vio en la sección 2.1.

Algunos métodos para corregir la imagen consideran condiciones atmosféricas estándar, es decir, una composición específica de vapor de agua, anhídrido carbónico, oxígeno, ozono y aerosoles que proporcionen valores de transmisividad y radiancia. Por lo general, estos valores se obtienen en función de algunas variables como la temperatura y la humedad relativa en la fecha de adquisición de la imagen. De igual forma se puede considerar la transmisividad atmosférica, la cual se define por los algoritmos de ventana dividida (split window). Esta transmisividad atmosférica incluye las dispersiones por ozono, aerosoles y moléculas (Raleigh, Mie y no-selectiva) (Engman. y Gurney, 1991). Existen diferentes métodos desde lo muy complejos que requieren un amplio conocimiento de la atmósfera prevaeciente (ej. MODTRAM y 6SC) o el método de Chavez (1975), el cual se basa en el objeto oscuro asumiendo que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra) presentan una radiancia espectral muy cercana a cero. Para este trabajo se utilizó el método de Chavez ver en la sección 4.2.2.

2.4.2 Corrección geométrica

La corrección geométrica permite la modificación de la posición de los píxeles en un sistema coordinado y para rectificar posibles deformaciones de la imagen. Estas deformaciones pueden ser causadas por el movimiento del satélite durante la adquisición de la imagen:

- Movimiento del sistema del escáner y de la plataforma
- Altitud, latitud y velocidad de la plataforma
- Ángulo orbital
- Curvatura y rotación de la Tierra
- Relieve del terreno

Dependiendo del tipo de deformación se pueden emplear modelos lineales, de corrección de órbita o modelos geométricos. El método geométrico de Puntos de Control (PC, puntos con coordenadas geométricas conocidas) hace una rectificación polinomial gracias al formato digital de la imagen. Una vez determinada la función de transformación, la imagen es rectificada en coordenadas geométricas por medio de un remuestreo el cual puede ser el de vecinos más próximo, interpolación bilineal y convolución cúbica (Chuvieco, 2000).

2.4.3 Corrección radiométrica

La información de las imágenes se presenta en ND, los cuales son valores de tipo ordinal que representan la energía reflejada por la superficie terrestre recodificada a un intervalo de 8 bytes de 0 a 255 ND. Por ello, se requiere la corrección radiométrica de las imágenes para tener valores físicos de reflectividad y emisividad según sea el caso, que puedan emplearse en para la estimación de variables o parámetros deseados. El cambio a valor físico se realiza a través de los pasos siguientes (Chuvieco, 2000):

- a) Conversión de los ND a valores de radiancia espectral. La radiancia es considerada como la cantidad de energía solar reflejada por la superficie terrestre para una longitud de onda determinada en un ángulo sólido. En el caso de las imágenes Landsat se define como:

$$L_{sens,i} = a_{0,i} + a_{1,i}ND_i \quad (2.13)$$

donde

| | |
|-----------------------|--|
| $L_{sens,i}$ | radiancia espectral recibida por el sensor en la banda i (en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) |
| $a_{0,i}$ y $a_{1,i}$ | Coefficientes de calibración para la banda i |
| ND_i | Número Digital de la imagen de la banda i |

Los valores de los coeficientes a_0 y a_1 para cada imagen se encuentran en la cabecera de la imagen o bien existen tablas proporcionadas por Landsat para los diferentes sensores (MSS, TM y ETM+) (USGSb, 2011).

- b) Cálculo de reflectividad, se realiza ya que la radiancia es sólo un parámetro absoluto y se debe considerar la contribución de la irradiancia solar, la

reflectividad de la cubierta y las condiciones de adquisición. De igual forma se calcula la emisividad para la banda térmica.

2.4.4 Componentes principales (ACP)

Al aplicar un Análisis de Componentes Principales (ACP), uno de los objetivos es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar las coberturas en la superficie. El ACP se emplea como un método de realce previo a la interpretación visual o como procesamiento anterior a la clasificación. Esto, debido a que se incrementa la eficiencia computacional de la clasificación al reducir la dimensionalidad de los datos manteniendo exactitud (Ferrero et al., 2002).

Al usar ACP, los datos en las bandas de entrada se transforman desde el espacio de atributos multivariante de entrada en un nuevo espacio de atributos multivariante cuyos ejes se rotan con respecto al espacio original sin que estén correlacionados y tengan máxima varianza. La transformación de datos busca la compresión de los datos al eliminar la redundancia. Así, el resultado es un ráster multibanda con la misma cantidad de bandas que la cantidad de componentes especificado (una banda por eje o componente en el nuevo espacio multivariante). El primer componente principal tendrá la varianza más grande, el segundo mostrará la segunda varianza más grande no descrita por el primero y así sucesivamente. Por lo general, los primeros tres o cuatro ráster del multibanda resultante describirán más del 95 por ciento de la varianza. Esto facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, identificando aquellos rasgos que aparecen en la mayoría de las bandas y aquellos otros que son específicos de algún grupo de ellas (Chuvienco, 2000).

El ACP también es usado en aplicaciones multitemporales con el objeto de detectar cambios en distintas fechas. Componentes principales requiere que se identifiquen las bandas de entrada, la cantidad de componentes principales en los que se transformarán los datos, el archivo de estadísticas de salida y el ráster de salida (Ferrero et al., 2002; Terrádez Gurrea, 2002).

El ACP utiliza una matriz bidimensional y el estudio de la relación entre bandas, que es la base del método, el cual se realiza de dos maneras (Ferrero et al., 2002):

- Matriz de varianza-covarianza Σ_X en la que los elementos de la diagonal son las varianzas de los ND en cada banda y los elementos fuera de la diagonal son las covarianzas entre los ND de dos bandas.

Como la covarianza entre la banda i y la j es la misma que entre la banda j y la i ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) la matriz Σ_X es simétrica. Cuando hay relación lineal entre los ND de dos bandas, las covarianzas son grandes en comparación con las varianzas, por eso es que esta matriz sirve para estudiar la relación entre pares de bandas. Debido a que los principales ejes se determinan por la diagonalización de la matriz de covarianza para todos los píxeles, el no cambio en los ejes puede definirse ineficientemente. Por ello se emplea un proceso iterativo usando pesos para cada píxel determinado por la probabilidad de que no haya cambio en la iteración anterior (Canty, 2010).

- Matriz de correlación ρ_X en la que los elementos son los coeficientes de correlación lineal de Pearson que son una medida de la asociación entre dos variables. Los elementos de la diagonal tienen valor de 1 porque son las correlaciones de cada banda consigo misma. Como la correlación entre la banda i y la j es la misma que entre la banda j y la i ($\rho_{ij} = \rho_{ji}$) la matriz ρ_X es simétrica.

Cuando hay relación lineal entre pares de bandas las correlaciones son cercanas a 1 o a -1 . Cuando no hay relación entre bandas ambas matrices son diagonales (los elementos fuera de la diagonal son ceros), en este caso, cada banda aporta información diferente y, por lo tanto, el ACP sería innecesario.

2.4.5 Clasificación supervisada

Existen diferentes maneras de analizar una imagen y todas ellas están en función de los requerimientos de un problema específico, en algunos casos se puede considerar la segmentación o clasificación para delinear diferentes áreas de una imagen en clases temáticas. Estas clases temáticas o el cálculo de variables o parámetros obtenidos directamente por algoritmos de percepción remota junto con información vectorial pueden ser alimentados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su posterior análisis.

En el caso de la clasificación supervisada implica adoptar la estrategia de que la máquina o computadora aprenda de un conjunto de ejemplos representativos de la

superficie, lo que matemáticamente se representa mediante la aplicación de un modelo de distribución de probabilidad, donde se presume que hay K datos que son representativos de una clase en la cubierta superficial y están presentes en la imagen. De esta manera, la probabilidad *a posteriori* para la clase k condicionada para la observación g será aprendida o aproximada (Canty, 2010).

$$Pr(k|g), k = 1 \dots K \quad (2.14)$$

Los modelos empleando estimaciones probabilísticas son tres: paramétrico (Clasificador de máxima similitud de Bayes), no-paramétrico (clasificación Gaussiana de Kernel) y semi-paramétrico o mixto (redes neuronales). El software ERDAS considera los modelos paramétrico y no-paramétrico.

La parte más crítica del proceso es la selección de los entrenadores, para lo cual se seleccionan áreas o regiones que sean representativas de cada clase de interés (ROI). Asimismo, se debe garantizar la presencia de datos que representan la clase que se busca para que sirvan en el proceso de evaluación o validación. En la clasificación supervisada se debe conocer el área, los datos y el algoritmo a emplear, de preferencia se debe conocer la situación en la superficie, la cual representará datos verdaderos con los cuales validar los resultados obtenidos.

Canty (2010) señala que al usar el modelo paramétrico con el clasificador de máxima similitud las áreas de entrenamiento son también las áreas de validación toda vez que se asume ambas son igualmente representativas de cada clase, siempre que en efecto representen a la clase.

Para validar la clasificación obtenida se puede emplear una matriz de error, donde se pueden tener dos tipos de error:

Errores de Omisión

Son píxeles de un campo 1 que por error fueron asignados a un campo 2; si bien los píxeles debieron ser clasificados como campo 1, pero fueron omitidos.

Errores de Comisión

Son píxeles de campo 2 que por error fueron asignados al campo 1; estos píxeles no debieron haber sido clasificados como campo 1 pero fueron incluidos.

En este trabajo se empleó el método de ACP y clasificación supervisada.

CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cabecera municipal de Calvillo se ubica en las coordenadas 21°50'38"N y 102°43'05"O en el estado de Aguascalientes. Este municipio se caracteriza por estar constituido por un valle con dirección suroeste que lleva el mismo nombre. El Valle de Calvillo (VC) está rodeado por la Sierra del Laurel al suroeste limitando con el estado de Jalisco, la Sierra Fría al norte colinda con el municipio de San José de Gracia, al oeste con el estado de Zacatecas y al noreste con la Sierra de Guajolotes o Brava. La elevación del Valle es de 1500 metros sobre el nivel del mar (msnm) lo que la define como la mayor depresión en la zona. El valle de Calvillo tiene una superficie total de 1,368 Km² y se comunica con el valle de Jalpa, y también incluye los municipios de Huanusco y Tabasco en Zacatecas y, en menor proporción, a Villa Hidalgo en Jalisco, (Fig. 3.1).

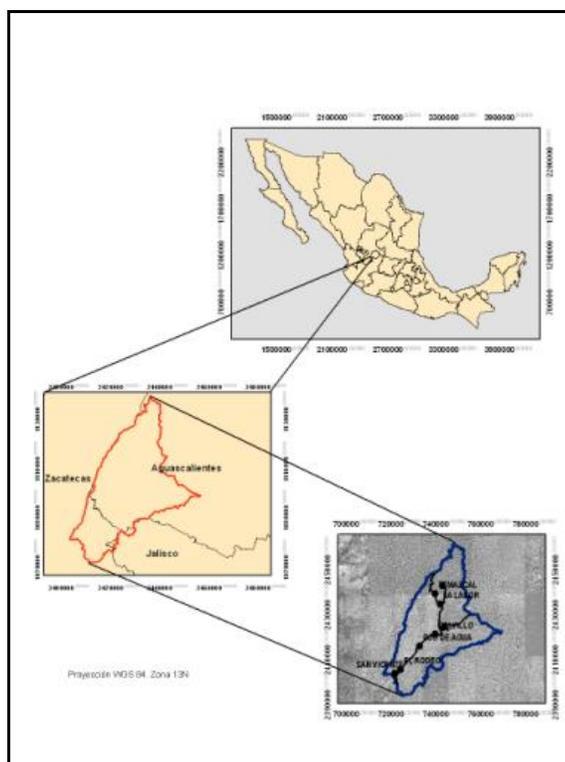


Figura 3.1. Ubicación del Valle de Calvillo

3.1 Fisiografía

El Valle de Calvillo (VC) se encuentra dentro la provincia fisiográfica de Sierra Madre Occidental, subprovincia Sierras y Valles Zacatecano (Fig. 3.2). Se caracteriza por sierras altas con dirección norte-sur, siendo la de mayor elevación

la de la Sierra del Laurel con 2,500 msnm y seguida de los cerros *Las Trojas* con 1,720 msnm, *Mesa-Las Canoas* con 2,120 msnm, el *Quemado* con 2,360 msnm y *La Antorcha* a 2,800 msnm. En general, las Sierras son alargadas rematadas por mesetas que alternan con valles alargados y en la misma dirección de la sierra. Los valles se caracterizan por tener pendientes suaves presentando terrazas o lomeríos resultado de una posible erosión en las zonas altas (EMDM, 2010).



Figura 3.2. Provincias fisiográficas de Aguascalientes

3.2 Clima

El clima predominante en el municipio es semicálido, clasificado de acuerdo con Koppen como Bs1 hw(w)(e) que corresponde a un clima seco estepario, semicálido, con invierno fresco y con lluvias en verano. La temperatura media anual oscila entre 18° y 22°C, registrándose entre los meses de mayo y agosto las temperaturas más altas en la parte más profunda del CVC al el suroeste y menos de 16°C en las cumbres más elevadas de las Sierras *El Laurel* y *Fría*.

La precipitación media anual es de 660 milímetros (mm) concentrándose entre los meses de junio a septiembre. El promedio de heladas al año es de 30 días siendo los meses más afectados de noviembre a febrero. Los vientos dominantes son alisios en dirección suroeste-noroeste durante el verano y parte del otoño (INEGI, 1993)

3.3 Vegetación

La vegetación es variada a lo largo del VC debido a las características climatológicas, fisiográficas, etc. La vegetación predominante en las partes altas

son bosques de coníferas y de encino, además de contar con reservas forestales de roble, álamo, cedro y pino. En las partes bajas predominan las selvas subcaducifolias y caducifolia siendo los tipos principales chaparral, matorral subtropical, pastizal natural inducido. También se tienen zonas de riego con huertas de guayaba y maíz, principalmente.

3.4 Geología

En el municipio de Calvillo predominan por suelos como regosol, feozem, luvisol, litogol y planosol, de los cuales la mayor parte son para uso forestal comercial en especies maderables y forestales de consumo doméstico; así como, de uso agropecuario.

Existe poca información para el VC pero destacan los trabajos de la CONAGUA (2002), la carta geológica del INEGI (2002a) y la carta geológica-minera del Servicio Geológico Mexicano (1998) (Fig. 3.3); así como, los trabajos de Aranda Gómez (2002) quien nombró de manera informal algunas formaciones.

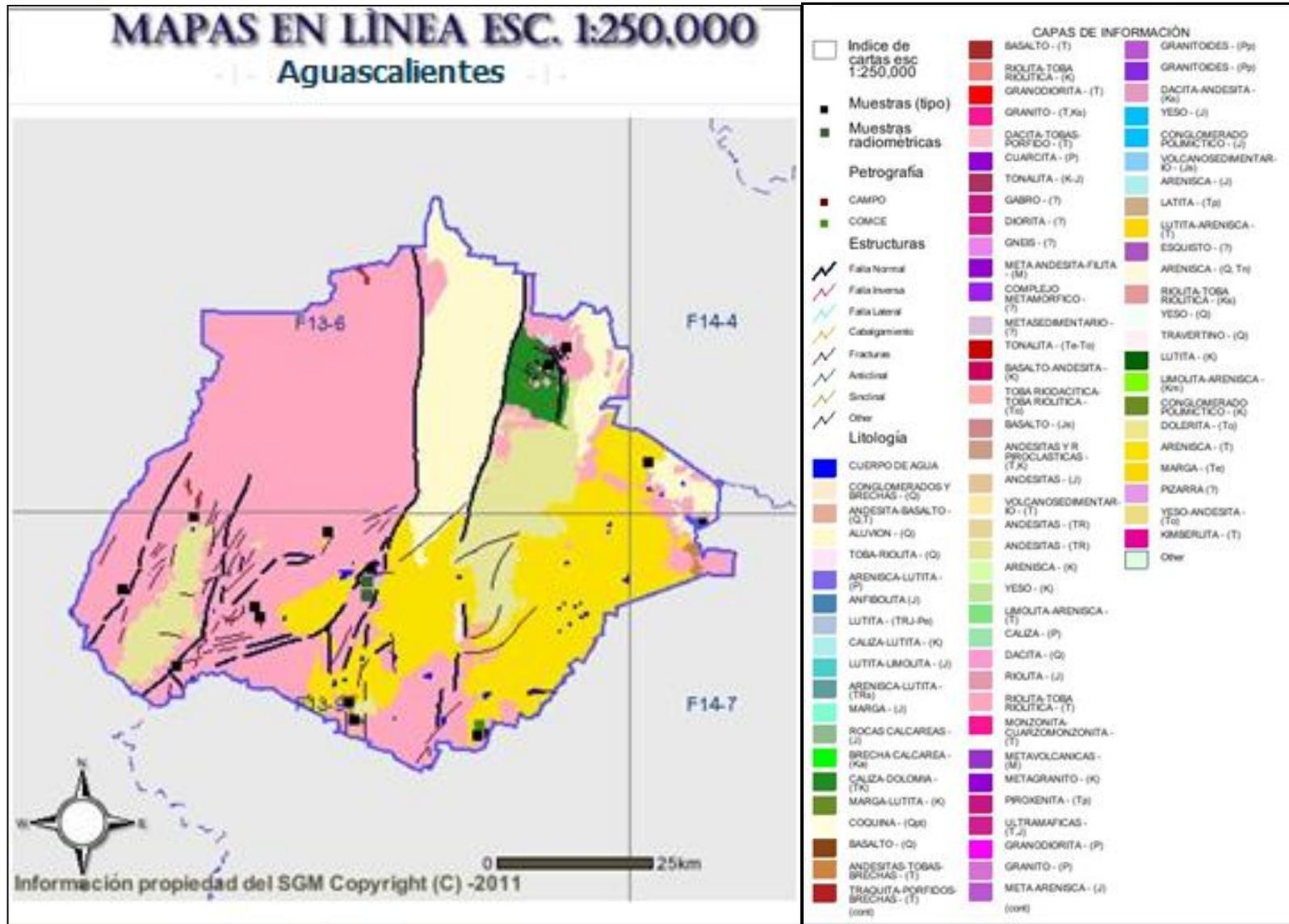


Figura 3.3. Mapa Geológico, 1:250,000
 Fuente: Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1998

El graben de Calvillo se origina durante el Jurásico y Cretácico con el avance del mar sobre el continente generando depósitos de lutita, arenisca y caliza, los cuales a finales del Cretácico y principios del Terciario fueron deformados por la Orogenia Larámide y afectados por el emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos. Estos eventos provocaron, el levantamiento regional del área, el cual durante el Terciario Inferior se erosionó dando origen a depósitos clásticos continentales de conglomerado. En el Oligoceno–Mioceno se tienen rocas de origen volcánicas de tipo tobas-arenosas y un complejo ígneo extrusivo de composición riolítica, denominado formación Asientos (riolita ignimbrita). Esta formación aflora desde San Luis Potosí hasta Zacatecas, cubriendo discordantemente a las tobas arenosas. Este complejo se caracteriza por ser fluidal y de textura porfirítica (masiva a muy compacta con espesores de 80 a 200 m). Las tobas arenosas son blancas con brechas volcánicas rojizas, se desconoce espesor total por no aflorar la base. En el Terciario Medio y finales se produjeron fallas y fracturas sobreviniendo una etapa de esfuerzos distensivos provocando fallamientos de tipo normal y, ocasionando, hundimientos tectónicos que dieron formación a fosas y pilares. A fines del Terciario y, durante el Cuaternario, estas fosas tectónicas fueron rellenadas por material clástico y volcanoclástico formándose conglomerados (CONAGUA, 2002; INEGI, 2002b).

En el Plioceno destacan los Sedimentos Continentales (arenisca–conglomerados). El material que rellena el graben es semicompacto compuesto principalmente de capas gruesas semiconsolidadas de arena con grava y limo–arcilloso de espesor del orden de 300 m. El Cuaternario se caracteriza por depósitos aluviales en las partes bajas, así como algunas laderas de los cerros quedando conformada la morfología actual de la zona abarcando pie monte, aluvión y sedimentos residuales (Fig. 3.4) (CONAGUA, 2002; INEGI, 2002b).

Aranda Gómez (2002) reporta en zonas aledañas a la zona de estudio una cubierta volcánica que presenta dos sistemas de fallas: uno con rumbo aproximado N40°E y el otro N80°O donde afloran las unidades siguientes:

Toba Picacho (Toba Acida). Depósito volcanoclástico de color amarillo claro cuya característica más notable es su abundante contenido clástico. El tamaño de los clastos varía de pocos centímetros hasta más de 80 cm mejorando su estratificación. Ocasionalmente en la cima se conservan algunos fragmentos mayores a 50 cm. La composición mineralógica al microscopio es cuarzo>sanidino>plagioclasa.

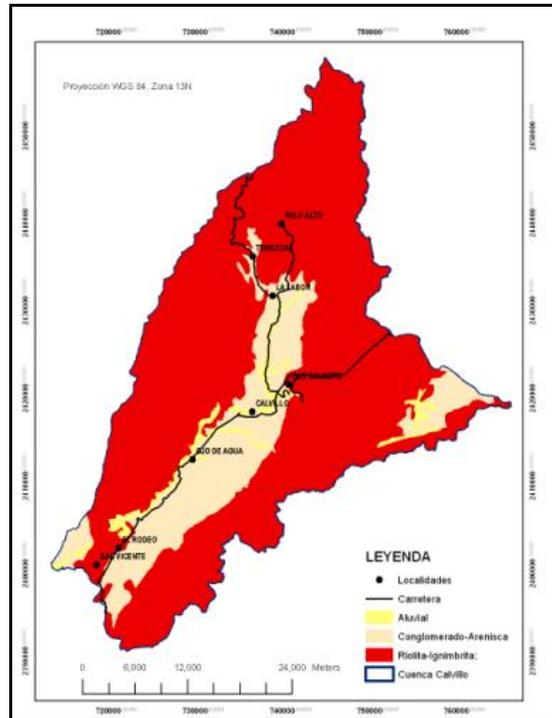


Figura 3.4. Carta geológica
Fuente: INEGI, 2002b.

Riolita Tomatina (Riolita – Ignimbrita). Se trata de una ignimbrita pobre en fenocristales, cuyo color y aspecto varían debido a los fenómenos postdepositacionales de compactación, piroconsolidación y desvitrificación, la cual descansa sobre la toba Picacho. En algunos lugares se aprecian rocas densamente soldadas formando mesas con superficie plana y suavemente inclinada. En la cima es común encontrar una marcada foliación y alineación del derrame piroclástico. La composición mineralógica al microscopio es sanidino>cuarzo>opacos>plagioclasas.

3.4.1 Geología Estructural

La geología estructural de la zona es resultado de la revolución Larámide que plegó y provocó fallamiento en los sedimentos marinos, a finales del Cretácico y principios del Terciario. De manera que en el Oligoceno se tiene una etapa distensiva con un fallamiento de tipo normal con dirección preferencial NE-SO originando fosas y pilares (Aranda –Gómez, 2002). Un ejemplo de esta etapa es la formación del graben de Calvíllon. Adicionalmente, las rocas volcánicas terciarias fueron afectadas por dos sistemas de fallas, uno con rumbo aproximado de N40°E

El escurrimiento se define en función del tipo de vegetación, la pendiente del terreno y la precipitación de acuerdo con el grado de saturación de las unidades litológicas (suelo o roca). Así, una vez que el grado de saturación sea superado se genera el escurrimiento y sólo se verá afectado por la vegetación y pendiente presentes. El porcentaje de escurrimiento en la cuenca del VC varía de 5 a 30 % presentando menor escurrimiento de 10 a 25 % al centro zona del valle. Porcentajes mayores se tienen en las zonas urbanas por lo que volumen estimado de escurrimiento en la cuenca es de 128.4 Mm³ con un promedio medio anual de 10.69 Mm³ (INEGI, 1993).

3.6 Hidrología subterránea

El estado de Aguascalientes presenta cinco acuíferos (Fig. 3.7) siendo el de Calvillo el segundo en importancia y el cuarto en tamaño. El acuífero de Calvillo es de tipo libre con una superficie de 200 Km² y abastece a una población del 6% y a actividades agropecuarias.

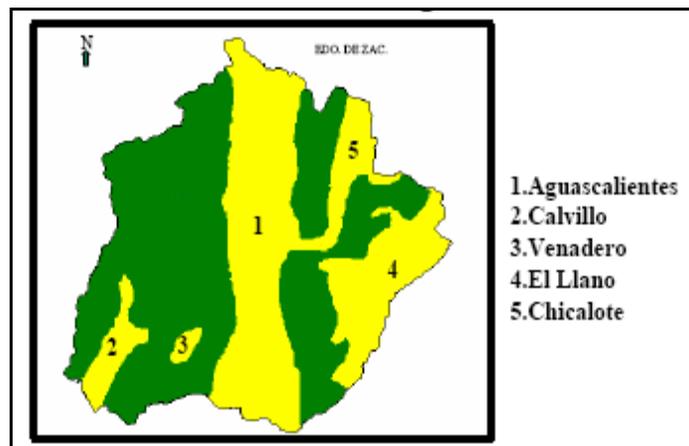


Figura 3.7. Acuíferos presentes en el estado de Aguascalientes.

De acuerdo con Carrillo et al., (2001), el sistema libre se ubica en la zona de conglomerados caracterizado por su capacidad para almacenar y transmitir agua. El acuífero cubre todo el valle siendo esta zona la de mayor profundidad presentando una pendiente dominante hacia el suroeste teniendo como zona de recarga, principal, es la Sierra Fría (ver Fig. 3.8).

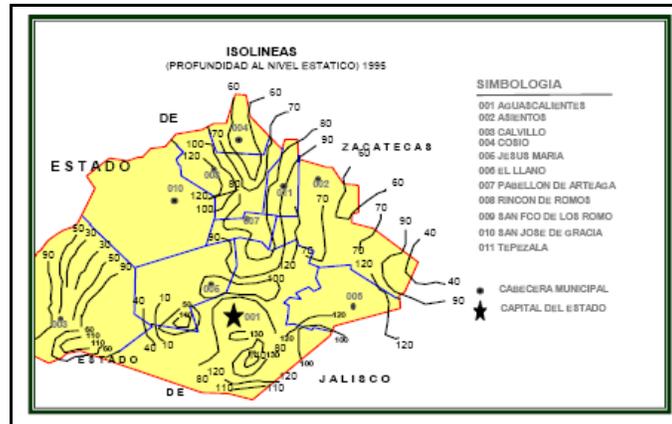


Figura 3.8. Mapa de profundidades de nivel estático.

3.6.1 Unidades Hidrogeológicas

Las principales características de las unidades hidrogeológicas son: estructuras geológicas, topografía, permeabilidad de las rocas y del suelo. La zona por donde fluye el agua es de tipo granular continental conformado por unidades clásticas no consolidadas del terciario-cuaternario que rellenan el graben. Asimismo, dado que la secuencia de rocas Cenozoicas es mayormente de tipo volcánico se han distinguido series locales de rocas ígneas y sedimentos piroclásticos, que incluyen principalmente rocas de los tipos riolitas, ignimbritas y andesitas, así como tobas y sedimentos volcano clásticos que por su distribución espacial son, por un lado, el principal medio de recarga de agua subterránea y, por otro lado, debido a las condiciones de alteración química y fracturamiento constituyen una unidad almacenadora de agua cuya impermeabilidad, la da carácter de un acuífero confinado.

El acuífero de Calvillo presenta una conductividad hidráulica de 10^4 a 10^7 $m \cdot s^{-1}$ y transmisividad de 0.2 a 1.5×10^{-3} $m^2 \cdot s^{-1}$, lo que lo coloca en un sistema de buena porosidad y alta permeabilidad (Sánchez, 2008).

El sistema libre se divide en dos medios: el granular que se encuentra en la unidad de conglomerados, y el fracturado asociado a la falla que corta los materiales ígneos como riolita – ignimbrita, toba y andesita, la cual coincide con la formación Panalillo identificada por Martínez Ruiz (1984) en San Luís Potosí (SLP) y que subyace a la ignimbrita. El espesor de esta unidad se desconoce pero se tiene registro de cortes litológicos que llegan hasta 500 m (pozo Cal–35).

CAPITULO 4. DATOS Y MÉTODOS

Este capítulo presenta los datos disponibles y la metodología empleada para establecer el grado de vulnerabilidad en el valle de Calvillo.

4.1 Datos disponibles

Se contó con datos numéricos, texto, geográficos y ráster. Estos últimos corresponden a imágenes de satélite correspondientes a la plataforma Landsat. Los datos vectoriales incluyen el uso de capas temáticas, topográficas, así como información obtenida en campo y aquellos resultados de la aplicación de técnicas de PR y SIG.

4.1.1 Imagen de satélite

La imagen seleccionada corresponde a la plataforma Landsat ETM+ con path/row 29/45 de fecha 27 de enero de 2002 (Día Juliano, DOY, 27) (Earth Explorer, 2010). La imagen se compone de 3 bandas en el visible y 4 bandas en el infrarrojo cercano, medio y térmico y una banda pancromática.

Tabla 4.1. Características de Imágenes Satélite Landsat TM Fuente USGS, 2010

| Banda | Espectral (micrometros) | Resolución (m) |
|-------|-------------------------|----------------|
| 1 | 0.45 a 0.515 | 30 |
| 2 | 0.525 a 0.605 | 30 |
| 3 | 0.63 a 0.690 | 30 |
| 4 | 0.75 a 0.90 | 30 |
| 5 | 1.55 a 1.75 | 30 |
| 6 | 10.40 a 12.5 | 60 |
| 7 | 2.09 a 2.35 | 30 |
| 8 | 0.52 a 0.90 | 15 |

La plataforma Landsat está en una órbita solar-sincrónica con una altitud del satélite de 705 km e inclinación de 98.2°. Las imágenes tienen una anchura de barrido de 185 km y un periodo de revisita de 16 días.

Posterior a la inspección visual, se recortó la imagen para tener sólo el área de interés y se eliminó la banda térmica por no representar ninguna ventaja para la

identificación de los lineamientos y fracturas. Las coordenadas finales que incluyen el VC son: 22°16'N/102°59'O y 21°33'N/102°23'O (Fig. 4.1).

La imagen adquirida fue de tipo ortorectificada con proyección Universal Transversal Mercator (UTM) y esferoide WGS84.

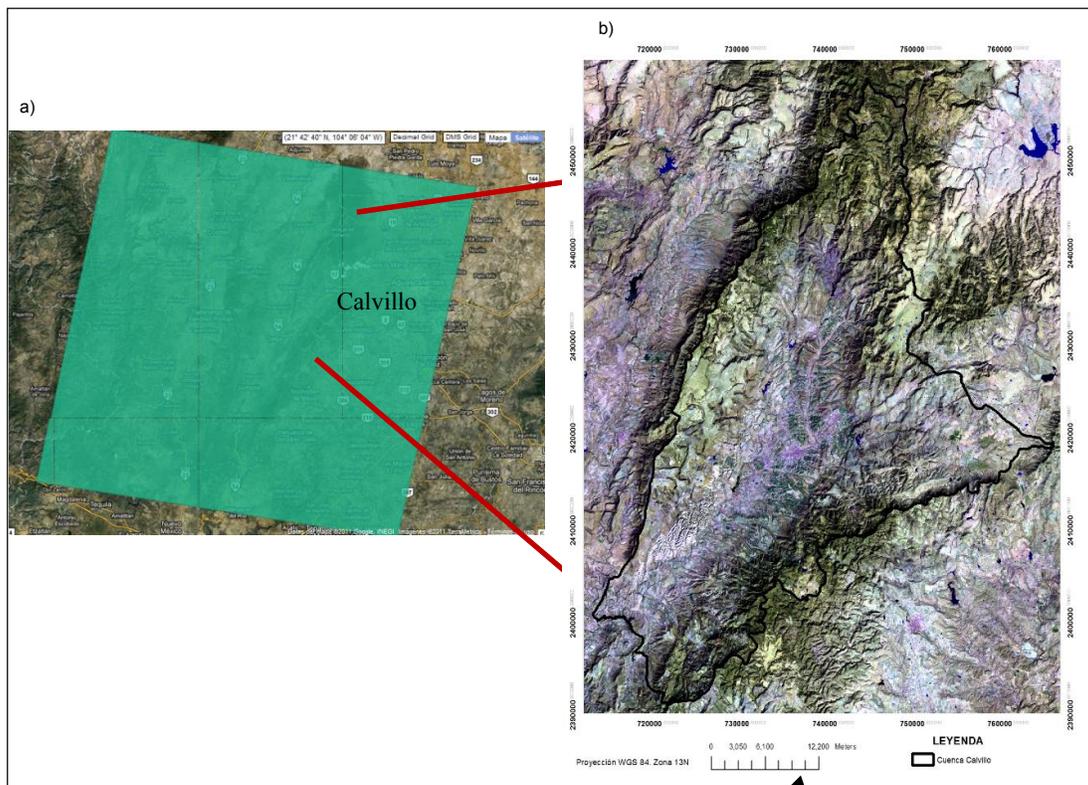


Figura 4.1. a) Imagen Landsat TM correspondiente al DOY27_2002 y b) cuenca del Valle de Calvillo La imagen DOY27 contó con el archivo de metadatos (Anexo 1).

4.1.2 Firmas espectrales de minerales y rocas

Con el mapa geológico y los datos colectados de las diferentes publicaciones se identificaron algunas propiedades de los minerales predominantes en el VC para determinar las firmas espectrales a fin de lograr una separación de clases al aplicar la clasificación supervisada. Dichas firmas espectrales se obtuvieron de la página de internet del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Nasa (Jet Propulsion Laboratory, 2010)

Las firmas espectrales obtenidas correspondieron a los minerales que componen las rocas riolita-ignimbrita, y tobas de acuerdo con Aranda-Gómez (2002). La

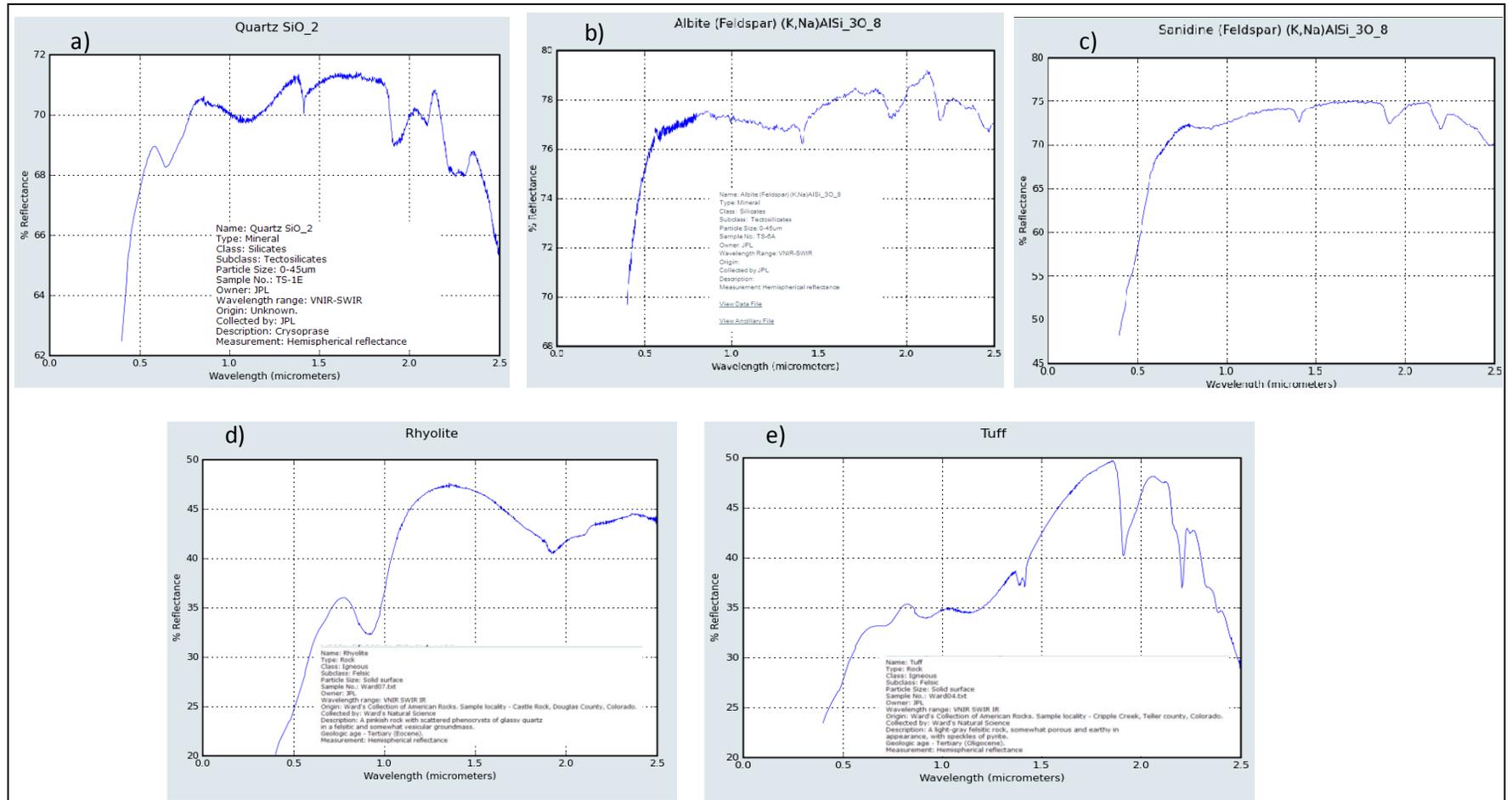


Figura 4.2. a) Cuarzo, b) Albite, y c) Sanidino, son minerales de clase silicatos y subclase tectosilicatos, d) Riolita y e) Toba son rocas ígneas de subclase félsica

Figura. 4.2a y 4.2b muestran las firmas del cuarzo y albita que corresponden a silicatos, mientras que la Figura. 4.2c corresponde a una muestra de sanidino que es también un silicato (feldespato). Las Figuras 4.2d y 4.2e corresponden a rocas félsicas (riolita y la toba).

Las firmas espectrales de los silicatos muestran una alta reflectancia después de $1.5 \mu\text{m}$ con una caída cerca de $2.0 \mu\text{m}$ debido a una mayor absorción de la radiación. Aun cuando los puntos de absorción se encuentran más fuertes entre 1.37 y $1.9 \mu\text{m}$ es posible observar una tendencia de 1.5 a $1.9 \mu\text{m}$ y picos 2.2 y $2.3 \mu\text{m}$ por lo que este intervalo está cubierto en el espectro de las bandas 5 y 7 de Landsat TM. Cerca de los $2 \mu\text{m}$, la riolita y la toba tienen una baja absorción la cual puede ubicarse en el intervalo de las bandas 5 y 7. Con base en esto, se seleccionó una composición de falso color RGB753 de manera que se asegure obtener la alta reflectancia de bandas 7 y 5 y un indicador de la vegetación a través de la banda 3.

Al aplicar una combinación RGB753, como se aprecia en la Figura. 4.1b, en las partes altas de la sierra se presenta una coloración verde correspondiendo a bosques y un tono más claro para zonas de cultivo (ej. guayaba). Asimismo se aprecian unidades litológicas pese a la densidad de la vegetación presente.

4.1.3 Hidrogeología

La hidrogeología considera a aquellas unidades que definen el flujo del agua subterránea, lo cual es un indicador de la capacidad de almacenar y transmitir el fluido. Las principales características de las unidades hidrogeológicas son: estructuras geológicas (acuíferos, acuitardos o acuícludos), permeabilidad, del suelo, topografía.

En este estudio se contó con las cartas vectoriales de geología, edafología, hidrología subterránea y superficial del INEGI en formato shape, y con un censo de pozos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con lecturas piezométricas. Esta información es importante para determinar la profundidad del agua subterránea. El censo considera 309 pozos para el municipio de Calvillo y 30 pozos en municipio de Huanusco. La CONAGUA proporcionó registros litológicos del acuífero libre, así como perfiles hidrogeológicos, proyectados al subsuelo que comprende los municipios de Calvillo y Huanusco (Anexo 1). La Figura. 4.3 muestra aquellos pozos de los que se tiene registro de cortes litológicos.

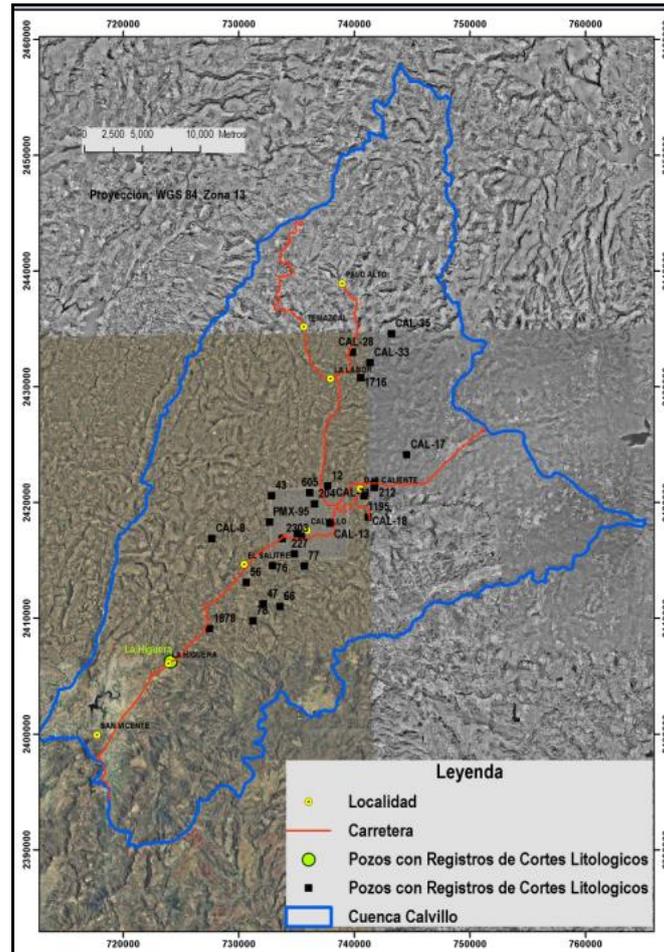


Figura 4.3. Mapa del área de la Cuenca del Valle de Calvillo donde se muestran los pozos censados por la CONAGUA que cuentan con registros de cortes litológicos

En el acuífero libre medio granular, la sección transversal AA' (Fig. 4.4) muestra el corte de la parte más al Norte que corresponde a la parte de la sierra con materiales compuestos por riolita-ignimbrita y fracturamientos y fallas normales.

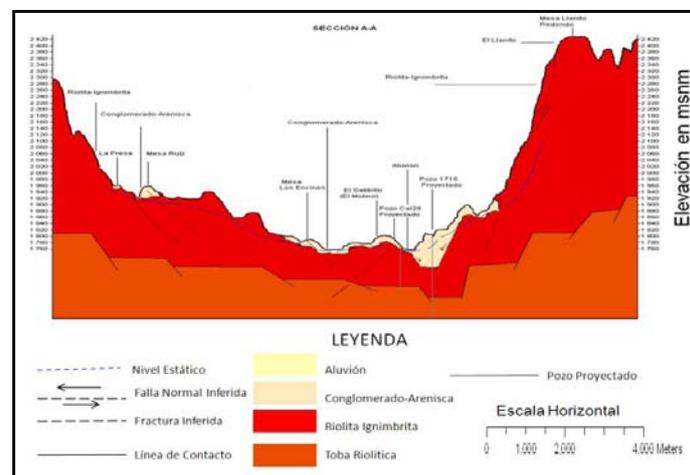


Figura 4.4. Sección transversal A-A' del registro litológico de la parte Norte del acuífero libre

De acuerdo con la Sección B-B' (Fig. 4.5), datos de los pozos PMX 53, 2303 y Cal 1 (ver Anexo 1) (proporcionados por la CONAGUA) ubicados en la parte central del VC muestran que la profundidad de los depósitos aluviales y conglomerados tienen un espesor de 250 m, por lo que se considera una fosa tectónica.

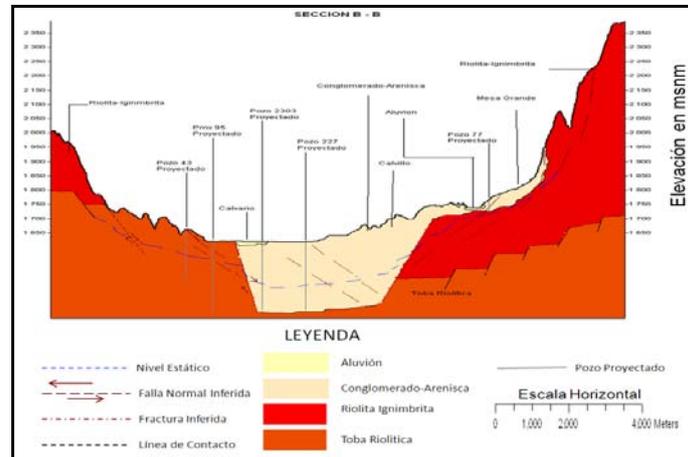


Figura 4.5. Sección transversal B-B' del registro litológico de la parte central del acuífero libre

La Sección CC' (Fig. 4.6) es la porción más al sur del acuífero. En esta zona, existe una cobertura de conglomerados y casi no se encuentran depósitos aluviales. En esta región se localizó un pozo artesiano del acuífero confinado (ver Anexo 1).

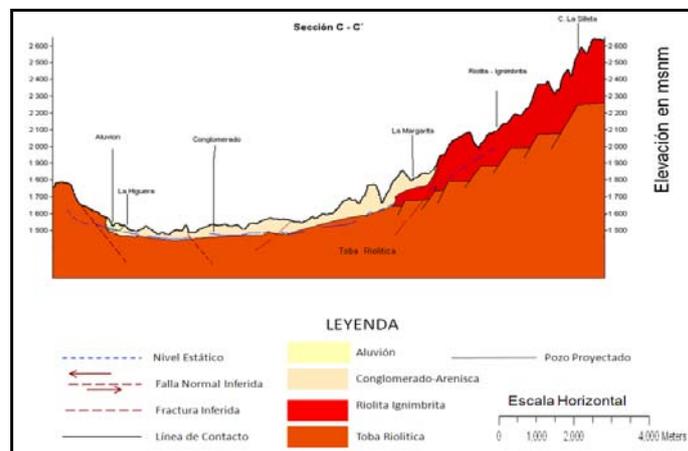


Figura 4.6. Sección transversal C-C' del registro litológico de la parte central del acuífero libre

4.1.4 Topografía- Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación es un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua que en este caso es la elevación. El término Modelo Digital de Elevación (MDE) se propuso para evitar confusión entre la variable de elevación y otras

características del terreno que pueden estar presentes en un modelo digital de terreno (MDT) como valor de la tierra, propietarios, tipo de suelo, profundidad de la capa rocosa, uso de suelo, etc. (Doyle, 1978).

En el MDE del INEGI, los valores de z o altitud (elevación) son alturas ortométricas, en unidades enteras de metro y están referidos al nivel medio del mar, con base en el Datum Vertical para Norteamérica de 1929. Horizontalmente, los puntos están referenciados al sistema de coordenadas de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) con un sistema geodésico NAD27 o ITRF92. El cubrimiento del MDE corresponde al formato regular de 15' de latitud por 20" de longitud de la cartografía elaborada a esa escala por el INEGI y cuenta con un espaciamiento (resolución espacial) entre las intersecciones de la retícula de elevaciones de 50 metros en las dos direcciones, es decir, la retícula forma una cuadrícula regular de 50x50 metros de lado (Fig. 4.7).

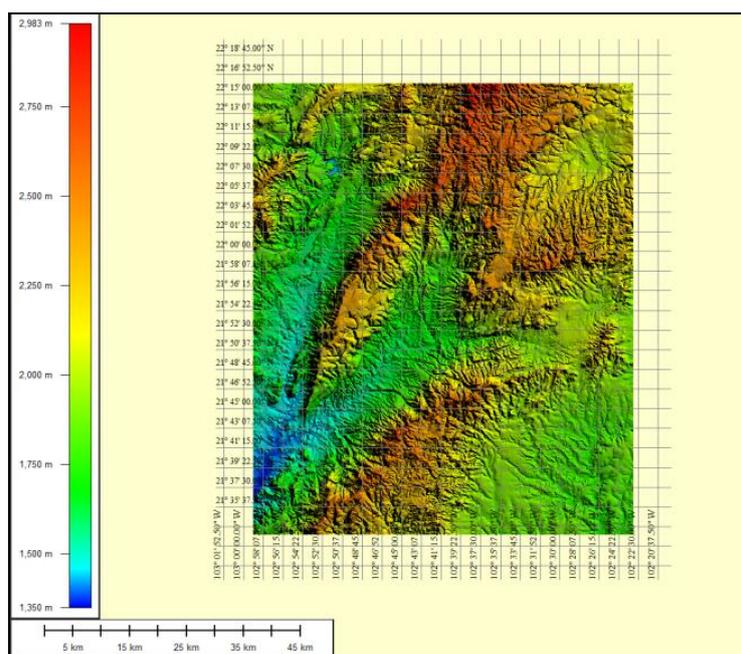


Figura 4.7. Mapa del Modelo Digital de Elevación para el Valle de Calvillo.

Fuente: INEGI, 2010

4.2 Metodología

La metodología (Fig. 4.8) incluye el procedimiento empleado con la imagen, los datos colectados en campo e históricos y los métodos empleados (SINTACS y GOD) (ver Capítulo 2). Toda la información fue cargada y analizada en un SIG desarrollado en el software ArcGis 9.3 (ESRI, 2013) y la imagen de satélite fue

procesada con ERDAS Imagine (Intergraph, 2013) y el software IDRISI (Clark Labs, 2013).

El proceso de la información implicó, en cada caso, álgebra de mapas para obtener como producto final un mapa paramétrico. El álgebra de mapas es una forma sencilla de detectar cambios en dos multiespectral imágenes, o bandas, de manera que se obtengan indicios de cambios o no cambios. Si las diferencias son significativas en los canales (bandas) espectrales es posible caracterizar el tipo de cambio que ha tenido lugar. El álgebra incluye operaciones comunes como la sustracción, suma, multiplicación y división. Sin embargo, también se tienen combinaciones más complejas como son los índices de vegetación (ej. NDVI, el índice de vegetación de la diferencia normalizado).

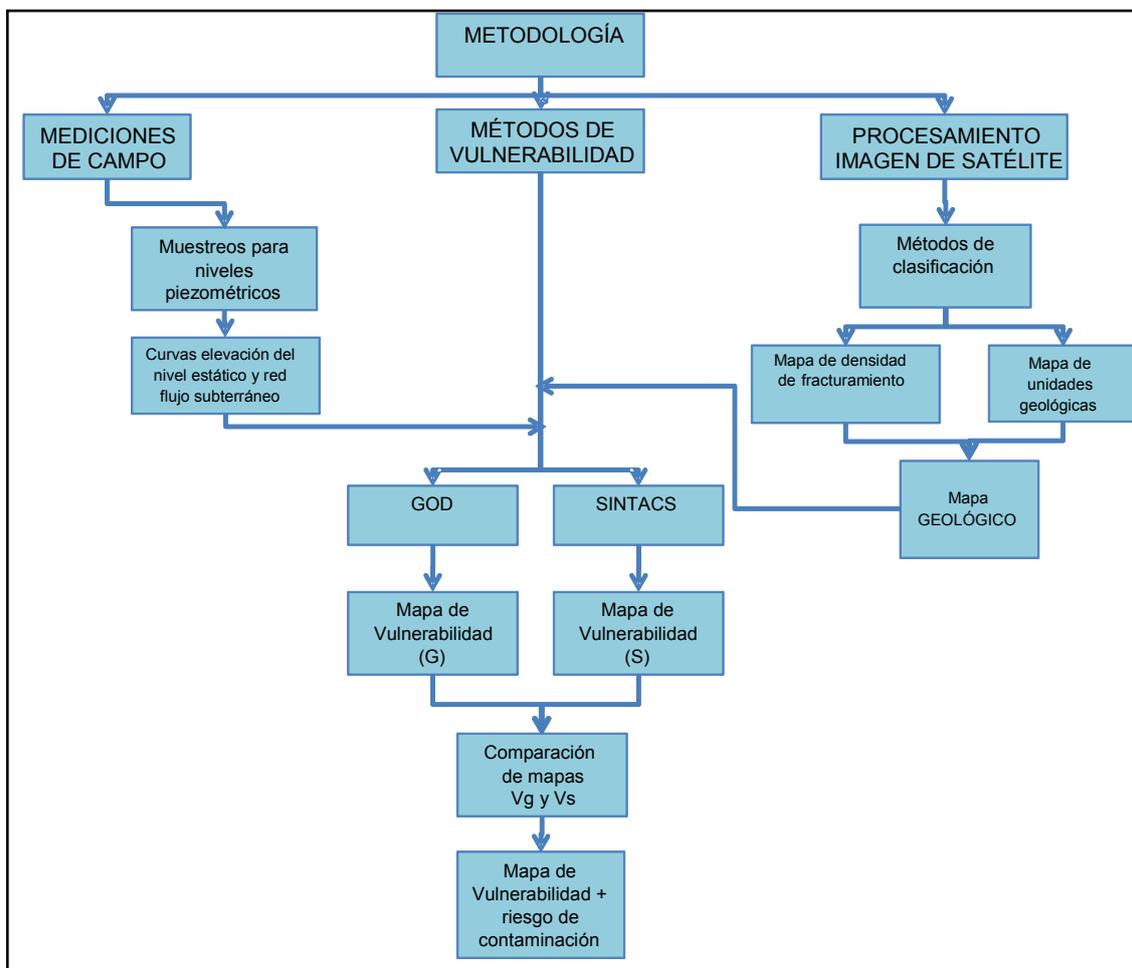


Figura 4.8. Esquema de los pasos seguidos para obtener el mapa de vulnerabilidad.

4.2.1 Mediciones de campo

Se realizaron mediciones piezométricas, para lo cual se llevaron a cabo visitas de inspección a algunos de los pozos censados por la CONAGUA. Las mediciones consistieron en el empleo de *sondas eléctricas y de chicharra* para tomar lecturas de los niveles estáticos y dinámicos del agua. Con esta información, se obtuvo la dirección de los lineamientos y se establecieron flujos de agua y las isolíneas del nivel estático.

4.2.2 Procesamiento de la imagen de satélite

Una vez que se analizó la calidad de la imagen se aplicó la corrección atmosférica empleando el método de Chavez (ver Sección 2.4.1), el cual considera que la bruma atmosférica incrementa los ND donde se encuentra agua no contaminada, profunda y calma y en ese caso debería tener una reflectancia nula. Así, que se sustraen los valores representativos de las diferencias al cero de cada banda en todos los píxeles de la escena (Ruíz et al., 1995). El método convierte los valores de ND a valores aproximados de reflectancia sin realizar ninguna corrección por absorción o dispersión atmosférica. Para ello, se asume una transmitancia igual a 1, una irradiancia espectral difusa del cielo y la trayectoria de radiación debido a las brumas nulas. La corrección geométrica que es la distorsión debido al escaneo, a la curvatura de la tierra y proyección geográfica, no se realizó toda vez que en una inspección visual comparando la imagen DOY27 con ortofotos (INEGI, 2013) aplicando el comando SWIPE de ERDAS Imagine 9.3, se observó coincidencias principalmente en los cruces de caminos y presas. La corrección radiométrica no se aplicó ya que el análisis empleando los ND proporcionaba la información buscada, la cual atiende a una cualificación y no a una cuantificación. La Figura. 4.9 presenta un esquema más detallado del proceso seguido.

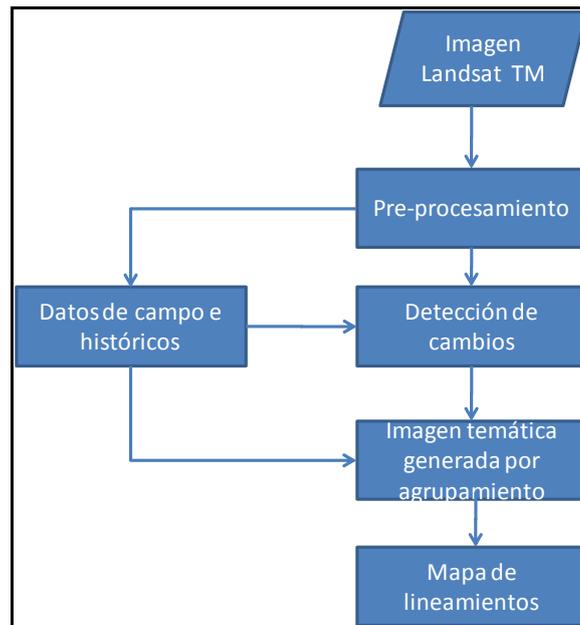


Figura 4.9. Proceso seguido con la imagen de satélite para obtener el mapa de lineamientos

Una vez pre-procesada la imagen atmosféricamente, se aplicó un método que permitiera identificar los lineamientos de forma confiable mediante el realce espectral. De esta manera, se empleó el método de análisis de componentes principales y una clasificación empleando los resultados del realce. En el primero, el número de bandas alimentadas y obtenidas del proceso fue de 6, quedando fuera del análisis las bandas térmica y pancromática. En la clasificación se realizó con lo encontrado del realce espectral a fin de lograr una mejor identificación de los rasgos estructurales (Origel-Gutiérrez y Sánchez-Cárdenas, 2010). En la clasificación se usó tanto la opción no-supervisada como la supervisada, en ambos casos se usaron las firmas espectrales de las rocas y minerales representativos en la zona de estudio (ver Sección 4.1.2). Asimismo, se definieron puntos de entrenamiento con ayuda de las mismas firmas espectrales, de la vegetación y suelo presentes en la imagen DOY27.

En la definición de los diferentes elementos lineales del relieve se tomaron en cuenta algunos indicadores mencionados por Cotilla et al. (2005), como son:

- Tramos lineales de cauces de ríos
- Lineamiento de valles fluviales
- Límites de forma lineal de distintos tipos de paisajes
- Cambios de pendientes que originan grandes escalones en el relieve
- Cambios fuertes de altura de un sector a otro

Una vez obtenido el mapa de lineamientos, se midió la longitud de cada uno de ellos. La correcta interpretación de este tipo de mapas contribuye a entender el relieve, no sólo en su morfología, sino también en su evolución y dinámica actual, lo que es de suma importancia en estudios relacionados con la hidrogeología.

4.2.3 *Métodos de vulnerabilidad*

Para obtener el grado de vulnerabilidad del acuífero resultado de fenómenos naturales o antropogénicos se aplicaron los métodos de vulnerabilidad GOD y SINTACS. Las capas de información fueron generadas a partir del análisis de la imagen de satélite y de los datos alimentados al SIG aplicando álgebra de mapas para llegar a la obtención del Índice de Vulnerabilidad (IV) para ambos casos.

Las capas de información consideran el mapa de lineamientos, así como mapas de unidades litológicas y cortes litológicos de manera que se establezcan las características superficiales que definen los acuíferos y su condición hidrogeológica.

De los pozos se emplearon aquellos con registros de nivel estático para establecer la profundidad del nivel del agua. Se calculó la altura topográfica, restando la lectura del nivel estático a la altura del brocal. Con estos datos, se obtiene líneas de curvas de igual elevación del nivel estático referidas al mar, y se identifica la red de flujo determinando junto con el perfil topográfico (usando el MDE) y la textura de suelos, las secciones hidrogeológicas de la zona de estudio.

Para calcular la infiltración por retorno de riego, se hace la delimitación de las áreas agrícolas, empleando imágenes: Landsat, Spot pancromáticas, ortofotos, clasificación supervisada, y no supervisada. Posteriormente, se estima el área agrícola, con el dato de excedente de riego (ver Sección 1.3.2).

Adicionalmente, se cuenta con información obtenida de las zonas posibles de recarga, que, junto con el mapa de vulnerabilidad ayudará a preservar estas zonas bajo un ambiente lo más natural posible. Es importante mencionar que existen otros factores que intervienen en la definición de la zona de recarga como son: pendiente del terreno, densidad de vegetación, cantidad de arroyos tributarios, condiciones de subsuelos, grado de permeabilidad y porosidad de los materiales, así como también la dirección del flujo del agua subterránea.

Para establecer la recarga al acuífero, se emplearon los datos climatológicos obtenidos de la base de datos ERIC-II (IMTA), tomando en cuenta las cartas climatológicas del INEGI para obtener la precipitación y calcular la evapotranspiración real de acuerdo a la Sección 1.2.2.

Los datos de conductividad hidráulica se obtienen principalmente de las pruebas de bombeo y permeabilidad que pueden ser consultadas en estudios previos. Cuando esta información es difícil obtener se utilizan valores reportados en la literatura. En este caso, las pruebas de bombeo en el área de estudio son escasas por lo que se recurrió a datos publicados (Civita y De Maio, 1997).

CAPITULO 5. RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en la generación de mapas de información que se emplearon para los métodos SINTACTS y GOD a fin de conocer la vulnerabilidad del Valle de Calvillo (VC).

5.1 Procesamiento de la imagen de satélite

5.1.1 Correcciones de la imagen

Una revisión inicial a la imagen DOY27 (27 de enero de 2002) mostró que no hay bandeado, ni líneas con datos perdidos, así como píxeles con valores anómalos que causen ruido y, por tanto, una identificación errónea de las características en la superficie de interés en el estudio. También se consideró no aplicar la corrección geométrica ni radiométrica (ver Sección 4.2.2).

La corrección atmosférica se aplicó mediante el método de Chavez a fin de reducir los efectos atmosféricos al momento de adquirir la imagen. La tabla 5.1 y figura 5.1 muestran los valores máximos y mínimos del histograma para cada una de las bandas y los valores obtenidos después de aplicar el método. La banda 6 no se usó.

Tabla 5.1. Valores de máximos y mínimos de las bandas originales y corregidas para la dispersión atmosférica de la imagen DOY27

| Bandas originales | Mínimo | Máximo | Bandas corregidas | Mínimo | Máximo |
|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
| Banda 1 | 40 | 194 | Banda 1 | 0 | 154 |
| Banda 2 | 24 | 202 | Banda 2 | 0 | 178 |
| Banda 3 | 19 | 226 | Banda 3 | 0 | 207 |
| Banda 4 | 15 | 205 | Banda 4 | 0 | 190 |
| Banda 5 | 6 | 217 | Banda 5 | 0 | 211 |
| Banda 7 | 5 | 199 | Banda 7 | 0 | 194 |

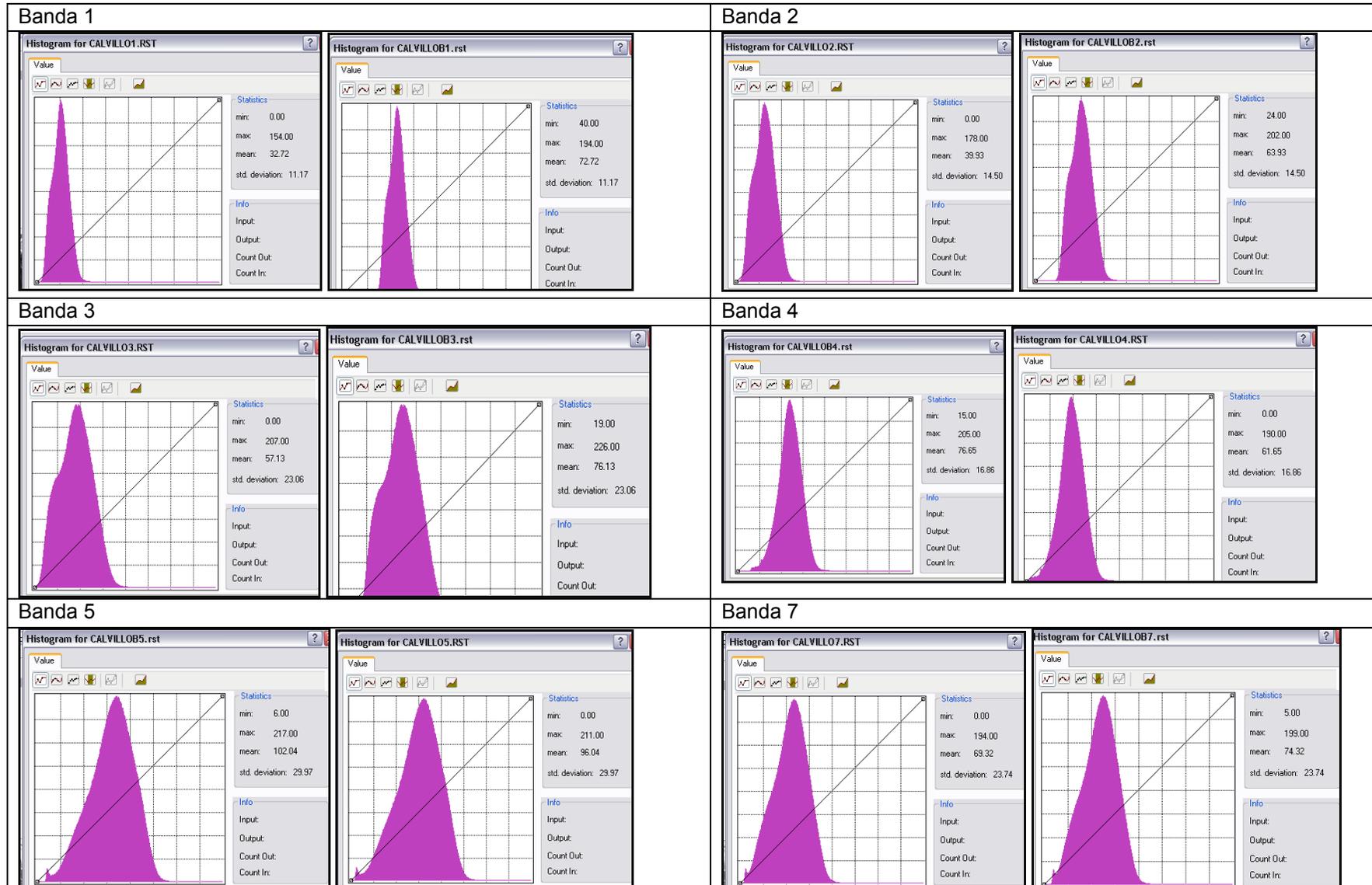


Figura 5.1. Histogramas de las bandas originales y corregidas de la imagen DOY27_2002: valores máximo, mínimo, promedio y desviación estándar

5.1.2 Clasificación no supervisada

Para lograr una clasificación con un mejor detalle se aplicó el comando de **clasificación de clúster opción fine** en el software IDRISI. Esta clasificación no es muy estricta, permitiendo tener clases con picos no tan altos con respecto a los píxeles vecinos (K-medias). Así, el usuario establece el número máximo de clases en función del uso que dará al producto final. De esta manera, se definieron seis clases con base en las observaciones realizadas en la imagen y los sitios donde se presume la presencia de lineamientos y el porcentaje de clasificación fue 1.5%. El resultado se muestra en la Figura 5.2

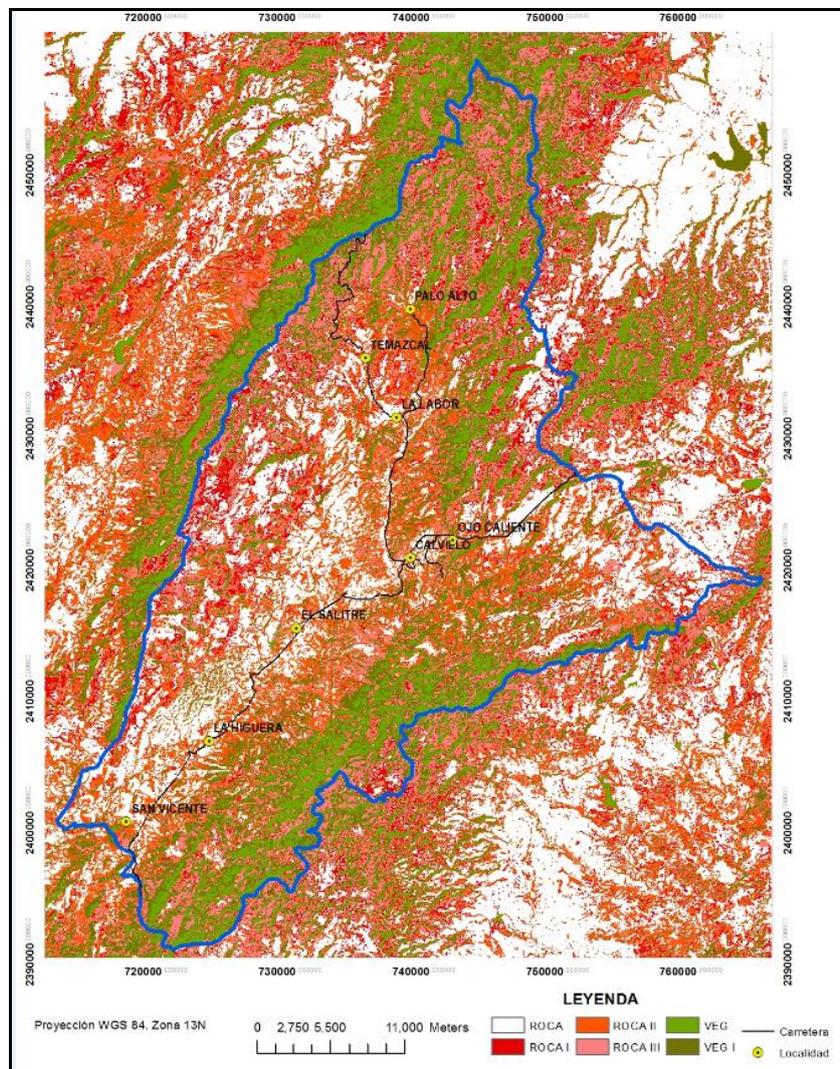


Figura 5.2. Mapa obtenido al aplicar la clasificación no supervisada a la imagen DOY27

Los campos mostrados en la Figura 5.1 para rocas representan las unidades litológicas: riolita–ignimbrita, toba riolítica, conglomerado, así como dos tipos de

vegetación que pueden ser asociados a bosques y cultivos o vegetación no densa. Las clases obtenidas fueron:

VEG = bosques

VEG1 = zonas de cultivos y escasa vegetación

ROCA = material tobaceo que en la imagen se observa de color blanco

ROCAI = material de ignimbrita riolita

ROCAII = material de roca con vegetación y

ROCA III = depósitos de conglomerado y depósitos aluviales

El campo VEG se ubica en las partes altas de la cuenca, representando bosques (vegetación densa). VEG1 representa vegetación natural y zonas de cultivo, las cuales se ubican en las partes bajas, así como en las laderas de la sierra. ROCA se ubica al sur del VC en la ladera de la sierra, mientras ROCAI y ROCAII están en las laderas y partes altas y medias de la sierra, respectivamente. Finalmente, ROCAIII se encuentra principalmente en la parte central del VC.

5.1.3 Clasificación supervisada

En este caso, no se tenían puntos de control (la información colectada en campo sólo se enfocó a algunos pozos de visita). Aunque otra opción fue usar las firmas espectrales que se obtuvieron para el tipo de minerales que componen las rocas (ver 4.1.2) no se consideró adecuado al no tener la seguridad de que sólo se estaría observando dichas firmas. Por ello, se emplearon las clases obtenidas de la clasificación no-supervisada para definir los campos de entrenamiento y aplicar la clasificación supervisada.

En la definición de cada campo se buscó que hubiese al menos 50 píxeles, los cuales se distribuyeron al azar en la imagen. Una vez definidos los campos de entrenamiento se aplicó el **proceso de la distancia mínima o euclidiana** donde se analizan las áreas designadas en los campos de entrenamiento y se calcula el promedio en cada una de las bandas para cada campo. Esos valores promedio definen la localización de las clases centrales en el espacio espectral (Bhatta 2008). La distancia euclidiana se emplea para calcular las distancias entre los píxeles y el centro de los grupos. La Figura 5.3 muestra el resultado al aplicar la clasificación supervisada usando las clases definidas en la clasificación no-supervisada.

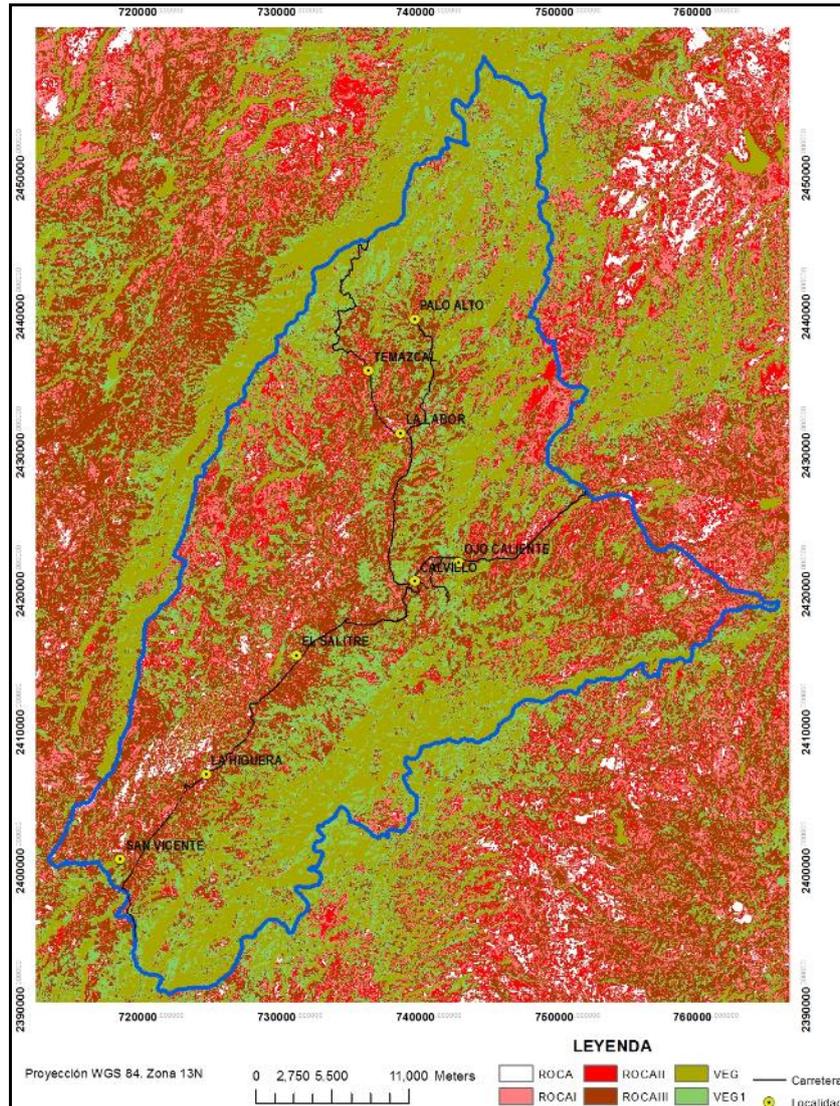


Figura 5.3. Mapa obtenido al aplicar la clasificación supervisada a la imagen DOY27

Comparando las Figura 5.2 y 5.3 se aprecia una disminución en el área clasificada como ROCA y un incremento en VEG, lo cual es probable debido a la presencia de árboles en la sierra. Asimismo, se observó una mayor presencia de ROCA III que son depósitos de conglomerados, lo cual está de acuerdo con las características geológicas de la zona.

Al obtener la firma espectral de las clases obtenidas (Fig. 5.4) se aprecia una clara separación entre la banda 2 y 5, aunque VEG1 llega a confundirse con ROCA II en la banda 4 y ROCAIII en la banda 5. Esto puede asociarse a que las formaciones no siempre están expuestas encontrándose cubiertas por la vegetación o con el suelo.

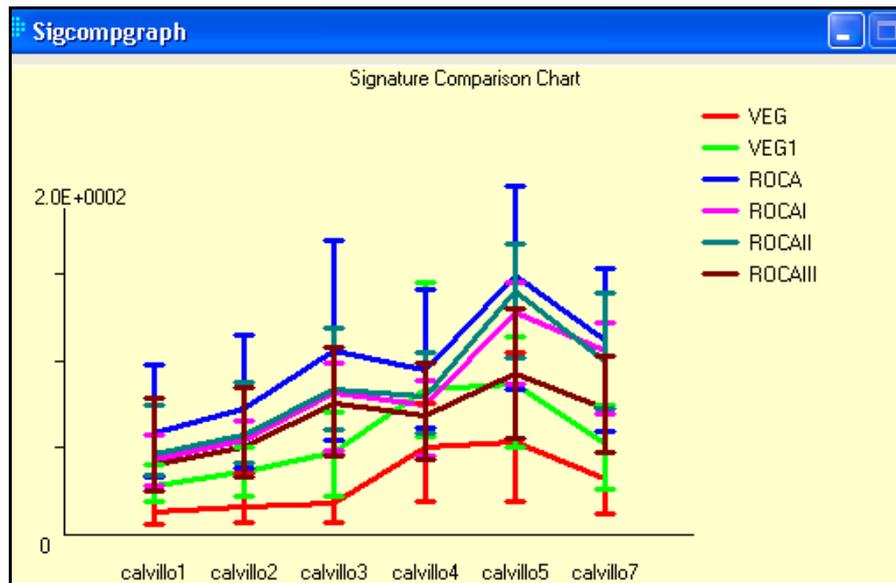


Figura 5.4. Diagrama de las firmas espectrales de la clasificación supervisada

Dado que es importante establecer la precisión con la que fue clasificada la superficie a partir del empleo de técnicas de percepción remota, se definió la matriz de error para obtener la precisión global, la del usuario y del producto y el estadístico de Kappa. La Tabla 5.2 muestra la matriz de error obtenida, donde a fin de facilitar la comparación se extrajo una imagen de Google Earth de la zona de estudio. El resultado dio un total de 12 puntos mal clasificados, lo que representa un 85 % de efectividad, lo que hace al proceso de clasificación aceptable.

Tabla 5.2. Matriz de error mostrando los errores por omisión y comisión

| | | REALIDAD (Google Earth) | | | | | | | |
|--------|----------------------|-------------------------|----------|----------|------------|----------------------|----------|-----------------------|------|
| IMAGEN | | ROCA | ROCAI | ROCAII | ROCAIII | VEG | VEGI | Errores de Comisión % | |
| | ROCA | //////// | | I | II | | | 8/10 | 80 |
| | ROCAI | I | //////// | | III | | | 7/10 | 70 |
| | ROCAII | | | //////// | III | | | 7/10 | 70 |
| | ROCAIII | | | | ////////// | | I | 17/18 | 94.5 |
| | VEG | | | II | | //////////////////// | | 23/24 | 95.8 |
| | VEGI | II | II | | | | //////// | 10/12 | 83.5 |
| | Errores de Omisión % | | 8/9 | 7/8 | 7/9 | 17/24 | 23/23 | 10/11 | |
| | | 88.8 | 87.5 | 77.7 | 70.8 | 100 | 90 | | |

5.1.4 Componentes Principales

Como se vio en la Sección 2.4.4 se tienen diferentes métodos para aplicar el ACP, en este trabajo se optó por la matriz de correlación. De esta manera se aplicó la matriz para las seis bandas de las cuales se estableció primero si existía algún indicio de correlación entre ellas mismas analizando los diagramas de dispersión (tabla 5.3).

Tabla 5.3. Matriz de correlación entre bandas

| COR MATRX | calvillob1 | calvillob2 | calvillob3 | calvillob4 | calvillob5 | calvillob7 |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| calvillob1 | 1.000 | 0.986 | 0.974 | 0.832 | 0.874 | 0.899 |
| calvillob2 | 0.986 | 1.000 | 0.991 | 0.874 | 0.899 | 0.913 |
| calvillob3 | 0.974 | 0.991 | 1.000 | 0.873 | 0.913 | 0.923 |
| calvillob4 | 0.832 | 0.874 | 0.873 | 1.000 | 0.898 | 0.858 |
| calvillob5 | 0.874 | 0.899 | 0.913 | 0.898 | 1.000 | 0.979 |
| calvillob7 | 0.899 | 0.913 | 0.923 | 0.858 | 0.979 | 1.000 |

La tabla muestra altas correlaciones en las bandas del visible, así como en la banda 7. La banda 4 tiene la menor correlación con respecto a las otras bandas (0.83 a 0.90). La mejor correlación se da entre las bandas 2 y 3 y 5 y 7. En la construcción de la matriz de correlación se dio la misma importancia a todas las bandas, con lo cual se evita que las de mayor varianza sean las que más aportan solamente, esto atenúa el efecto de la diferencia de variabilidad entre bandas, sobre todo porque ésta puede deberse a diferencias entre las medias de los ND de los píxeles de distintas bandas. Así, se da el mismo peso a todas las bandas. La tabla 5.4 muestra los autovalores y autovectores, mientras que la tabla 5.5 presenta las correlaciones entre los componentes de las bandas. Estas tablas se emplean porque aunque se requieren los p componentes principales para reproducir la variabilidad total, muchas veces la mayor parte de ella está contenida en un número menor de componentes m . En ese caso, reemplazando las p bandas por los m componentes, se reduce la dimensionalidad del problema conservando casi la totalidad de la información (Ferrero et al., 2002).

Tabla 5.4. Autovalores y autovectores de la matriz de correlación

| COMPONENTE | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| % var. | 92.740 | 3.949 | 2.620 | 0.384 | 0.220 | 0.087 |
| eigenval. | 5.564 | 0.237 | 0.157 | 0.023 | 0.013 | 0.005 |
| calvillob1 | 0.409 | -0.501 | -0.043 | -0.620 | -0.296 | -0.327 |
| calvillob2 | 0.416 | -0.363 | -0.140 | 0.124 | 0.054 | 0.811 |
| calvillob3 | 0.417 | -0.301 | -0.057 | 0.691 | 0.170 | -0.475 |
| calvillob4 | 0.391 | 0.532 | -0.722 | -0.145 | 0.127 | -0.073 |
| calvillob5 | 0.408 | 0.432 | 0.375 | 0.186 | -0.684 | 0.066 |
| calvillob7 | 0.409 | 0.238 | 0.560 | -0.257 | 0.630 | -0.009 |

Tabla 5.5. Correlaciones entre componentes y bandas

| COMPONENTE | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6 |
|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| calvillob1 | 0.964 | -0.244 | -0.017 | -0.094 | -0.034 | -0.024 |
| calvillob2 | 0.981 | -0.177 | -0.056 | 0.019 | 0.006 | 0.059 |
| calvillob3 | 0.983 | -0.147 | -0.022 | 0.105 | 0.019 | -0.034 |
| calvillob4 | 0.922 | 0.259 | -0.286 | -0.022 | 0.015 | -0.005 |
| calvillob5 | 0.963 | 0.210 | 0.148 | 0.028 | -0.079 | 0.005 |
| calvillob7 | 0.965 | 0.116 | 0.222 | -0.039 | 0.072 | -0.001 |

A partir de ambas tablas (5.4 y 5.5), se observa que el primer componente sintetiza la mayor variación con un porcentaje de 92.74 siendo insignificantes las demás contribuciones y ésta asociado significativamente con todas las bandas. Excepto con la 4 donde la relación disminuye aunque el valor de correlación (0.92) es bueno. A diferencia del segundo componente donde la banda 4 proporciona la mejor correlación (0.26) con una variación total cerca a 4%. Los demás componentes como se mencionó presenta correlaciones muy bajas, lo cual lleva a considerar los primeros dos componentes al tener una variación total conjunta de 96.67%. De esta manera se trabajará en dos dimensiones en lugar de seis. El componente 1 sintetiza la información de todas las bandas excepto de la banda 4, la cual está asociada al componente 2.

Finalmente, a fin de resaltar algunas características de la superficie que permitan identificar claramente los lineamientos obtenidos, se aplicó a la imagen ACP (componente 1 y 2) el realce de bordes, mediante el filtro High Pass de 3x3. Este filtro resalta rasgos con frecuencias altas y suprime, los componentes de frecuencias bajas de una imagen. En general, aristas o bordes agudos son rasgos de alta frecuencia por ello proporcionan una mejor ubicación de los lineamientos o fallas como se muestra en la Figura 5.5.

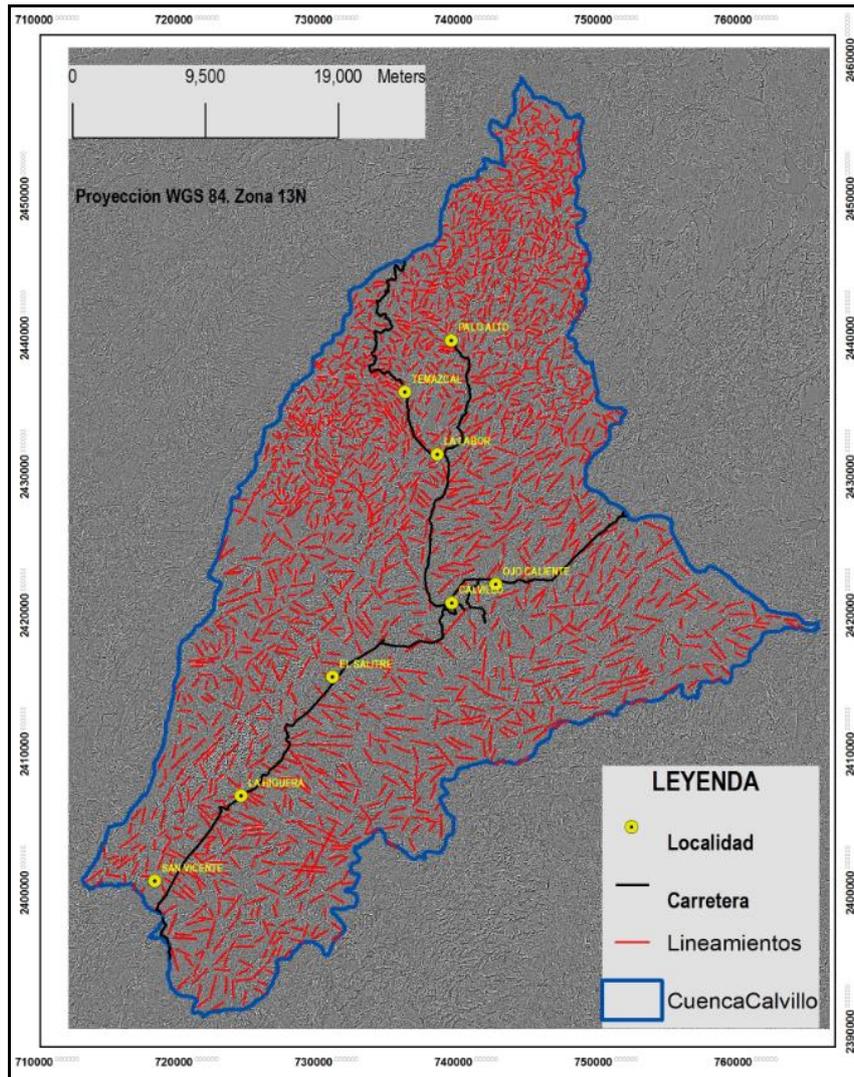


Figura 5.5. Mapa de lineamientos obtenidos aplicando filtro High Pass (3X3).

5.2 Estructuras Geológicas

Una vez aplicando el filtro de realce, se utilizó la imagen pancromática de la imagen DOY27 (comando merge) para resaltar las estructuras geológicas a fin de distinguir con mayor claridad los lineamientos encontrados al presentar un tamaño de píxel de 16X16 m. Así, resulta más fácil observar las topofomas e identificar lineamientos paralelos, los cuales se asocian con fallas normales localizadas en los flancos del valle dando origen al graben de Calvillo.

Para definir los elementos lineales del relieve se tomaron algunos de los indicadores mencionados por Cotilla et al. (2005) que pudieran estar presentes en la zona de estudio como:

- tramos lineales de cauces de ríos
- lineamientos de valles fluviales

- límites de forma lineal de distintos tipos de paisajes
- cambios de pendientes y alturas (ayudados con el DEM)

La Figura 5.6 muestra la representación del comportamiento de la geología estructural en el VC, la cual es básica para entender la morfología en el relieve, así como su evolución y dinámica, datos necesarios en hidrogeología. La totalidad de los elementos lineales del paisaje (megagrietas) refleja en términos cualitativos y cuantitativos la red de grietas y fallas de las rocas. Por ello, una mayor o menor densidad de fracturamiento puede ser asociada con zonas virtuales de recarga o descarga, respectivamente.

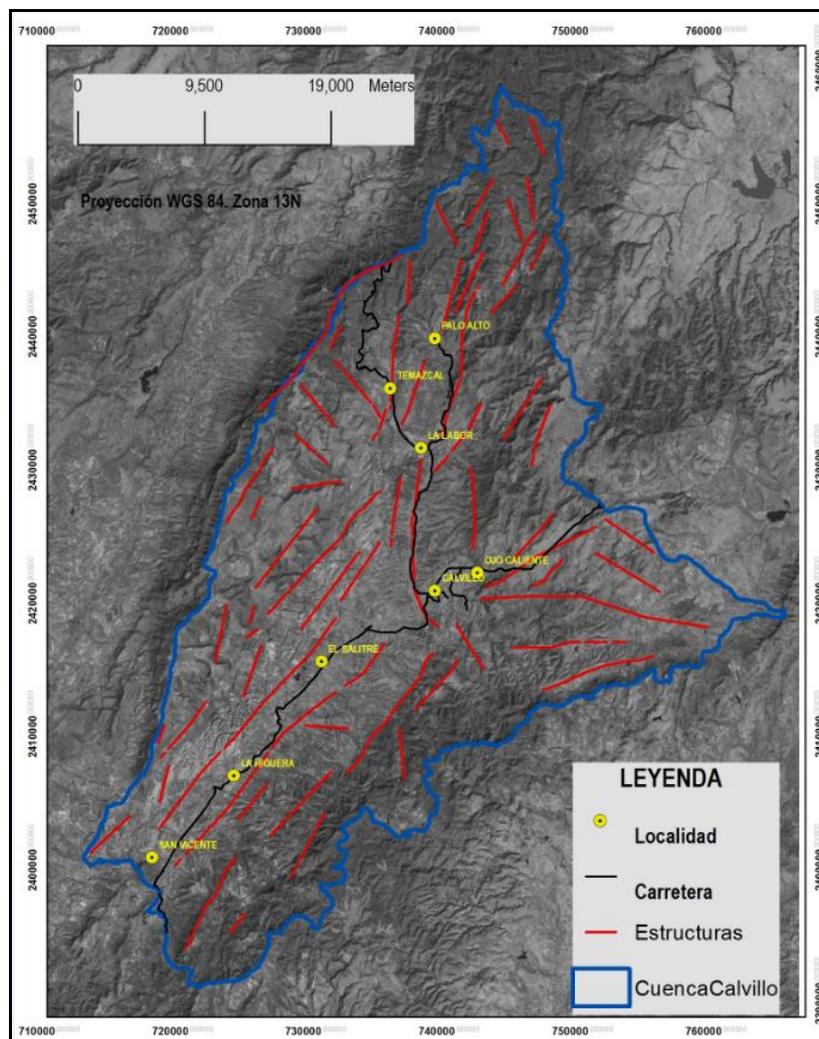


Figura 5.6. Imagen pancromática con estructuras en el VC

La Figura. 5.5 y 5.6 muestran dos sistemas de lineamientos preferenciales (fracturas, fallas y rasgos estructurales geológicos). Posteriormente, mediante la herramienta COGO de ArcGis se hicieron los cálculos de las direcciones acimutales, para lo cual se utilizaron las direcciones: 0°, 22°, 45°, 67°, 90°,

270°, 292°, 314°, y 336°. Los resultados se trazaron en una rosa de vientos encontrando dos direcciones preferenciales: N22°-E45° y N22°-O45° (Fig. 5.7).

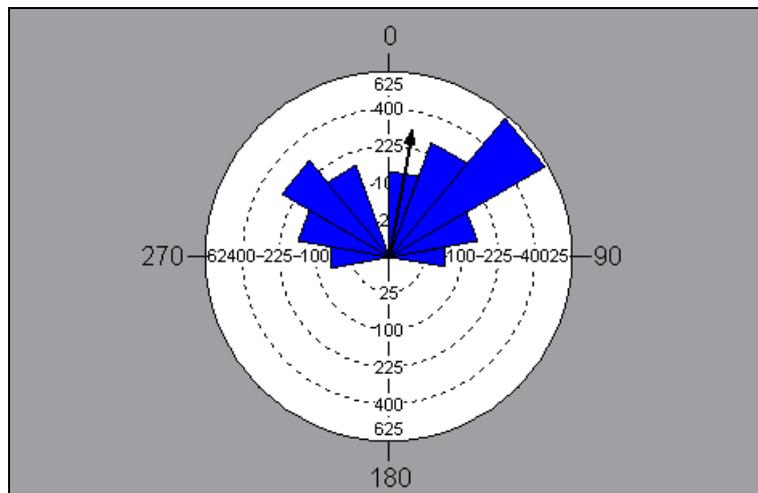


Figura 5.7. Rosa de los Vientos mostrando las direcciones preferenciales de los lineamientos

Lineamientos con orientación preferencial NE-SO se asocian a fallas o fracturas, provenientes de la Orogenia Laramide. Es posiblemente que algunas de estas fallas tengan alguna actividad tectónica o magmática debido que en algunas muestras de los pozos de visita se reportó cierto grado de hidrotermalismo.

La falla maestra reportada por Aranda (2002) pertenece al sistema de N45°E. Los lineamientos con dirección N45°O corresponden a fallas conjugadas que son perpendiculares al otro sistema. Esto permite inferir que el subsuelo tiene el mismo patrón de fallas, de manera que las direcciones de las fosas tectónicas tendrán la misma orientación NE-SO y NO-SE.

La frecuencia de lineamientos se obtuvo aplicando el número de éstos entre el área total (Km²):

$$\text{Frecuencia de lineamientos} = 1275/1373.55 = 0.93$$

5.3 Hidrogeología

Durante las visitas de inspección a los pozos reportados por la CONAGUA, se presentaron problemas de accesibilidad o bien no se contaba con la infraestructura necesaria para la tomar los niveles de agua, por lo que se limitó el registro a su ubicación cartográfica. Esta última, se obtuvo con un GPS BRUTTON en coordenadas UTM.

Para los pozos de agua potable, se contó con el apoyo de la Oficina de Agua Potable de la presidencia municipal de Calvillo, ya que la mayoría se encontraban cercados y cerrado el acceso.

En general, de los 309 pozos censados solo se muestrearon 42 de ellos. La información de los pozos visitados se clasificó de la manera siguiente (ver tabla 5.6):

- Pozos utilizados para agua potable: 38
- Pozos utilizados para uso agrícola: 2.
- Pozos fuera de servicio: 2 (anteriormente de uso era agrícola)

Tabla 5.6. Aprovechamientos visitados para toma de niveles piezométricos

| Num | UTM_X | UTM_Y | APROVECHAM | Q | PT | NE | USO | TEMP |
|-----|--------|---------|------------|----|-------|-------|-------------------|------|
| 1 | 739190 | 2438818 | Pozo | 3 | 185.0 | -1.0 | Potable | 46.7 |
| 2 | 739952 | 2435371 | Pozo | 6 | 128.0 | -1.0 | Potable | 28.2 |
| 3 | 736283 | 2435289 | Pozo | 7 | 153.0 | 48.3 | Potable | -1.0 |
| 4 | 741854 | 2433237 | Pozo | 6 | 160.0 | -1.0 | Potable | -1.0 |
| 5 | 739892 | 2432880 | Pozo | 5 | 102.4 | 35.5 | Potable | 24.5 |
| 6 | 741067 | 2432090 | Pozo | 5 | 3.2 | -1.0 | Potable | 26.0 |
| 7 | 737387 | 2430984 | Pozo | 6 | -1.0 | -1.0 | Potable | 29.0 |
| 8 | 736575 | 2426578 | Pozo | 6 | 160.0 | -1.0 | Potable | 40.2 |
| 9 | 745897 | 2424013 | Pozo | 6 | 129.0 | -1.0 | Potable | 34.9 |
| 10 | 737740 | 2421388 | Pozo | 6 | 144.0 | -1.0 | Potable | 29.8 |
| 11 | 739605 | 2421035 | Pozo | -1 | -1.0 | -1.0 | Potable | 44.2 |
| 12 | 737989 | 2420696 | Pozo | 5 | 150.0 | 70.7 | Potable | 48.4 |
| 13 | 741591 | 2420431 | Pozo | 28 | 115.0 | -1.0 | Potable | 37.8 |
| 14 | 733649 | 2419502 | Pozo | 2 | 134.0 | -1.0 | Potable | 28.2 |
| 15 | 738948 | 2419371 | Pozo | 5 | 122.0 | 34.4 | Potable | -1.0 |
| 16 | 735958 | 2418879 | Pozo | -1 | -1.0 | -1.0 | Fuera de servicio | -1.0 |
| 17 | 735171 | 2418359 | Pozo | 10 | 162.0 | -1.0 | Potable | 29.8 |
| 18 | 736950 | 2418235 | Pozo | 6 | 101.0 | -1.0 | Potable | 24.0 |
| 19 | 732427 | 2417754 | Pozo | 5 | 102.0 | -1.0 | Potable | 29.0 |
| 20 | 736125 | 2417105 | Pozo | -1 | 184.5 | 100.7 | Potable | -1.0 |
| 21 | 727443 | 2416943 | Pozo | 6 | 128.0 | -1.0 | Potable | 37.0 |
| 22 | 736255 | 2416401 | Pozo | 6 | 228.0 | -1.0 | Potable | 26.6 |
| 23 | 735040 | 2415387 | Pozo | -1 | 300.0 | 165.0 | Potable | -1.0 |
| 24 | 730715 | 2414585 | Pozo | 7 | -1.0 | -1.0 | Potable | 30.6 |
| 25 | 730229 | 2413709 | Pozo | 5 | 80.0 | 47.2 | Potable | -1.0 |
| 26 | 729620 | 2412640 | Pozo | -1 | -1.0 | 31.3 | Potable | -1.0 |
| 27 | 735106 | 2412181 | Pozo | 6 | 173.0 | -1.0 | Riego | 35.2 |
| 28 | 729201 | 2411552 | Pozo | 6 | 64.0 | -1.0 | Potable | 28.7 |
| 29 | 728734 | 2411404 | Pozo | 7 | 103.0 | 36.0 | Potable | -1.0 |
| 30 | 729419 | 2411151 | Pozo | 6 | 120.6 | -1.0 | Potable | 24.9 |
| 31 | 730492 | 2410243 | Pozo | 6 | 82.0 | -1.0 | Potable | 25.6 |
| 32 | 734430 | 2409417 | Pozo | 8 | 300.0 | 135.2 | Riego | 30.9 |
| 33 | 724350 | 2406863 | Pozo | 4 | -1.0 | 14.0 | Potable | -1.0 |
| 34 | 723981 | 2405760 | Pozo | -1 | -1.0 | 1.0 | Potable | 35.8 |
| 35 | 720869 | 2405102 | Pozo | -1 | -1.0 | 0.0 | Potable | 37.5 |
| 36 | 719430 | 2404925 | Pozo | -1 | -1.0 | 1.3 | Potable | 25.0 |
| 37 | 719065 | 2403455 | Pozo | -1 | -1.0 | -1.0 | Fuera de servicio | -1.0 |
| 38 | 715940 | 2400266 | Pozo | -1 | -1.0 | -1.0 | Potable | 21.0 |
| 39 | 720000 | 2399279 | Pozo | -1 | -1.0 | 40.8 | Potable | -1.0 |
| 40 | 720000 | 2399279 | Pozo | -1 | -1.0 | -1.0 | Potable | 36.0 |
| 41 | 722312 | 2398780 | Pozo | -1 | -1.0 | 33.4 | Potable | 27.2 |
| 42 | 719941 | 2398586 | Pozo | -1 | -1.0 | -1.0 | Potable | 36.9 |

=Profundidad Total, TEMP = Temperatura, NE = Nivel Estático. Q = Gasto

De acuerdo con la tabla 5.6, las profundidades de los pozos varían de 180 a 500 m, con un gasto promedio de 7.4 l/s.

De los 42 pozos visitados se tomaron, durante los meses de Junio–Julio de 2009, muestras de agua de 31 y registros de los niveles estáticos de 17. De los 42 pozos, 35 se encuentran en acuífero libre de medio fracturado, 6 de ellos en

acuífero libre de medio granular y sólo uno en acuífero confinado. En cuanto al **acuífero libre de medio fracturado**, se tomaron 11 lecturas de niveles estáticos mostrando tres direcciones:

- Flujo del Norte a la zona centro del Valle donde se observa la cota 1,960m en Temascal y la cota 1,940m en la localidad de Puerta de Fragua; aunque en Calvillo se obtuvo la cota de 1,600m.
- Flujo SE de la cabecera de Calvillo en Tepetate de Arriba a una cota de 1,640m, la cual fluye en dirección a Ojo de Agua y Calvillo.
- Flujo en San Vicente y Rodeo con cotas de 1,560 y 1,520 m, respectivamente.

La recarga del acuífero es al Norte en Palo Alto y Terrero de la Labor; aunque también se presenta en los flancos de la cuenca. Esto debido a que las cotas son mas someras en las partes altas y profundas en los valles, como se puede apreciar con la red de flujo del agua subterránea (Fig. 5.8).

En cuanto a los pozos ubicados en el **acuífero libre de medio granular**, la mayoría de estos se encontraron trabajando durante la visita, razón por la cual las lecturas fueron escasas; solo se tomaron 3 lecturas. La primera lectura corresponde al área de Ojo Caliente, la cual inicia en la cota 1,620m. La segunda lectura se tomó en Calvillo donde se tienen cotas entre 1,600m a 1,560m. La tercera medición se realizó en Jaltiche de Abajo, ubicado entre las cotas de 1,540m y 1,520m y terminando en la localidad la Higuera a 1,500m. La dirección de flujo parte del NE hacia la parte SO como se muestra en la Figura 5.9.

En general, se observan tres secciones hidrogeológicas: al norte, en la parte central y en la parte sur del de la cuenca. Las cuales coinciden con las secciones proporcionadas por la CONAGUA (Fig. 5.10).

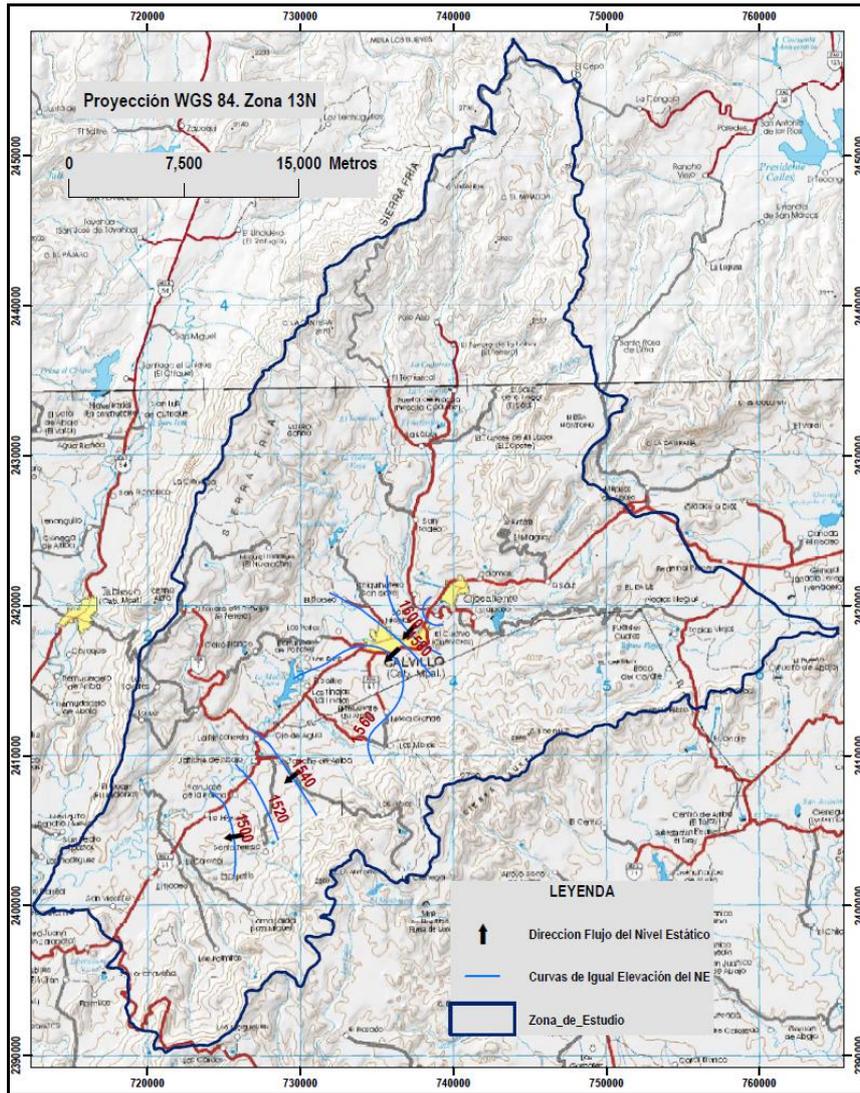


Figura 5.8. Mapa de curvas de elevación del nivel estático en el acuífero libre de medio fracturado (Junio-Julio 2009).

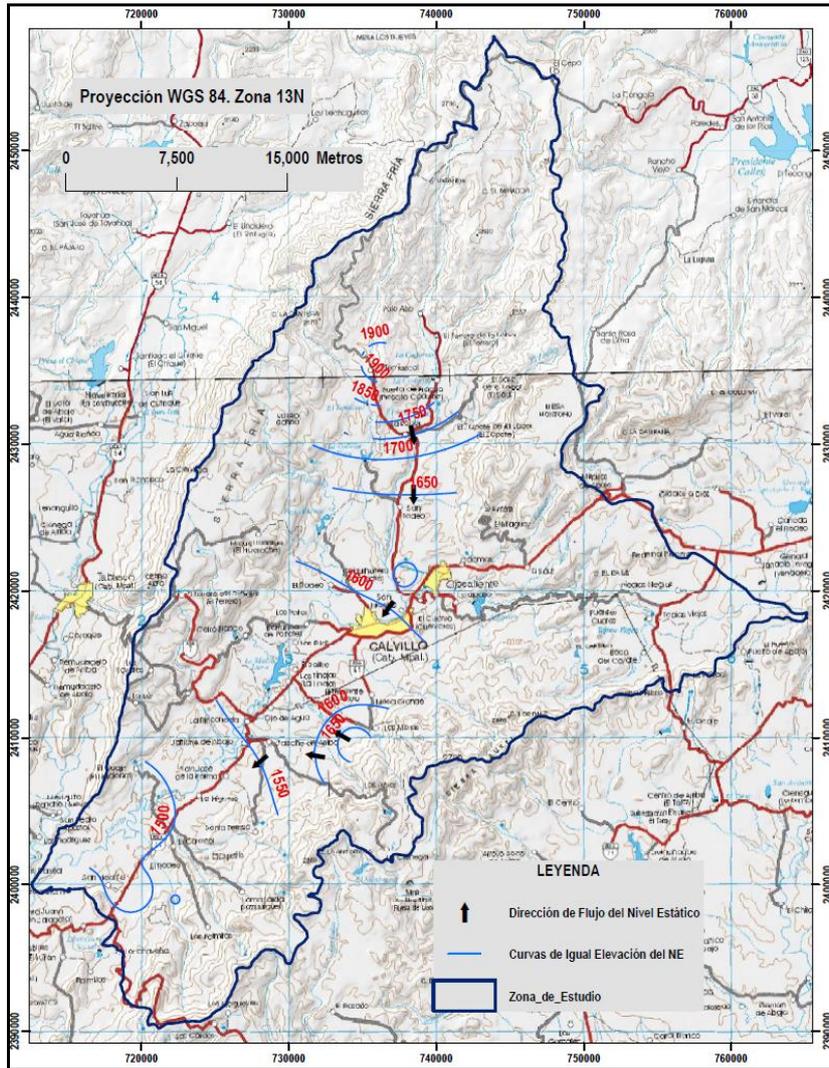


Figura 5.9. Mapa de curvas de elevación del nivel estático acuífero libre del medio granular, (Junio-Julio 2009).

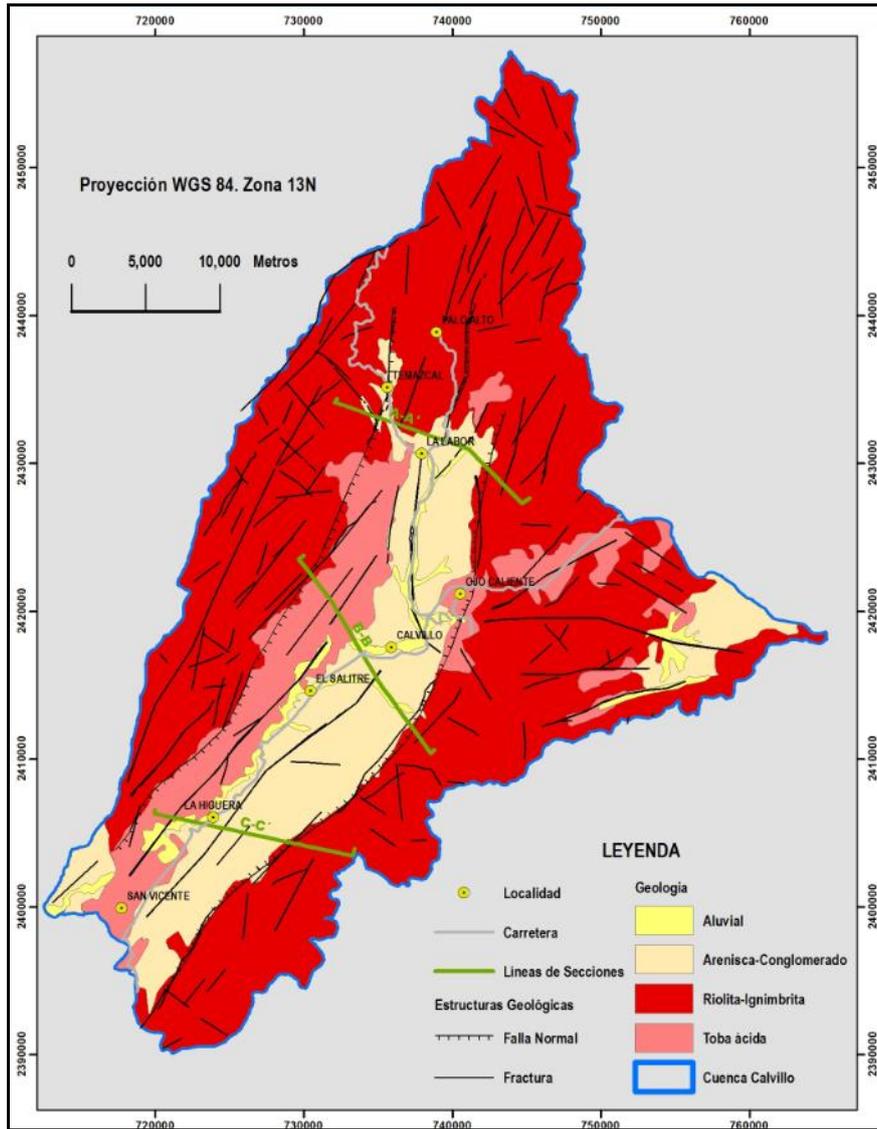


Figura 5.10. Mapa geológico del VC con las secciones hidrogeológicas

5.4 Aplicación de los métodos de vulnerabilidad

5.4.1 Método GOD

Para establecer la vulnerabilidad se utilizó la geología de la (Fig. 5.5). Asimismo, se utilizó la textura de suelo con base en el continuo nacional de edafología Serie II del INEGI, (2008), los cortes litológicos de los pozos y las lecturas del nivel estático de estos obtenidas en los recorridos de campo.

Grado de confinamiento hidráulico (G)

Conociendo que el acuífero de Calvillo corresponde a un sistema de tipo libre formado por dos medios: granular y fracturado, y con el análisis de los registros de los cortes litológicos, geología y secciones hidrogeológicas (Figs. 5.9), se interpretaron las condiciones del subsuelo a fin de diferenciar las unidades hidrogeológicas que permitan distinguir zonas de recarga.

Se asignó un peso de 0.2 a aquellas unidades litológicas de riolita-ignimbrita, con el fin de minimizar cualquier posibilidad de impacto al acuífero al ser unidades con media a alta permeabilidad. Con respecto a la toba riolítica, el peso asignado es de 0.5 al estar en el medio fracturado y ubicarse en la parte Este de la cuenca donde la unidad se encuentra parcialmente cubierta por una unidad litológica arenisca-conglomerado y/o suelos.

En el medio granular del acuífero, se asignaron los valores de 0.6, 0.7, 0.8 y 1.0. El primero se aplicó a aquellas partes que tienen relación con la toba riolítica (norte y sur del valle), ya que actúan como un sistema, el valor 0.6 a los depósitos de arenisca-conglomerado y a la zona identificada como graben, Calvillo-Ojo Caliente. Por último, los depósitos aluviales tuvieron el valor de 1, al estar relacionados con los cauces principales de los ríos Calvillo y La Labor.

La Figura 5.11 muestra las unidades de confinamiento con la ubicación de los pozos con registros de los cortes litológicos para el municipio de Calvillo y la parte que le corresponde al estado de Zacatecas. El rango de valores es de 0.2, 0.5, 0.6 y 1.0 de acuerdo con los pesos asignados

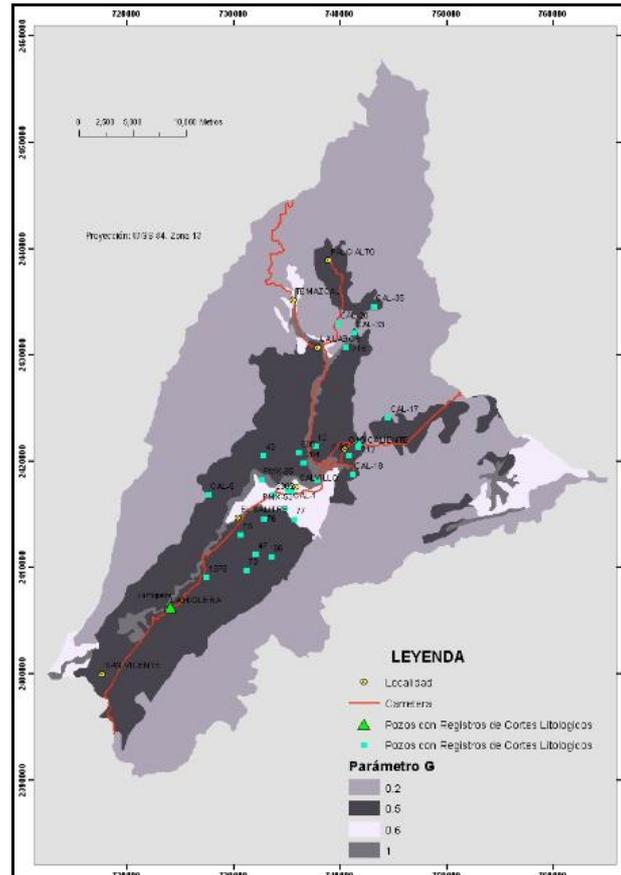


Figura 5.11. Valores ponderados para el parámetro G.

Ocurrencia del Sustrato Suprayacente

En este punto se determinan las características litológicas y grado de consolidación de la zona no saturada o capas confinantes. (O). Para ello, a las unidades litológicas riolita–ignimbrita y toba riolítica se les asignó un valor de 0.8, al ser clasificadas como lavas volcánicas recientes correspondiendo a material consolidado (rocas compactas). Areniscas-conglomerados y depósitos aluviales tuvieron un valor de 0.7 al ser clasificadas como gravas-coluviales, esto es, material no consolidado (rocas no compactas).

Cabe hacer mención que arenisca-conglomerado también se ubica dentro del campo de material consolidado en rango de porosas, pero de igual forma se le asigna el valor de 0.7. La Figura 5.12 muestra los resultados obtenidos para la definición del sustrato suprayacente.

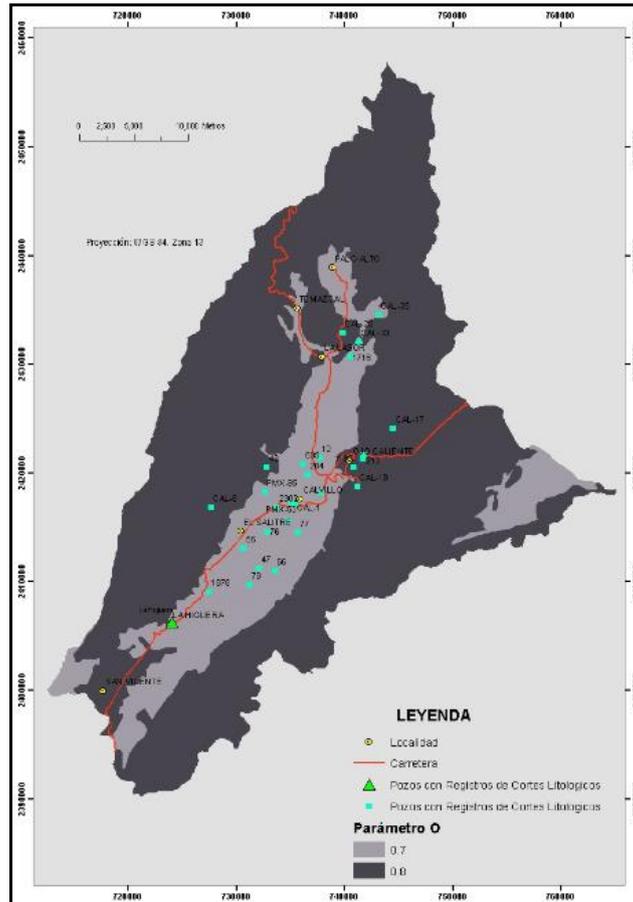


Figura 5.12. Valores ponderados para el parámetro O

Distancia al nivel del agua subterránea (no confinado) o al Techo del Acuífero (confinado) (D)

Los pesos se asignaron con base en los registros del censo de pozos de los niveles estáticos, así como con los registros de los cortes litológicos definiendo valores de 0.6 a 0.9 para los dos medios que forman el acuífero libre: granular y el fracturado.

El valor de 0.7 se asignó para profundidades promedio de 20-50m, las cuales se presentan en las localidades Labor, Mezcal, San Tadeo y Chiquihuitero y en la porción norte de la parte sur en Tinajas, Jaltiche, Higuera, Rodeo y San Vicente. Para niveles estáticos más profundos (mayor de 50m) como los presentes en el graben, localidades de Calvillo-Ojo Caliente, el valor es de 0.6. Finalmente, para depósitos aluviales con lecturas de 1.3 a 14m de profundidad, ubicados en la parte norte de la localidad del Rodeo, se les asignó valores de 0.8 y 0.9. La Figura 5.13 muestra el valor ponderado para la profundidad del nivel estático con los pesos asignados.

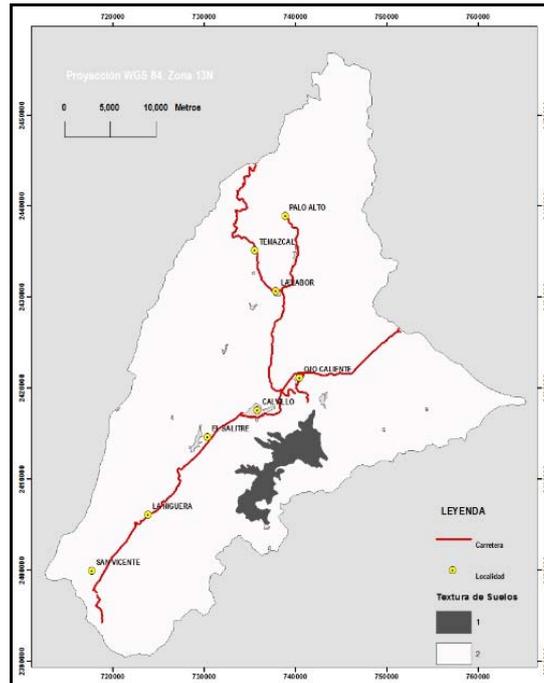


Figura 5.14. Textura de Suelos para los Valores ponderados para el parámetro S

Índice de vulnerabilidad

La tabla 5.8 muestra los valores asignados a cada parámetro (PARAM_G, PARAM_O y PARAM_D) en función de la unidad geológica a la que se asociaron. Posteriormente, se aplicó la ecuación 1.8 para obtener el índice de GOD (VULNERA) mediante la multiplicación de los parámetros G, O y D. Por último, se multiplica este índice por la textura (TEXT) para obtener la vulnerabilidad definitiva (Vul_GODS) para el acuífero de Calvillo (Fig. 5.15).

La riolita–ignimbrita muestra un valor de 0.19, lo que indica una vulnerabilidad baja de acuerdo con la clasificación de GOD (ver Fig. 1.10 y 1.11). Lo que lleva a considerar que la posibilidad de contaminación en la zona de recarga del acuífero es menor. En cuanto a la toba riolítica, se presenta una vulnerabilidad media con valor de 0.3-0.5, en particular en la parte oeste del VC donde se tiene una franja de esta unidad. Esto indica que el acuífero en la zona es muy vulnerable con excepción de aquellos elementos que sean absorbidos o bien cambiados de su composición original.

Tabla 5.7. Aplicación de los valores ponderados para obtener la vulnerabilidad mediante el método GODS.

| AREA | CLASE TEXT | PARAM G | PARAM O | PARAM D | VULNERA | VUL GODS | GRADO |
|---------------|------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 6805200.61211 | 2 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.28 | 0.56 | ALTA |
| 3435076.26755 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.32 | 0.64 | ALTA |
| 13150549.7419 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.7 | 0.28 | 0.56 | ALTA |
| 4266763.76434 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.34 | 0.68 | ALTA |
| 973490.375959 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.34 | 0.68 | ALTA |
| 1363893.78988 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.34 | 0.68 | ALTA |
| 59823.414513 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.34 | 0.68 | ALTA |
| 1303862.41159 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.34 | 0.68 | ALTA |
| 27730976.9865 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.25 | 0.5 | ALTA |
| 5418687.52515 | 2 | 1 | 0.7 | 0.9 | 0.63 | 1.26 | EXTREMA |
| 2552304.31858 | 2 | 1 | 0.7 | 0.9 | 0.63 | 1.26 | EXTREMA |
| 6209695.61201 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.38 | 0.76 | EXTREMA |
| 2008025.56596 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.38 | 0.76 | EXTREMA |
| 28402539.4652 | 2 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.38 | 0.76 | EXTREMA |
| 2566656.47641 | 2 | 1 | 0.7 | 0.9 | 0.63 | 1.26 | EXTREMA |
| 31380818.31 | 2 | 1 | 0.7 | 0.9 | 0.63 | 1.26 | EXTREMA |
| 15854175.0298 | 2 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.17 | 0.34 | MEDIA |
| 4510937.13726 | 2 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.17 | 0.34 | MEDIA |
| 3691311.18357 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.19 | 0.38 | MEDIA |
| 2641029.17771 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.19 | 0.38 | MEDIA |
| 3627304.17264 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.19 | 0.38 | MEDIA |
| 21919033.8419 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.19 | 0.38 | MEDIA |
| 116625643.055 | 2 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.24 | 0.48 | MEDIA |
| 129328255.013 | 2 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 0.19 | 0.38 | MEDIA |
| 34134243.2119 | 2 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.24 | 0.48 | MEDIA |
| 26410322.166 | 2 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.24 | 0.48 | MEDIA |
| 892023427.816 | 2 | 0.2 | 0.8 | 0.6 | 0.1 | 0.2 | BAJA |

CLASES TEXT = Textura del Suelo, VULNERA = La multiplicación de los PARAM (G*O*D), VULD_GODS = Vulnerabilidad definitiva, GRADO = Vulnerabilidad en función del rango,

Algunos afloramientos ubicados en la parte este se clasificaron con una vulnerabilidad media correspondiéndole valor de 0.5. Esto indica que es vulnerable para aquellos contaminantes que continuamente son descargados, lo que es un riesgo para el acuífero.

La unidad arenisca-conglomerados se dividió en dos tipos:

- *vulnerabilidad media (Vm)*. La vulnerabilidad media (0.4 - 0.5) se ubica en la parte norte en las localidades Labor, Mezcal, San Tadeo y Chiquihuitero y al sur en Tinajas, Jaltiche, Higuera, Rodeo y San Vicente, debido a que existe un sistema entre los dos medios del acuífero. Las profundidades del nivel estático varían de 33 a 48m.
- *vulnerabilidad alta (Va)* con valores de 0.8 se encuentra presente en el área de Calvillo y Ojo Caliente donde se tiene la presencia del graben con profundidades del orden de 100 a 165m.

Los depósitos aluviales se clasificaron como de vulnerabilidad extrema (Vex) con un valor de 1.3. Al estar compuesto por materiales de arenas, arcillas, gravas y semiconsolidados representa zonas vulnerables a la mayoría de los lixiviados y/o contaminantes con un impacto muy rápido. Estas zonas tienen influencias en los ríos Calvillo y el Labor.

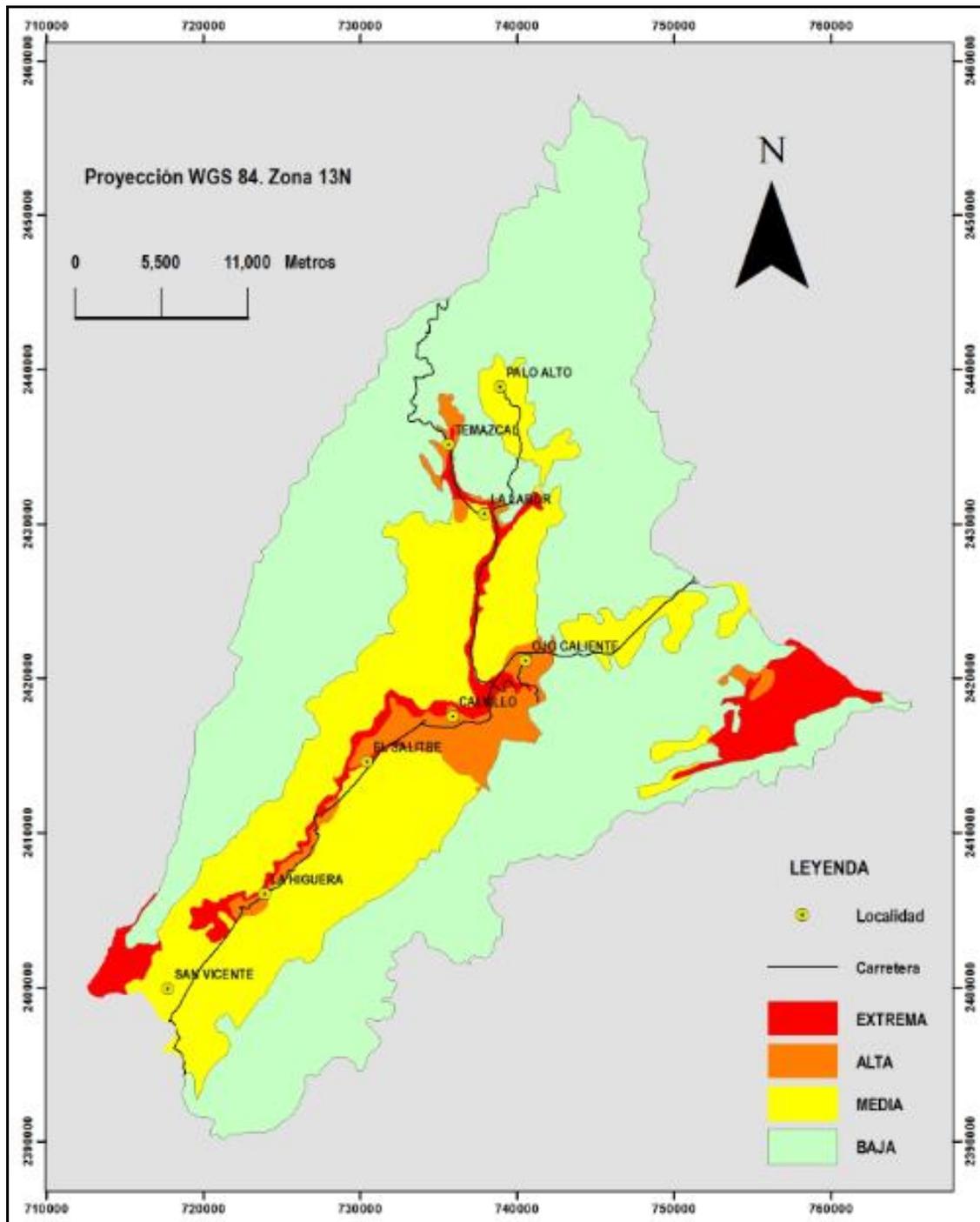


Figura 5.15. Mapa de vulnerabilidad del acuífero de Calvillo obtenida mediante el método GOD

5.4.2 Método SINTACS

El método SINTACS se describió en la sección 1.3 y su aplicación se realizará por cuadrantes para cada una de las capas de información, las cuales están formadas por: S, profundidad del nivel estático; I, infiltración efectiva; N, capacidad de atenuación de la zona no saturada; T, tipo de suelo; A, características hidrogeológicas del acuífero; C, conductividad hidráulica y S, topografía. El índice final de vulnerabilidad I_v se obtiene aplicando la ecuación. 1.2 y finalmente la vulnerabilidad mediante la ecuación. 1.10.

La determinación del índice SINTACS involucra multiplicar cada uno de los parámetros (r) por el peso (w) que se le asigna y se suma el total. El puntaje, r se obtiene de gráficas con valores de 0 a 10 (ver Sección 1.3). Valores altos de la suma representan indicios potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuífero. Los pesos (w) de cada parámetro son proporcionados para diferentes tipos de escenarios (normal, relevante, con drenaje, cárstico, fracturado) de acuerdo con la tabla 5.8 (Civita y De Maio, 1997). La Figura 5.16 se muestra una representación de las diferentes influencias que puede tener cada parámetro considerando los cinco escenarios hidrogeológicos de la tabla 5.8.

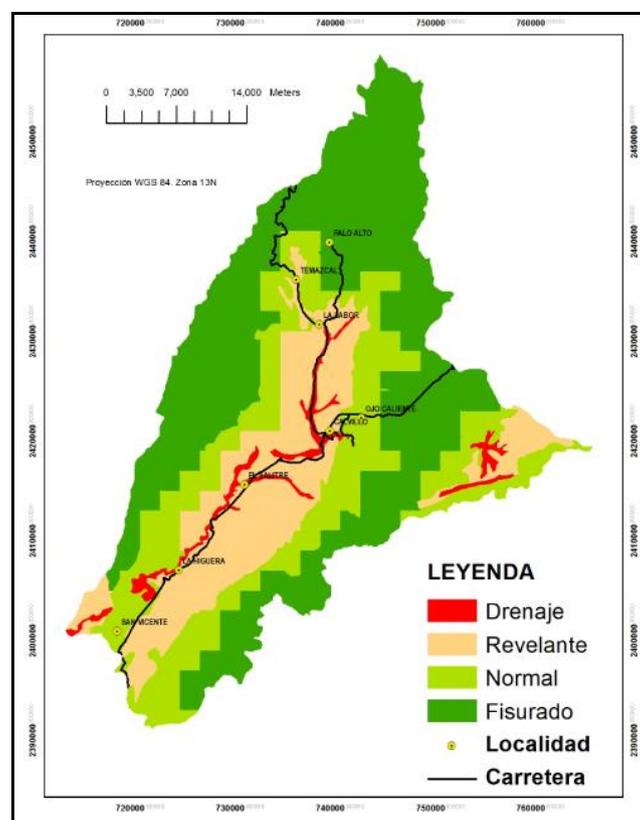


Figura 5.16. Distribución de los pesos

Tabla 5.8. Pesos asignados a cada parámetro en función del tipo de acuífero presente

| Parámetro | Impacto Normal | Impacto Relevante | Drenaje | Cársticos | Fisuras o fallas |
|-----------|----------------|-------------------|---------|-----------|------------------|
| S | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 |
| I | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| N | 5 | 4 | 4 | 1 | 3 |
| T | 3 | 5 | 2 | 3 | 4 |
| A | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 |
| C | 3 | 2 | 5 | 5 | 5 |
| S | 3 | 2 | 2 | 5 | 4 |

= Impacto normal (IN)

= Impacto relevante (IR) que representa actividad económica

Profundidad del nivel estático (S)

La profundidad del nivel estático es la distancia que hay del nivel del terreno a la superficie del agua en el subsuelo, por lo que es necesario contar con la información lo más actualizada para este parámetro como datos de las estructuras geológicas, así como de lineamientos. Para ello, se tomaron los datos del censo que se llevo durante el mes de Junio de 2009 con registros de 1.3 a 135 m para el acuífero libre tanto el medio granular como fracturado. De acuerdo a la Figura 1.3, las profundidades observadas dan una puntuación de 1.5 a 36.0, por lo que se le asigno un peso de 3-5 considerando los impactos relevante, drenaje y fracturado. (Fig. 5.17).

Los valores en el valle van de 3.5-7.0, salvo en algunas zonas como: parte de Calvillo con valores de 7.0-11.0, la Higuera de 7.0-11.0, parte de la localidad de San Vicente con 11.0-21.0. Los valores bajos corresponden a la parte alta de la cuenca, 0-3.5, los cuales coinciden con la presencia de riolita-ignimbrita y la toba riolítica.

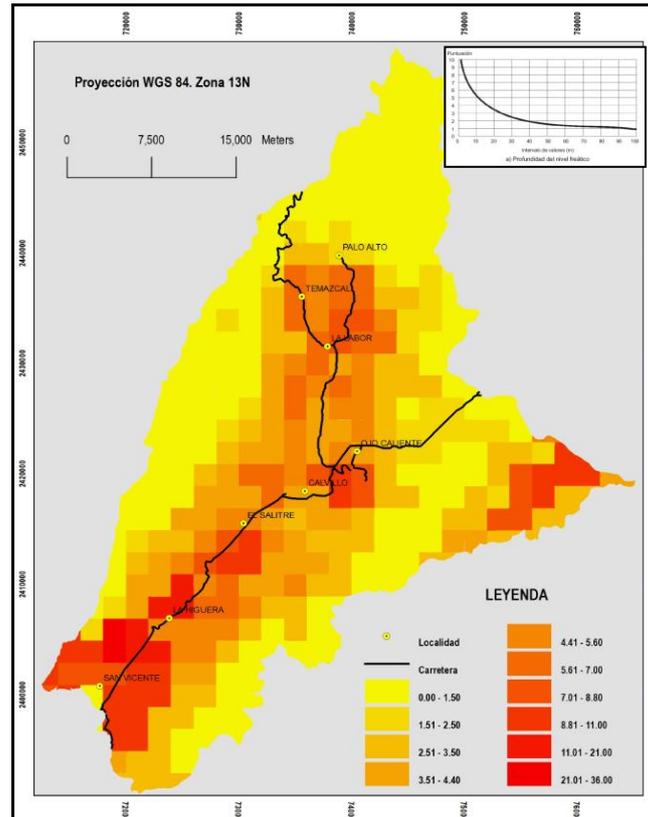


Figura 5.17. Distribución del índice de profundidad del nivel estático (S) para el valle de Calvillo

Recarga neta (In)

La recarga neta es el resultado de la cantidad de agua precipitada o bien el retorno de riego que se infiltra a través de la superficie del terreno y que puede ser retenida en el subsuelo. Aplicando las ecuaciones 1.3 a 1.7. Se construyó la (Fig. 5.18a).

El intervalo de valores es de 3.0 - 54, el cual se define por el agua que entra al sistema (precipitación y retorno de riego) y la que sale (evapotranspiración). La precipitación promedio anual es de 500 a 700 mm, por lo que se asocian pesos de 3 a 5, en donde el intervalo del puntaje para las áreas no agrícolas es de 1 a 4.5 y las agrícolas con 5 a 10.8 debido a la suma de las dos recargas (neta y retorno por riego) (Fig. 5.18a), los valores obtenidos son: no agrícolas de 3 a 20 y las agrícolas con 13.5 a 54 (Fig. 5.18b).

En la parte central del valle así como las zonas de riego, se puede distinguir que tienen los valores más altos debido a la influencia de las dos recargas. Los valores bajos se ubican al oeste y este de la localidad de La Higuera, al noroeste y oeste de Calvillo y en algunas zonas al norte de la cuenca.

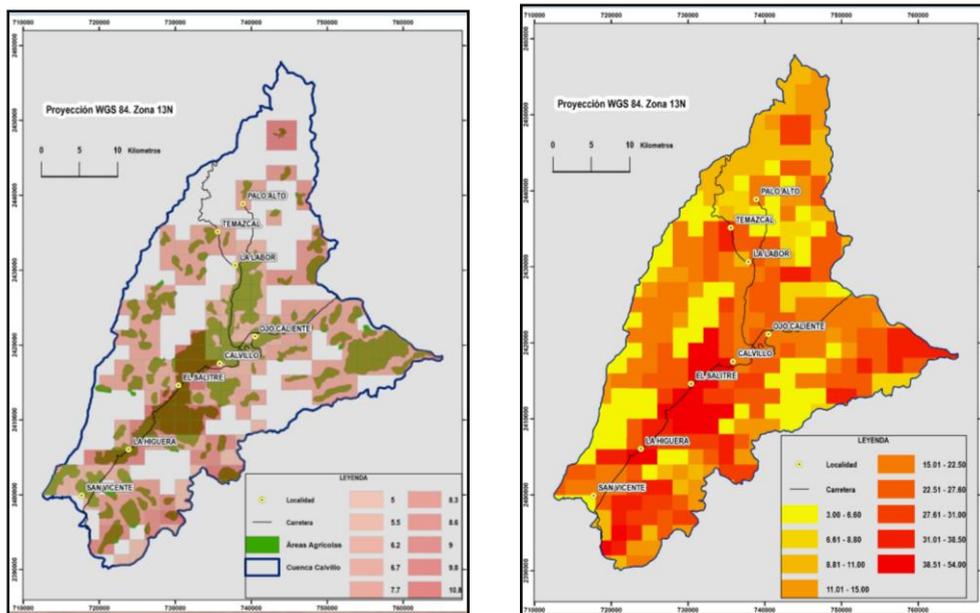


Figura 5.18. a) Distribución de las áreas agrícolas y b) Distribución del índice de recarga (In) para el valle de Calvillo.

Efecto de atenuación de la zona no saturada (N)

Esta información se obtiene de cortes litológicos, registros eléctricos de pozos, métodos geofísicos y secciones geológicas. Aplicando la ecuación 1.8 se obtuvo que en la parte central del VC, se tienen los niveles más profundos en el medio granular llegando hasta 350m, mientras que en la parte norte se tiene un nivel más somero (ver las secciones hidrogeológicas Capítulo 4). Ver en anexos los cortes litológicos.

El puntaje fue de 4.0 a 8.5 y se asignó un peso de 3-5. Para aluviones mixtos y gruesos con valores de 8.0 a 8.5, arenisca-conglomerado de grano de 7.5 a 8.0, por la presencia de arenas y en algunas partes de arcillas. Valores más altos se presentan la parte central del valle con 162.4-470.0 y valores de 12.0-23.3 están en la parte alta de la cuenca. Al centro del VC se encuentra una mayor profundidad del nivel estático (Fig. 5.19).

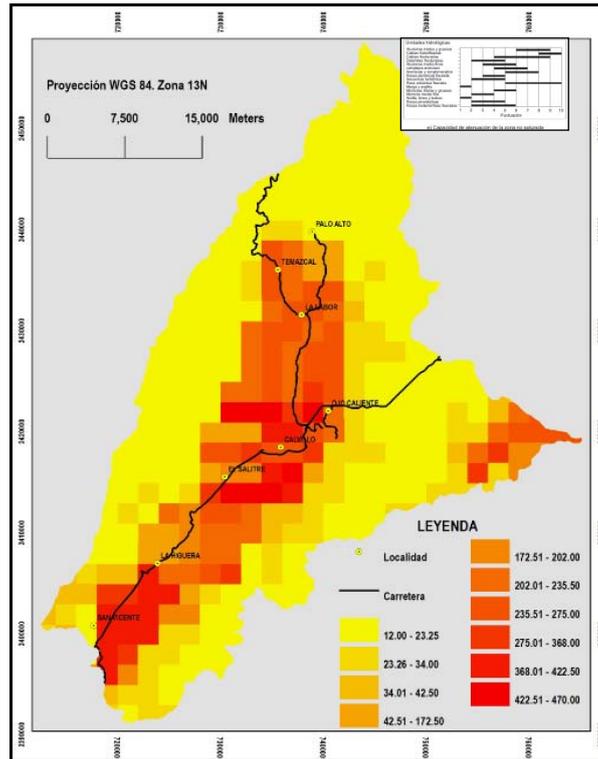
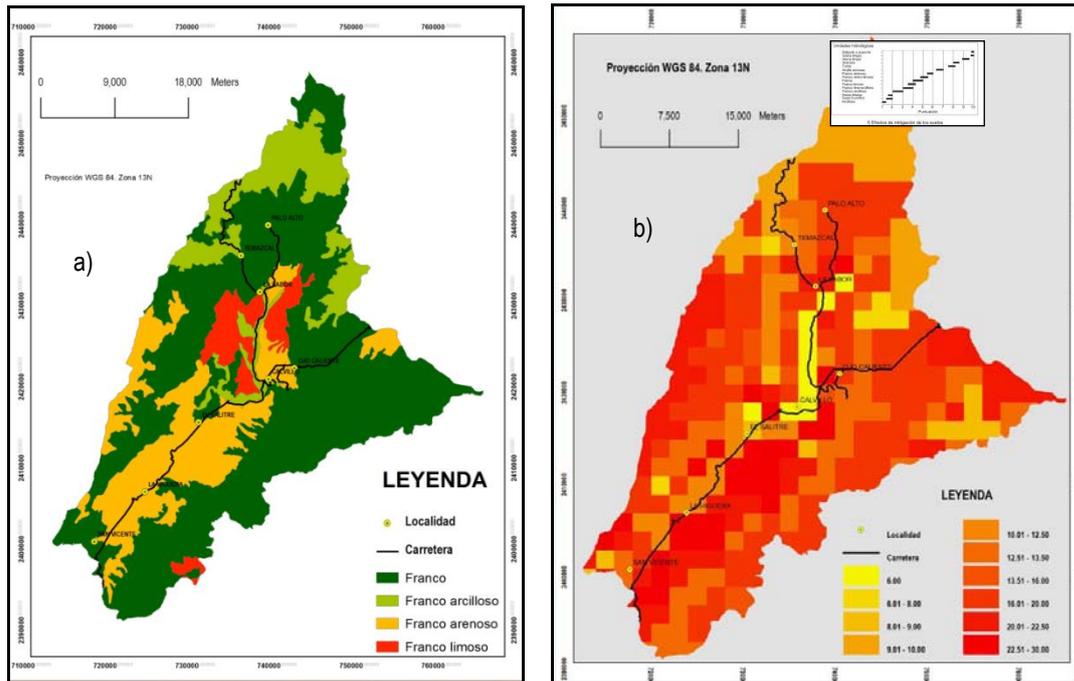


Figura 5.19. Distribución del índice de atenuación de la zona no saturada (N) para el valle de Calvillo

Tipo de suelo (T)

Se empleó la carta edafológica (INEGI, 2008) y los mapas de lineamientos y estructuras obtenidos mediante percepción remota. La textura de la zona se observa en la Figura 5.20a donde se observa el predominio de suelos francos y franco-arenoso. Se obtuvo un puntaje de 2.5 a 6.0, correspondiéndole pesos de 2 a 5. Figura 5.20b. Valores 6.0-30.0 corresponden a depósitos aluviales, mientras que valores de 15.0-22.5 se ubican en la parte Este de la localidad de Calvillo. En la zona con arenisca-conglomerado, el puntaje fue de 10.0-12.0 y 30.0 con excepción a las laderas de la cuenca donde se tienen valores de 12.5-16.0.



Figuras 5.20. a) Tipos de suelos, b) Distribución del índice de tipo de suelo (T) para el valle de Calvillo.

Características hidrogeológicas del acuífero (A)

Este parámetro se obtuvo con base en los estudios hidrogeológicos previos y la información de los cortes litológicos, donde se constató la presencia de un acuífero libre con medio granular y fracturado.

El medio granular se considera como aluviones mixtos-grosos, areniscas-conglomerados y rocas piroclásticas por lo que se le asignó un peso de 3 a 5, para un rango de valores de 8.0 a 9.0.

La Figura 5.21 muestra los resultados con valores que van de 0 a 42.5; valores de 40.0-42.5 corresponde a los depósitos aluviales y valores de 21.0-24.0 se relacionan con la arenisca-conglomerados, mientras que de 0 y 15.0 se asocia a la toba riolita y la riolita ignimbrita.

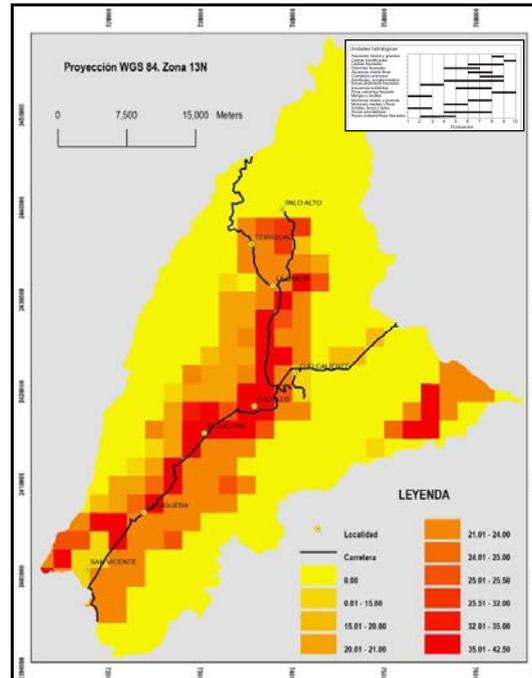


Figura 5.21. Distribución del índice de tipo de acuífero (A) para el valle de Calvillo.

Conductividad hidráulica del acuífero (C)

Los valores de conductividad se obtienen principalmente de las pruebas de bombeo y de permeabilidad, aunque en este caso dichas pruebas son escasas. Se utilizaron los datos obtenidos de las muestras tomadas, así como de los datos obtenidos por Sánchez, (2008) y la densidad de lineamientos normalizado (Fig. 5.22a).

La Figura 5.22b muestra valores de 2.0 a 12.5, los cuales son resultados de un puntaje de 1.0 a 2.5 asignándole pesos de 2 a 5. Los valores de 6.2-12.5 predominan al ubicarse en la parte alta y media de la cuenca. En el parte central del valle se tiene valores de 2.0-4.5.

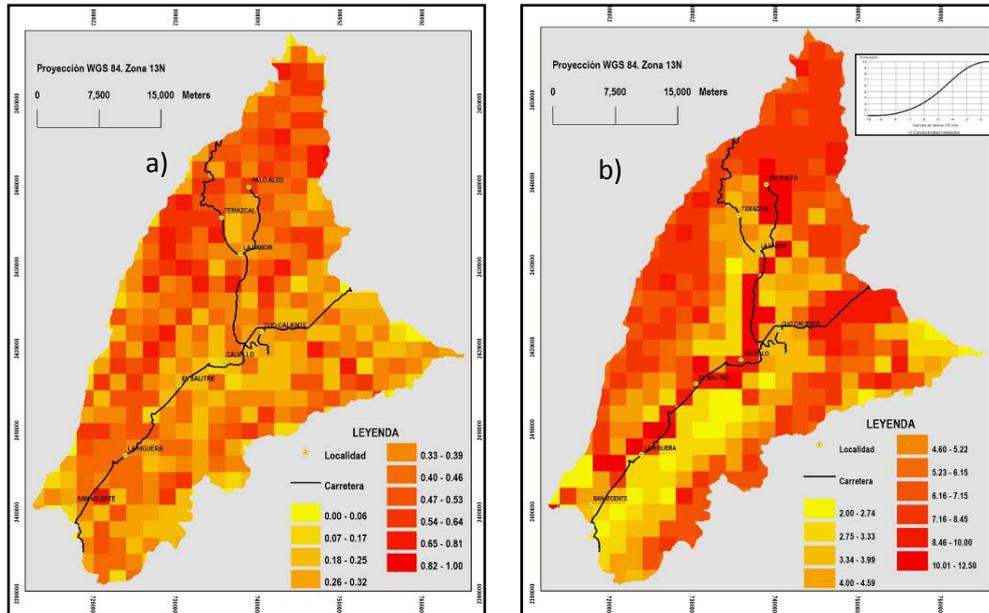


Figura 5.22. a) Distribución de densidad de lineamientos normalizado b) Distribución del resultado del índice de conductividad hidráulica (C) para el valle de Calvillo.

Pendiente topográfica (S)

El gradiente topográfico se evaluó con las cartas topográficas 1:50,000 del INEGI y el MDE (F13B17, 18, 27, 28, 87 y 88), con los que se obtuvo el porcentaje de la pendiente con valores de 9.5 a 9.7. El peso asignado fue de 2 a 4.

La Figura 5.23 muestra que resultados obtenidos van de 18.0 a 38.0. Donde el puntaje de 18.4 a 19.0 se relaciona con los depósitos aluviales y arenisca-conglomerado, y un puntaje de 19.0 a 38.0 asociado a toba y riolita-ignimbrita.

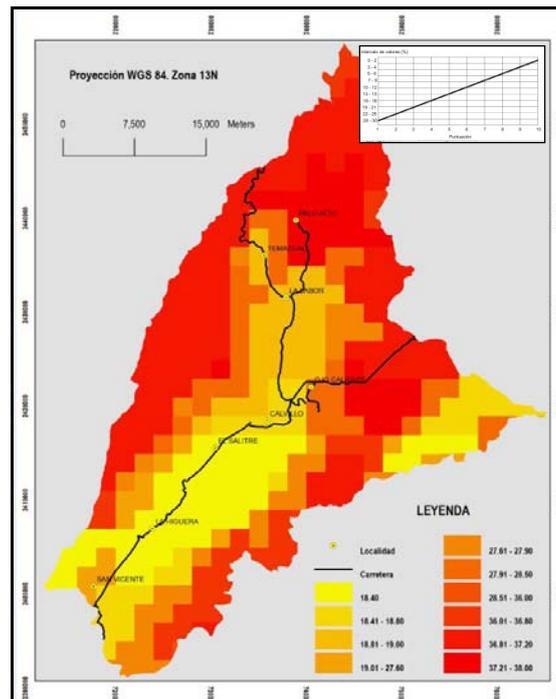


Figura 5.23. Distribución del índice de pendiente topográfica (S) para el valle de Calvillo.

Índice SINTACS, I_s

Una vez obtenidos los parámetros requeridos para aplicar el método SINTACTS se emplea la ec. 1.2 (Capítulo 1) sumando todos los componentes. El resultado se observa en la Figura 5.24 donde se tiene una gama de valores que va de 75.6 a 600.74. Los valores más altos (600.74) representados con tonos de color rojo se ubican en la parte central de la cuenca. Los valores más bajos (75.6) representados con los tonos de color amarillo corresponden a las partes media-alta de la cuenca.

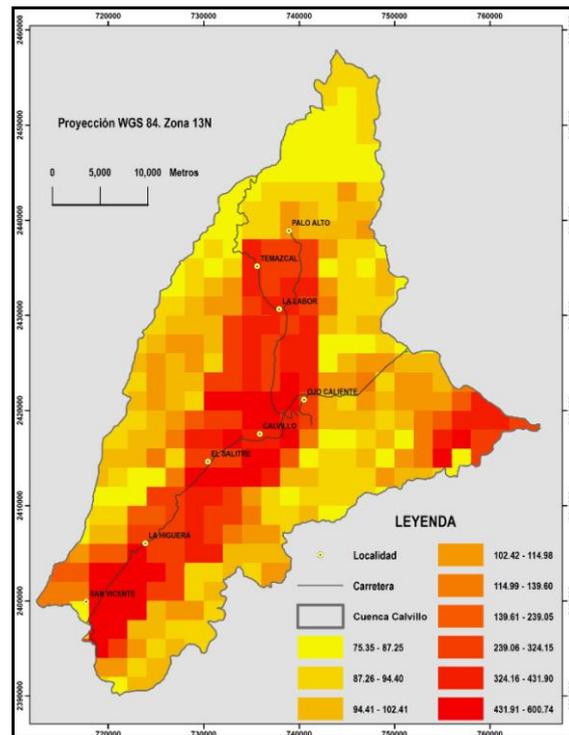


Figura 5.24. Índice SINTACS para establecer la vulnerabilidad del acuífero.

Vulnerabilidad

Como se mencionó en la Sección 1.3, es necesario uniformizar las escalas de vulnerabilidad ya que no son las mismas en los diferentes métodos. Por ello se hace para que los valores se pasen a una escala de 1 a 100 aplicando método propuesto por Civita y De Maio (1997).

$$I_N = 100 * (I_x - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$$

Donde:

- I_N índice normalizado
- I_v índice antes del proceso de normalización
- $I_{v_{\max}}$ índice máximo observado dado por el método
- $I_{v_{\min}}$ índice mínimo observado dado por el método

El resultado se observa en la Figura 5.25.

Con el resultado de la normalización se reclasifican los parámetros. Se obtiene que la parte norte tiene una vulnerabilidad media y baja, el área comprendida por la unidad toba presenta una vulnerabilidad en algunas partes como media y de baja a muy baja, y cerca de la localidad de El Salitre y al sur del VC, la vulnerabilidad es alta.

- *Valores menores a 40 (Vulnerabilidad Muy Baja)*. Estos se presentan, principalmente, en la parte de la sierra asociada a la unidad litológica riolita-ignimbrita, que es un paquete de rocas volcánicas extrusivas-piroclásticas; aunque tiene cierto grado de permeabilidad es probable que las fracturas no sean muy profundas (algunos metros). Asimismo, también se encuentra en la toba riolítica.
- *Valores de 40 a 50 (Vulnerabilidad Baja)*. Estos corresponde a algunas zonas ubicadas en Ojo Caliente, Salitre y La Higuera y entre Calvillo-Tamazcal coincide con la toba riolítica y la arenisca-conglomerado., Así como a algunas partes al Este de la cuenca.
- *Valores de 50 a 60 (Vulnerabilidad Media)*. Se ubican en la porción sur de Calvillo, en los flancos del valle entre las localidades de Ojo Caliente-Tamazcal, algunas zonas al NE y SE de la localidad de la Higuera, pequeñas porciones al Este de la cuenca.
- *Valores de 60 a 80 (Vulnerabilidad Alta)*. Estos incluyen a la unidad litológica arenisca-conglomerado, depósitos aluviales, en menor proporción a la toba riolítica. se presenta alrededores de Calvillo, El Salitre, San Vicente, y al Este de la cuenca.
- *Valores de 80 a 100 (Vulnerabilidad Extrema)*. Estos valores se presentan en depósitos aluviales y arenisca-conglomerados, se presenta en la parte central (Calvillo), al alrededor de las localidades El Salitre y San Vicente.

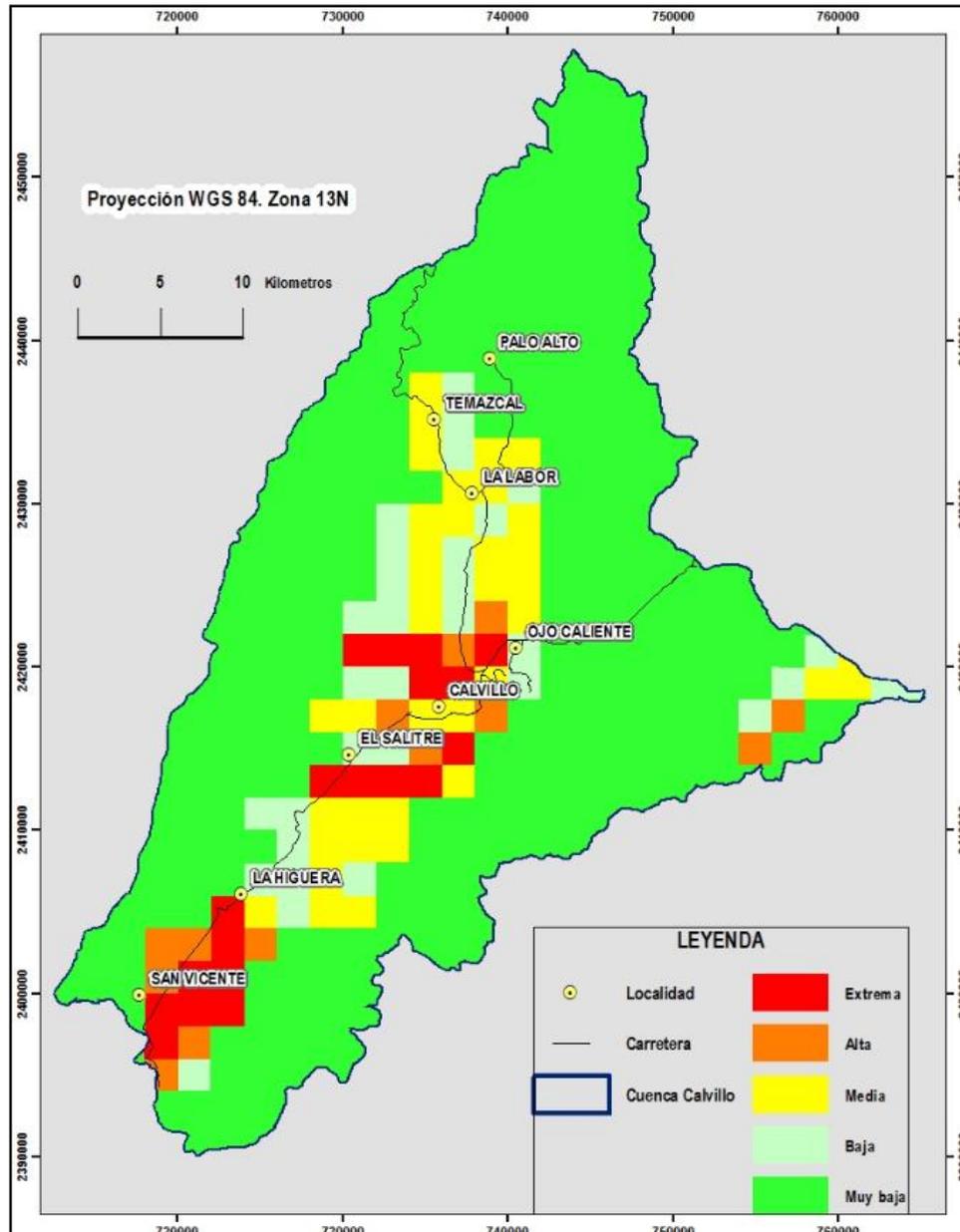


Figura 5.25. Mapa de vulnerabilidad una vez normalizado el índice SINTACS

5.4.3 Comparación de los métodos SINTACS y GOD

Debido a la diferencia en el número de parámetros que cada método considera, GOD es un proceso sencillo, mientras el SINTACS es un proceso más complejo. El análisis de los resultados obtenidos es necesario a fin de unificar criterios y establecer si ambos métodos proporcionan información confiable y de esta manera responder al objetivo de lograr la protección del agua subterránea ante la posible presencia de contaminantes asociados a causas naturales y actividades humanas mediante el uso de mapas de vulnerabilidad.

El método GOD ha mostrado depender principalmente de dos parámetros: G y O. En general se presenta una vulnerabilidad media a nula en la parte central de la cuenca, excepto una franja conformada por los municipios de Calvillo y Ojo de Agua y zonas aisladas al Noreste y Suroeste de la cuenca donde la vulnerabilidad es alta. Asimismo, se observa una franja de vulnerabilidad extrema a lo largo del cauce principal, lo cual se puede asociar a los escurrimientos provenientes de las ciudades y zonas agrícolas. De acuerdo con GOD, la parte central donde se encuentra Calvillo es altamente vulnerable pero con nula permeabilidad lo cual implica que el riesgo de contaminación es igualmente muy bajo a bajo.

La distribución de la vulnerabilidad aplicando el método SINTACS mostró que en la parte de La Labor y Ojo Caliente la vulnerabilidad es media, baja en menor proporción alta. Entre Ojo Caliente y El Salitre en algunas partes la vulnerabilidad es alta, extrema, media y con algunos sitios baja. Entre El Salitre y San Vicente se tiene una vulnerabilidad baja, media, alta con algunas porciones como extrema (alrededor de San Vicente).

La tabla 5.9 sintetiza la comparación de los dos métodos.

Tabla 5.9. Comparación entre los métodos de vulnerabilidad empleados para la parte sur del VC

| Unidad | GOD | SINTACS |
|-----------------------|--------------|-----------------------------|
| Depósitos aluviales | Extrema | Extrema, alta, media y baja |
| Arenisca–conglomerado | Media y alta | Alta, media, y baja |
| Toba | Media y baja | Baja, y muy baja |

En ambos métodos el aporte de la naturaleza litológica de la zona no saturada y la textura del suelo son muy representativos. Esto permite obtener algunas similitudes con los métodos usados mostrando una parte central dominada por una vulnerabilidad alta-extrema. El grado de vulnerabilidad mostrado por SINTACS tiene adicionalmente una gran influencia por la infiltración efectiva, lo que no afecta al método GOD. Esto muestra vulnerabilidades alta-media en zonas donde para GOD son bajas.

Otro punto importante de las diferencias observadas es que GOD no maneja pesos para los parámetros que considera: profundidad de agua, recarga y topografía. Lo que hace de la zona no saturada y el tipo de suelo las principales características que definen la clase de vulnerabilidad, siendo los suelos arcilloso-limosos y arenosos los más susceptibles.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

Este capítulo presenta las conclusiones del trabajo para la aplicación de técnicas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cuenca de Calvillo respondiendo a los objetivos e hipótesis planteados, esto es, establecer la factibilidad de cartografiar unidades litológicas empleando percepción remota para determinar la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a fin de conocer su condición actual y evitar impactos naturales y humanos.

El estudio consideró en primer lugar el empleo del método GOD por ser el que INEGI ha venido aplicando en algunas regiones del país. Sin embargo, este método está sujeto a consideraciones subjetivas. Por ello, se incluyó la validación de los resultados comparando con otro método, que en este caso fue SINTACS. La comparación entre los métodos y, en específico, el impacto que tiene la asignación de pesos o puntajes para cada variable del índice de vulnerabilidad permitió la identificación de algunas tendencias y, por tanto, establecer recomendaciones.

Puntos relevantes del estudio

- La importancia de cartografiar los diferentes niveles de protección que el medio geológico proporciona es crucial para establecer los sitios más vulnerables a una posible contaminación, así como determinar el grado de riesgo presente antes las diversas fuentes de contaminantes.
- La identificación de unidades litológicas y los lineamientos obtenidos mediante de percepción remota cumplió con las características necesarias para definir los elementos del paisaje que reflejan en términos cualitativos y cuantitativos la red de grietas, rasgos geomorfológicos y fallas de las rocas. Esto lleva a corroborar la hipótesis planteada de que a través de técnicas de percepción remota se identifica características de las unidades litológicas.
- El mapa geológico obtenido empleando las técnicas de percepción remota permitió no sólo la identificación visual de los lineamientos, sino que además de su ubicación, se obtuvo su longitud, dirección y densidad o frecuencia.
- A pesar de una alta densidad de lineamientos y las estructuras geológicas, la mayoría de ellos tiene una profundidad somera.
- Las zonas de recarga se asocian con lineamientos y la densidad de lineamientos.

- Las direcciones preferenciales de las unidades litológicas fueron N22°-45°E y N22°-45°O y un sistema, en menor proporción, con dirección de N-S.
- La mayor densidad de lineamientos se encontró en la parte norte de la cuenca, en la unidad riolita-ignimbrita y, en menor proporción, en los depósitos aluviales.
- El acuífero, es de tipo libre formado por un medio granular y uno fracturado, en el cual el nivel del agua subterránea varía de 48 a 71 m en la parte norte, al centro (Calvillo-Ojo Caliente) de 101 a 165 m y al sur con registros de 1.3 hasta 135 m.
- La dirección de flujo de agua subterránea fue NE-SO, favoreciendo la recarga en la parte norte y flancos del valle.
- La integración de la información disponible en un SIG, significó una ventaja al implementar los métodos GOD y SINTACS para obtener la vulnerabilidad, en particular debido a que se cuenta con datos geospaciales requeridos para cada método.
- El empleo de métodos con bajo requerimientos de datos como el GOD con tres parámetros lo hace versátil y práctico en áreas extensas pero no tan preciso como el método SINTACS donde se tiene una mayor variabilidad en los grados de vulnerabilidad.
- La vulnerabilidad aplicando el método de GOD resultó ser *muy baja* a la unidad riolita-ignimbrita, *baja-media* al tratarse de toba ácida (riolítica), *media-alta* cuando se tiene arenisca-conglomerados, y *extrema* para depósitos aluviales.
- Con el método SINTACS la vulnerabilidad es *muy baja* en la riolita-ignimbrita, *muy baja-baja-media* para la toba riolítica, *alta-media-baja* con arenisca-conglomerado, *extrema-alta-media*, y en menor proporción, *baja* en los depósitos aluviales.
- La comparación entre los métodos GOD y SINTACS permite la identificación de algunas tendencias, por ejemplo la asignación del puntaje de los pesos de SINTACS y, por tanto, que ajustes son requeridos para tener un impacto positivo en el índice de vulnerabilidad.
- En la estimación de la recarga neta en el método SINTACS, se requirió emplear la ecuación de Leonard (1962) para estimar el Coeficiente de Infiltración Potencial (CIP), pese a contar con la gráfica propuesta por Civita y DeMaio (1997), esto debido a que se tiene un medio heterogéneo resultado de la estratificación de diferentes tipos materiales hidrogeológicos en la zona de estudio. Incluir esta ecuación implicó saber el espesor de cada capa litológica y la lectura del nivel estático, con la cual se contó en el estudio, y el peso de la gráfica propuesta por

Civita y DeMaio (1997). Esto permitió conocer de manera más real la infiltración que se tiene en la zona ya que la disponibilidad de agua es afectada directamente por el CIP.

- Asimismo, considerar el efecto del retorno de riego en el parámetro de la recarga neta fue clave, ya que se incluye el agua que ya no es usada por los cultivos pero que regresa al sistema como excedente de riego. No considerar esta cantidad de agua daría una idea errónea del agua disponible que es infiltrada y, por tanto, la recarga neta daría una estimación inapropiada para determinar el peso que tiene este parámetro, proporcionando valores menores y, en consecuencia, alterando los resultados de variabilidad al indicar una menor vulnerabilidad de la que se tiene en realidad e incluso aumentando en extensión ya que el peso fue muy similar en diferentes zonas.
- La observación de topoformas ayudó a identificar elementos lineales del relieve, los cuales se observó se asocian con fallas normales localizadas en los flancos del Valle. Esto se logró empleando las imágenes Landsat ETM. Al establecer, la densidad de los lineamientos se identificaron las zonas permeables del terreno. Asimismo, las fallas y fracturas se pueden asociar hidráulicamente al acuífero, debido a la presencia de algún agente contaminante (Ramos, 2001). En este caso, al sumar el valor de la densidad de lineamientos normalizado a la conductividad hidráulica del método SINTACS trajo consigo cambios representativos en el resultado, por lo que llega a ser una variable de gran importancia en la protección del agua subterránea.
- El empleo del mapa de permeabilidad con el método de GOD, no representa ventajas, ya que no se considera como una variable de peso a diferencia del método de SINTACS.
- Considerar el efecto de la recarga neta incluyendo a los factores que la generan como la infiltración y el retorno agrícola de las zonas con sembradío representa una variable clave en la asignación de pesos del método SINTACS. Obviar este dato indica una clasificación sesgada y, en consecuencia, diferencias al asignar el grado de vulnerabilidad.
- Las principales zonas de recarga son en la parte aluvial del valle a lo largo del río en especial en Temazcal, El Salitre y la Higuera, al sureste, una zona importante al norte y al este de la cuenca.
- La vulnerabilidad obtenida lleva a establecer que el acuífero presenta zonas de recarga que beneficiarían al acuífero debido a que su sistema geológico ayuda en algunas zonas a amortiguar los contaminantes presentes; sin embargo, se deben tomar en cuenta que en la parte norte; así como, en los costados de la cuenca donde naturalmente se lleva a

cabo la recarga del acuífero, sea una zona protegida. En especial en zonas agrícolas donde se debe cambiar el uso de fertilizantes o plaguicidas químicos por aquellos de tipo orgánico para reducir los efectos de la contaminación.

Recomendaciones

- Continuar con el monitoreo del acuífero para ver su comportamiento y evolución temporal. Tomando los niveles estáticos, dinámicos; así como, muestreo de aguas para evaluar su calidad química.
- Delimitar y clasificar las zonas agrícolas, a fin de determinar sus demandas reales de agua, la disponibilidad y el agua de retorno y estimar apropiadamente la infiltración, además de considerar la precipitación y la evapotranspiración para la zona en general.
- El empleo del método OD, no representó ventajas, ya que no es determinante en los parámetros que considera, no así para el método SINTACS, por lo que se recomienda analizar bien su uso y los beneficios reales que éste puede traer con respecto al empleado actualmente por el INEGI.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguillón Robles, A., 1983. —“Ortografía Geológica de las Hojas Espíritu Santo, Pinos, El Obraje, Ojuelos Edos. De San Luís Potosí, Jalisco, Guanajuato y Zacatecas” Folleto Técnico No 93, Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí (UASLP). México
- Aller, L. T., J. H. Bennet, R. J. Lehr, S. Petty and G. Hackett, 1985. —“Pestic; Standard Systems for Evaluation Groundwater Pollution Using Hydrogeologic Setting”, 2 Publication EPA/600/2-85/081US EPA, 622 pp.
- Aller, I., Bennett, J. H. Lehr and R. J. Petty, 1987. —“Pestic: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings” U. S. EPA, Roberts S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/2-85/0108
- Aranda-Gómez, J. J., 2002. —“Geología Preliminar del Graben de Aguascalientes” Universidad Nacional Autónoma México. Instituto de Geología, *Revista*, 8, 1, 22-32 p.
- Arnel N. 2002. —“Hydrology and Global Environmental Change”, Harlow, England, Prentice Hall, 376 p.
- Barbash, J. E. and Resek, E. A., 1996. —“Pesticides in Ground Water: Distribution, Trends, and Governing Factors” Ann Arbor, Chelsea, MI. Vol II
- Barrett, E. C. Curtis, L.F. 1999. —“Introduction to environmental Remote Sensing.” 4° ed. Cheltenham., Glos., UK, Eng., Stanley Thornes Publishers,. 457 p.
- Bernhardsen, T., 1999. —“Geographic Information Systems: An Introduction” John Wiley, New York.
- Bhatta B., 2008. —“Remote Sensing and GIS” Oxford University, UK, press, New York and New Delhi, 685 p
- Bonifaz, R., 2008. —“Antes de la Materia Introducción a la Percepción Remota.” Maestría en Ciencias de la Tierra, UNAM, México.
- Canty Morton, 2010. —“Image Análisis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing with Algorithms for ENVI/IDL”, USA, Segunda Edición, CRC Press/Taylor y Francis, 471 p,
- Carrillo Rivera J.J., Cardona A. y Hergt, 2001. —“Introducción de aguas termales profundas a zonas someras, Evidencias en el pozo San Ignacio, Aguascalientes, México”. *Revista Latinoamericana*, 1,1, 41-53
- CCRS/CCT, Canada Centre for Remote Sensing, [Pág. Web consultada en Noviembre de 2010] <http://ceocat.ccrs.nrcan.gc.ca/portal/index.html>
- Civita M., 1990. —“Legenda Unificata Per le Carte Della Vulnerabilita dei Corpi Idrici Sotterranei/Unifield Legend for the Aquifer Pollution

- Vulnerability Maps” Studi Sulla Vulnerabilita Degli Acquiferi, 1 (Append), Pitagora Edit. Bologna. 13 p.
- Civita, M., 1994. —Le Carte Della Vulnerabilita degli acquiferi all’inquinamento”: Teoria y Practica”. Pitagora Editrice, 325p, Bologna
 - Civita M. y, De Maio M., 1997. —SINTACS, Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilita degli acquiferi all’inquinamento”. Metodologia and Automatizzazione, Vol. 60, Pitagora Editrice, Bologna
 - Civita M. y, De Maio, M., 2000. —Valutazione e cartografia automatic della vulnerabilita degli acquiferi all’inquinamento con il sistema paramétrico SINTACS R5”. Pitagoras Editor, 248 p, Bologna
 - Clark Labs, 2013. [Página Web consultada en enero de 2013] <http://www.clarklabs.org/about/index.cfm>
 - Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2002. —Determinación de la disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Calvillo, Estado de Aguascalientes”. Reporte Técnico, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, CONAGUA; México.
 - Cotas, CONAGUA y OMM, 2006. "Escenarios del Agua 2015 y 2030 en el acuífero Interestatal Ojocaliente–Aguscalientes–Encarnación: acciones para un desarrollo con sostenibilidad ambiental". Informe final. México D.F. Comisión Nacional del Agua, Gobierno del Estado de Aguascalientes.
 - Cotilla M.O., Córdoba D y Herraiz M., 2005. —Main morphotectonic characteristics of Asturias, Spain”. *Geofísica Internacional*, 44, 1, 65-101.
 - Chavez, P. S., Jr., 1975. Atmospheric, solar, and MTF corrections for ERTS digital imagery. Proc. Am. Soc. Photogrammetry, Fall Technical Meeting, p. 69, Phoenix, AZ.
 - Chuvieco Emilio, 2000. —Fundamentos de Teledetección Espacial”. 3 ed Railp, Barcelona España, 568 p,
 - Chuvieco Emilio, 2002. —Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio”. 1 ed, Barcelona España, editorial Ariel, 597 p
 - De By R.A., Knippers R.A. Weir M.J.C., Georgiadou Y., Jraak Menno-Jan, Van Westen C.J. y Sun Y., 2004. Principles pf Geographic Information Systems, An introductory book, Editor Rolf de By, The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Holanda
 - DeKetelaere D, Hötzl H, Neukum C, Civita M, and Sappa G., 2004. —Hazards Analysis and Mapping In Zwahlen (ed)” 2004: Cost Action 620-

- Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karts), Aquifers-final Report Neufchatel, Europe Union, 1-297
- Demers. N Michael, 2004. —Basics of Geographical Information Systemas” US, John Wiley and Sons Incorporated, 3 edition, 468 p
 - Doerfliger N, P. Jeannin, F. Zwahlen, 1999. —Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: a New Method of Defining Protection Areas Using a Multi-attribute Approach and GIS Tools (Epik Method)” *Environmental Geology*, 39, 2, 165-176.
 - DOF (Diario Oficial de la Federación), 1994. NORMA Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993 —Procedimientos Sanitarios para el Muestreo de Agua para Uso y Consumo Humano en Sistemas de Abastecimiento de Agua Públicos y Privados”. Publicado el 27 de abril de 1994
 - DOF (Diario Oficial de la Federación), 2004. NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, —Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales”. Publicado el 13 de septiembre de 2004
 - Doyle, F. J., 1978. —Digital Terrain Models: An Overview”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensig*, 44, 12, 1481-1485
 - Draoui M., Vias J., Andreo B. y Targuisti K. El Messari S., 2008. —A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under mediterranean climatic conditions”, *Environ Geol*, 54, 3, 455–463.
 - Düzgün H.S.B. y Demirel N., 2011. —Remote sensing of the mine environment”. London UK, Taylor and Francis, 228 p
 - El-Naqa A., Nezar H. y Mustafa K., 2006. —GISBased Evaluation of Groundwater Vulnerability in the Russeifa area, Jordan”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológica*, 23, 3, 277–287.
 - Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Aguascalientes. [Pág. Web consultada en Noviembre de 2010] <http://www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM01aguascalientes/municipios/01003a.html>
 - Engman. E. T., Gurney R. J., 1991. —Remote Sensig in Hidrology” Remote Sensig Applications by Chapman and Hall, VOL 3, ISBN 0-412-2445-0, London UK, 223 p.
 - EarthExplorer, 2010. [Página Web de la USGS consultada en abril de 2010] <http://earthexplorer.usgs.gov/>
 - ESRI, 2013. [Página Web de ArcGis Earth consultada en enero 2013] <http://www.esri.com/>

- Fernández Coppel I.A. —Localizaciones Geográficas, 2001. Las Coordenadas Geográficas y la Proyección UTM. (Universal Transversa Mercator) El Datum”. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Departamento de Ingeniería Agrarias y Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Palencia, Universidad de Valladolid, España, 86 p.
- Ferrero S. B., Palacio M. G. y Campanella O. R., 2002. —Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación”. *Revista de Teledetección*, 17, 43-54.
- Folger P., 2009. —Geospatial Information and Geographic Information Systems (Gis): Current Issues and Future Challenges”. Congressional Research Service. 7-5700. www.crs.gov. R40625. 2009. [Pág web consultada en mayo de 2011] <http://books.google.com.mx/books?id=ICJhtlPZLnkC&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22Peter+Franklin+Folger%22&hl=es&sa=X&ei=7kICUcDyCPGA2AWF1IHwBQ&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q&f=false>
- Foster S.S.D., 1987. —Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In”: Proceedings of international Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants Noordwik, The Netherlands. 69-86 p.
- Foster S., Hirata R. y Gomes D., 2002. —Protección de la Calidad del Agua Subterránea” Groundwater Management Advisory Team. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial Washington, D.C, 116 p.
- Gogu RC, Dassargues A., 2000. "Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods", *Environ Geol.*, 39, 6, 549–559.
- Guerasimov I. P., 1970. —IzPolzovanie Geomorfologicheskij Metodov Pri Structurnogeologicheskij Isslodovaniij”. pág. 296. Ladro, Moscu.
- Hoffman J., Galloway D.I., Zebker H.A. y Amelung F., 2001. —Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry”, *Water Resources Res*, 37, 6, 551-1566
- Hoffmann J., 2005. —The future of satellite remote sensing in hydrogeology”, *Hydrogeol Journal*, 13, 247–250.
- Instituto Nacional de Estadística, 1993. Geografía E Informática (INEGI). —Estudio Hidrológico del Estado de Aguascalientes”. México, INEGI, 119p.

- Instituto Nacional Estadística, Geografía (INEGI) 2002. Conjunto Nacional de Información Geológica, 1:250 000. Ed. 1980-1988. Versión digital.
- INEGI Instituto Nacional Estadística, Geografía (INEGI), 2008. Conjunto de datos Vectorial Edafológico Escala 1:250 000 serie II, Continuo Nacional.
- Instituto Nacional Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Información Serie III, de Agua Subterráneas Metodología. Agosto 2010, 74 págs.
- Instituto Nacional Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007. "Manuales de Sistemas de Información Geográfica". INEGI; Mexico, 119 p.
- Instituto Nacional Estadística, Geografía (INEGI), 2010. Modelos digitales de Elevación [pagina web consultada 2010]: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/default.aspx>
- Intergraph, 2013. ERDAS IMAGINE® 2013: Product Features and Comparisons [Pág. Web consultada en enero 2013] http://geospatial.intergraph.com/Libraries/Tech_Docs/ERDAS_IMAGINE_2013_Product_Description.sflb.ashx
- Jet Propulsion Laboratory, Aster Spectral Library, California Institute of Technology. (Página web consultada el 7 de Octubre del 2010) <http://speclib.jpl.nasa.gov/search-1>
- Johnson A. I. y Peterson C.B., 1988. —"Cototechnical Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission", American Society for Testing and Materials, Cocoa Beach Florid, USA,. [Webpage consulted on April, 2011] http://books.google.com.mx/books?id=r017dOVaeH4C&pg=PA263&lpg=PA263&dq=CCRS/CCT&source=bl&ots=8mEASleMdl&sig=6R_7gnSiMKyl3bXxXWleUp4wbqA&hl=es&ei=zSMfTsLwBO_DsQLdgsXFAw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=7&ved=0CFEQ6AEwBg#v=onepage&q=CCRS%2FCCT&f=false
- Irons. J. R. Ranson any C. S. T. Daughtry 1988 —"Estimating Big Bluestem Albedo From Directional Reflectance Measurements", *Remote Sensing Environ.*, 25, 185-199
- Kerle Norman, Jansen Lucas L.F. y Huurneman Gerit (2004). Principles of Remote Sensing: An introduction textbook. Ed. The International Institute of Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Holanda.

- Kouli M., Lydakis-Simantiris N. y Soupios P., 2008. "GIS-based aquifer modeling and planning using integrated geoenvironmental and chemical approaches". Birmingham, UK, In: Groundwater. Modelling, Management. Editors:L.F. Koning and J L. Weiss, -61, ISBN: 978-1-60456-832-5. Nova Science publishers, Inc, 15 p.
- Kouli M., Soupios Pantelis., Vallianatos Filippos., Loupasakis C., 2010. —"Landslide Hazard Zonation in High Risk Areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece" *Natural Hazards*, 52, 3, 599-621
- Kovalesvky. V. S, Kruseman. G. P. y Rushton K. R., 2004. —"Groundwater Studies an International Guide for Hydrogeological Investigations". IHP-VI, Series on Groundwater No 3. UNESCO.
- Labarthe G.H.M., Tristán G. y Martínez Ruíz V.J., 1983. —"Estudio Geohidrológico de la Hoja Melchor, Edos San Luís Potosí y Guanajuato", Folleto Técnico No 88, Instituto de Geología y Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí (UASLP), SLP, México.
- Leonards, G. A., 1962. —"Foundation Engineering" McGraw-Hill civil engineering series. Civil engineering series. Editor G. A. Leonards, US, pag 66-240
- Lerner N David, Issar S Arie y Simmers Ian, 1990. —"Groundwater Recharge A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge". Vol 8, by International Contributions to Hydrogeology Founded G. Castany, E. Groba, E. Romijn. AIH. Germany, 372 p.
- Lillesand, M Thomas. Kiefer, W Ralph. 1994. —"Remote Sensing and Imagen Interpretation", 3rd ed, John Wiley and Sons., Inc., New York, 750 p.
- Lillesand, M Thomas. Kiefer, W Ralph. 2000. —"Remote Sensing and Imagen Interpretation", 4rd ed., John Wiley and Sons, inc., New York, 736 p.
- Lillesand M Thomas, R.W. Kiefer, and J.W. Chipman. 2004. —"Remote Sensing Imagen Interpretation" 5 Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 763 p.
- Lira Chávez J. and G. Maletti, 2002. —"A Supervised Contextual Classifier Based on a Region-Growth Algorithm, *Computer & Geosciences*,. 28, 951-959
- Lira Chávez J., 2010. —"Tratamiento Digital de Imágenes Multiespectrales", Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Segunda Edición. México, ISBN 978-607-00-3403-9, 618 p.

- Loeches Garrido Miguel Martín, Rebollo Ferreira Luis F., 2007. —“Aguas superficiales y subterráneas del campus” Cuadernos del Campus Naturaleza y Medio Ambiente No 5. EcoCampus Alcalá, Universidad de Alcalá. Madrid España, 28 p.
- McCarthy James J., Osvaldo F. Canziani, Neil A. Leary, David J. Dokken y Kasey S. White,. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, Reino Unido
- Mao Yaobao, Feng Fucheng, Xie Zhiqing y Bao Guibao., 2008. —“Remote sensing application in higher permeability area Prediction of coal bed methane”, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. XXXVII, Part B8, Beijing
- Margat, J., 1968. —“Vulnérabilité des nappes d’eau souterraine _ala pollution [Ground water vulnerability to contamination]”. *Bases de la cartographie*, (Doc) BRGM, 68 SGL 198 HYD, Orléans, France.
- Marisco. A, Giuliano, G. Pennetta. L. Vurro. M., 2004. —“Intrinsic Vulnerability assessment of the South-Eastern Murge (Apulia, southern Italy)”. *Natural Hazards and Earth systems Sciences*, 4, 769-774
- Martínez Ruiz V.J. 1984. —“Control Geológico Estructural del Agua Subterránea entre San Luís Potosí – Aguascalientes y Zacatecas”, Folleto Técnico No 97, Instituto de Geología de la UASLP., México.
- Massone H. Lima L. M. Zelaya K., 2011. —“Groundwater Vulnerability Assessment Combining The Drastic and Dyna-Clue Model in the Argentine Pampas” *Environmental Management*, 47, 5, 828-839.
- Medina R J. F., 1986. —“Comparación Hidrogeoquímica entre Aguas Subterráneas de la Zona Aqualulco – Mexquitic con la Cuenca de Ojuelos, Jal. Aguascalientes, Ags”, Folleto Técnico No 110- A, Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí (UASLP), México.
- Meijerink A. M. J., 1997. —“Conceptual modelling for surface-groundwater interactions based on hydrotopes, identified by remote sensing”, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, Proceedings of Rabat Symposium S3, April 1997, IAHS Publ., 242, 149
- Méndez Montevalvo H.M., 1998. —“Actualización Geohidrológica del Valle de Aqualulco en el Estado de San Luis Potosí”, Trabajo Recepcional para grado de Ingeniero Geólogo, Universidad Autónoma de San Luís Potosí (UASLP), México, 135 p.

- United States Geological Survey (NMD_USGS). 1990. —“An Enhanced Digital Line Graph Design”. U.S Geological Survey Circular 1048, p 156.
- Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari L, Alaníz-Alvarez S.A., Labarthe-Hernández G y Rosas-Elguera J., 1999. —“Variation of Cenozoic extension and volcanism across the Southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico”. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 111, 3, 347-363.
- Origel-Gutiérrez, G. y Sánchez-Cárdenas, E.G., 2010. —“Guía metodológica para la detección de áreas de alteración minera con imágenes ASTER”, Memorias del XIV Simposio Internacional SELPER, Guanajuato México, SELPER México (CD ROM).
- Pedraza Rodríguez Uriel Martín, 2007. —“Nuevo Desarrollo de Información Hidrológica en el INEGI” Memorias del 6° Congreso Nacional de Hidrogeología, 5 p.
- Rabus B, Eineder M, Roth A, Bamler R, 2003. —“The shuttle radar topography mission (SRTM)—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar”. *J Photogram Remote Sens*, 57, 241–262
- Ramiro Rodríguez C., 2004. —“The Role of Urban Areas in Aquifer Vulnerability Assessments: The Salamanca, México, Case”, *Geofísica Internacional*, 43, 4, 583-589.
- Ramos Leal J.A., 2001. —“Incorporación de Estructuras Geológicas en Mapas de Vulnerabilidad”. CYNTED – Red XVIII-A: Vulnerabilidad de Acuíferos, Taller 1: Protección de acuíferos frente a la contaminación: metodología. Toluca, México. 20-22 junio.
- Ramos Leal J.A., 2005. —“Curso de Vulnerabilidad Acuifera e Índices de Calidad del Agua Subterránea”, División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT).
- Ramos Leal J.A., 2002. —“Validación de Mapas de Vulnerabilidad Acuifera E Impacto Ambiental: Caso Río Turbio, Guanajuato”, Tesis doctoral en Ciencias de la Tierra (Aguas subterráneas), UNAM.
- Ruiz J., Armenta R. y Prol-Ledesma R.M., 1995. —“Técnicas de Procesamiento de Imágenes en la Exploración de Yacimientos Minerales de Origen Hidrotermal”, Instituto de Geofísica y Posgrado en Geofísica (UACPyP), UNAM-Universidad Computense, *Física de la Tierra*, 7, 105-137.
- Sabins F.F., 1996. —“Remote sensing: Principales and Interpretation”, 3ra Edición. San Francisco: Freeman, San Francisco, 432 p.
- Sabins F.F. 2007. —“Remote Sensing Principles and Interpretation” Waveland Press, Inc. Third Edition, Longrove Illinois, 512 p.

- Sánchez M.G., 2008. —"Vulnerabilidad Acuifera del Estado de Aguascalientes", Tesis de Licenciatura ESIA-TICOMAN-IPN, México.
- Sappa G. y Vitale S., 2001. —"Groundwater Protection: Contribution From Italian Experience", Ministerio de Medio Ambiente, Roma.
- Servicio Geológico Mexicano SGM, 1998. —"Carta Geológica Minera. Aguascalientes. F1309. Ags, Jal, Zac y Nay", Primera Edición, Servicio Geológico Mexicano (SGM). [Pág. Web consultada en Noviembre de 2010]
<http://mapserver.sgm.gob.mx/website/ndML/mapaslinea250/viewer.php?claveEdo=A&edoNombre=Aguascalientes>
- Shaban A., Mohamad K. y Chadi A., 2006. —"Use of Remote Sensing And GIS to Determine Recharge Potential zones: the Case of Occidental Lebanon" *Hydrogeology Journal*, 14, 433-443
- Sigrist M., 2008. "Groundwater Contamination in Asian Coastal Cities: Case Study of Ho Chi Minh City, Vietnam". *Groundwater Management in Asian Cities: Library for sustainable Urban Regeneration*, 2, 247-27.
- Silva T.J., Estrada F., Rodríguez R., Ochoa S., Villalpando F. y Cruz G., 2010. —"Vulnerabilidad Acuifera como Herramienta de Política Ambiental para la Protección de Manantiales en Michoacán, México", *Rev.Int. Contam. Ambient.*, 26, 1, 5-16
- Schultz, G. A., E. T. Engman. 2000. —"Remote Sensing in Hydrology and Water Management" Schultz, G. A., E. T. Engman (Eds), Springer, 483 p.
- Van Stempvoort, D., L., Ewert y L. Wassenaar. (1995). AVI: A method for Groundwater Protection mapping in the Praire Province of Canada. PPWB Report No. 114, National Hydrogeology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, Canada.
- Tapley B. D., Bettadpur S., Ries J.C., Thompson P.F., Watkins M.M., 2004. —"GRACE measurements of Mass Variability in the Earth System". *Science* 305, 503–505 p.
- Thapinta A., Hudak, P.F., 2003 —"Use of Geographic Information Systems for Assessing Groundwater Pollution Potencial by Pesticides in central Thailand" *Environ int.*, 29, 1, 87-93 p.
- Terrádez Gurrea M., 2002. —"Análisis de componentes principales" Catalunya España, Proyecto e-Math 1 Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD), 20 p.
- Tesoreiro A.J., Inkpen E.L y Voss F.D., 1998. "Assessing ground-water vulnerability using logistic regression". In *Proceedings for the Source Water Assessment and Protection*", 98 Conference, Dallas, TX, 157– 65.

- Torres Viera M.A., 2009. —Apuntes de la Materia Aplicaciones de Percepción Remota” de la maestría en Ciencias de la Tierra, UNAM,
- Tristán-González M., Aguillón-Robles A., Barboza-Gudiño J.R., Torres-Hernández J.R., Bellon H., López-Doncel R., Rodríguez-Ríos R. y Labarthe-Hernández G., 2009. —Geocronología y Distribución Espacial del Vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61, 3, 287-303. México.
- USGS, 2010. Plataforma de imagines Landsat [Página Web consultada en 2010]. <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- USGS, 2011. Flujo de agua subterránea,/disminución. [Página Web consultada en abril 2011]. <http://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>
- USGS, 2011. Manual de Landsat. [Página Web consultada en noviembre de 2011] <http://calvalportal.ceos.org/cvp/web/guest/landsat-5-tm>
- Van Stempvoort, D., L. Ewert and Wassenaar, 1995. AVI: —Method for groundwater Protection mapping in the Praire Province of Canada”. 2 PPWB Report No. 114, National Hydrologic Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, Canada
- Vázquez Andrade E., 2010. —LaPlaga de La Mosca en el Cultivo de la Guayaba, una Aplicación de la Recepción Remota en la Prospección Agrícola” Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- Vrba J., Zoporozec A., 1994. "Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability". IAH International Contribution for Hydrogeology, Vol. 16, Founded By G. Castany, EGroba E Romjin, Series Editorial Board.
- Werz, H., Hötzl, H., 2005. —The Integrate Use of Remote Sensig and Gis for Groundwater-Vulnerability and Harzard-Mapping. A case Study”. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 112, 257-264 p.

A N E X O S

ANEXO 1. CORTES LITOLÓGICOS

| No. local | UTM Y | UTM X | Elevación de brocal (msnm) | Profundidad parte superior | Descripción litológica |
|------------|---------|--------|----------------------------|----------------------------|--|
| idp_munnac | | | pie_elebro | lit_cima | lit_desc |
| 12 | 2421427 | 737682 | 1678.00 | 0 | TOBA ARCILLOSA COMPACTA |
| | | | | 12 | ARENA Y ARCILLA |
| | | | | 105 | TOBA ARCILLOSA |
| | | | | 213 | ARENA Y ARCILLA CON HORIZONTES DE GRAVA |
| | | | | 380 | TOBA E IGNIMBRITA COMPACTA |
| | | | | 473 | AGLOMERADO VOLCANICO |
| | | | | 600 | ULTIMO ESTRATO |
| 212 | 2421705 | 741785 | 1780.00 | 0 | TOBA ARCILLOSA CON CAFÉ CLARO Y CAFÉ OSCURO |
| | | | | 80 | TOBA COMPACTA ROJIZA CON Poca PERMEABILIDAD |
| | | | | 122 | TOBA ARCILLO ARENOSA COLOR AMARILLO OCRE |
| | | | | 140 | TOBA ARCILLO ARENOSA COLOR AMARILLO OCRE |
| | | | | 166 | TOBA ROJIZA CON TOBA COLOR CAFÉ CLARO |
| | | | | 192 | TOBA CAFÉ ROJIZA CON ALGUNOS CLASTOS DE RIOLITA, TOBA Y BASALTO |
| | | | | | TOBA DE BASALTO ANGULOSOS Y SUBANGULOSO CON TOBA CAFÉ CLARO FRAG. DE |
| | | | | 254 | IGNIMBRITA COLOR CAFÉ MORADO |
| | | | | 290 | IGNIMBRITA ALTERADA COLOR CAFÉ Y CAFÉ CLARO |
| | | | | 310 | FRAGMENTOS ANGULOSOS Y SUBANGULOSOS |
| | | | | 324 | IGNIMBRITA ALTERADA COLOR CAFÉ ROSADO |
| | | | | 334 | FRAG. GRUESOS DE ORIGEN IGNEO (AGLOMERADO, CEMENTADO) COLOR CAFÉ Y CAFÉ GRIS |
| | | | | 390 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-1 | 2417086 | 735420 | 1700.00 | 0.00 | GRAVAS Y BOLEOS |
| | | | | 10.00 | BOLEOS INESTABLES |
| | | | | 15.00 | TOBA RETRABAJADA |
| | | | | 45.00 | BOLEOS INESTABLES |
| | | | | 70.00 | GRAVAS Y ARENAS |
| | | | | 125.00 | TOBA RETRABAJADA |
| | | | | 195.00 | BOLEOS INESTABLES |
| | | | | 210.00 | TOBA RETRABAJADA |
| | | | | 285.00 | TOBA COMPACTA |
| | | | | 340.00 | IGNIMBRITA |
| | | | | 349.00 | ARCILLA PLASTICA |
| | | | | 350.00 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-11 | 2421303 | 741705 | 1760.00 | 0 | SUELO ARCILLO-ARENOSO |
| | | | | 20 | TOBA COMPACTA |
| | | | | 100 | GRAVAS Y ARENAS |
| | | | | 190 | RIOLITA |
| | | | | 200 | GRAVAS Y AREBAS |
| | | | | 260 | ROCA IGNEA |
| | | | | 300 | GRAVAS Y ARENAS |
| | | | | 330 | ROCA IGNEA |
| | | | | 350 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-13 | 2418199 | 737874 | 1642.00 | 0 | FRAG. DE TOBA CON BOLEOS |
| | | | | 4 | BOLEOS Y TOBAS |
| | | | | 10 | TOBA COMPACTA AMARILLO OCRE |
| | | | | 24 | TOBA COMPACTA CAFÉ ROJIZA |
| | | | | 40 | ARCILLA PLASTICA |
| | | | | 56 | TOBA ARCILLO ARENOSA NARANJA |
| | | | | 100 | AGLOMERADO VOLCANICO TOBA, RIOLITA |
| | | | | 130 | TOBA COMPACTA FRAG. DE RIOLITA E IGNIMBRITA NARANJA CAFÉ |
| | | | | 160 | FRAGMENTOS DE RIOLITA TOBA |
| | | | | | FRAG. DE RIOLITA ANDESITA CON INTERCALACIONES DE TOBA COMPACTA COLOR CAFÉ |
| | | | | 168 | OSCURO. |
| | | | | | AGLOMERADO VOLCANICO CON INTERCALACIONES FRACTURADAS Y PRESENCIA DE |
| | | | | 298 | ARCILLA |
| | | | | 386 | RIOLITA, ANDESITA Y TOBA EN MATRIZ ARCILLOSA |
| | | | | 420 | RIOLITA Y ANDESITA EMPACADA EN ARCILLA PLASTICA |
| | | | | 430 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-17 | 2424116 | 744505 | | 0 | IGNIMBRITA CAFÉ ROJIZO |
| | | | | | TOBA MESOSTASIS VITREA CON ESCASOS FNX DE CUARZO, SANIDINO Y BIOTITA COLOR |
| | | | | 12 | ROSA CLARO |
| | | | | 42 | TOBA MATRIZ VITREA |
| | | | | 75 | SECUENCIA DE TOBA HIBRIDA EN COLORES BLANCO, ROSA, VERDE PISTACHE |
| | | | | | HORIZONTE DE ARENAS QUE SOBREYACEN A RIOLITA CRISTALINA CON FNX DE CUARZO Y |
| | | | | 91 | FELDESPATOS ALTERADOS |
| | | | | 120 | ANDESITA BASALTICA |
| | | | | 144 | HORIZONTE DE ARENA QUE SOBREYACE A RIOLITA CAFÉ MORADO |
| | | | | 168 | TOBA RIOLITICA EN MATRIZ VITREA COLOR BLANCO-CREMA |
| | | | | 300 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-18 | 2418742 | 741198 | 1725.00 | 0.00 | TOBA ARCILLOSA COMPACTA COLOR CAFÉ ROJIZA |
| | | | | 70.00 | TOBA ARENOSA CON FRAGMENTOS DE RIOLITA |
| | | | | 118.00 | TOBA ARENOSA CON TOBA ARCILLOSA COMPACTA COLOR GRIS Y AMARILLO OCRE |
| | | | | 142.00 | TOBA ARCILLOSA |
| | | | | | INTERCALACIONES DE IGNIMBRITA CON TOBA COMPACTA COLOR CAFÉ MORADO- |
| | | | | 155.00 | NARANJA OCRE |
| | | | | 295.00 | ROCA IGNEA ALTERADA Y FRACTURADA |
| | | | | 353.00 | ULTIMO ESTRATO |

| No. local | | | Elevación de brocal (msnm) | Profundidad parte superior | Descripción litológica |
|------------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|--|
| idn numnac | UTM Y | UTM X | nie elebro | lit cima | lit desc |
| CAL-28 | 2432967 | 739833 | 1801.00 | 0 | IGNIMBRITA, CRISTALES DE CUARZO COLOR CAFÉ CLARO |
| | | | | 10 | IGNIMBRITA, CRISTALES DE CUARZO COLOR CAFÉ CLARO, INTERCALACIONES DE ANDESITA COLOR GRIS Y NEGRO |
| | | | | 30 | IGNIMBRITA, RIOLITAS Y TOBAS, COLOR CAFÉ Y MORADO, INTERCALACIONES DE ANDESITA OSCURA |
| | | | | 50 | IGNIMBRITA CAFÉ |
| | | | | 62 | TOBA ARCILLOSA CAFÉ MARRON |
| | | | | 66 | IGNIMBRITA, RIOLITAS Y TOBAS, COLOR CAFÉ Y MORADO, INTERCALACIONES DE ANDESITA OSCURA |
| | | | | 84 | TOBA RIOLITICA COLOR CAFÉ ROJIZO |
| | | | | 98 | IGNIMBRITA, RIOLITAS Y ANDESITAS |
| | | | | 111 | FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE RIOLITAS E IGNIMBRITAS CAFÉ CLARO |
| | | | | 128 | FRAGMENTOS ALTERADOS DE COLOR VERDE Y NEGRO DE IGNIMBRITA |
| | | | | 142 | FRAGMENTOS ANGULOSOS Y SUBANGULOSOS DE IGNIMBRITA COMPACTA E IGNIMBRITA COLOR CAFÉ CLARO |
| | | | | 212 | FRAGMENTOS DE ANDESITA COLOR OSCURO, IGNIMBRITAS CAFÉ CLARO |
| | | | | 280 | IGNIMBRITA CAFÉ OSCURO |
| | | | | 312 | IGNIMBRITA COLOR GRIS CLARO |
| | | | | 350 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-33 | 2432067 | 741340 | 1803.00 | 0.00 | FRAGMENTOS DE ROCA. SUELO RESIDUAL |
| | | | | 8.00 | FRAGMENTOS ANGULOSOS Y SUBANGULOSOS DE RIOLITA TOBA E IGNIMBRITA |
| | | | | 100.00 | TOBA ARENOARCILLOSA |
| | | | | 116.00 | FRAGMENTOS ANGULOSOS Y SUBANGULOSOS DE RIOLITA TOBA E IGNIMBRITA |
| | | | | 167.00 | ROCA IGNEA CRISTALINA |
| | | | | 200.00 | ROCA IGNEA COMPACTA |
| | | | | 215.00 | FRAGMENTOS DE ROCA ALTERADA Y FRACTURADA |
| | | | | 269.00 | TOBA RIOLITICA |
| | | | | 300.00 | FRAGMENTOS DE TOBA RIOLITICA E IGNIMBRITA |
| | | | | 350.00 | ROCA IGNEA COMPACTA |
| | | | | 350.00 | ROCA IGNEA COMPACTA |
| | | | | 400.00 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-35 | 2434557 | 743195 | | 0 | SUELO Y FRAGMENTOS DE TOBA BLANCA |
| | | | | 10 | TOBA BLANCA-AMARILLA, CAFÉ-NARANJA |
| | | | | 56 | FRAG. DE TOBA RIOLITA E IGNIMBRITA CAFÉ GRIS |
| | | | | 76 | TOBA E IGNIMBRITA COLOR CAFÉ OXIDO Y GRIS |
| | | | | 112 | FRAG. DE IGNIMBRITA GRIS MORADA |
| | | | | 140 | TOBA E IGNIMBRITA MORADA |
| | | | | 152 | FRAG. DE TOBA, RIOLITA E IGNIMBRITA ALTERADA |
| | | | | 173 | IGNIMBRITA CAFÉ-MORADA |
| | | | | 195 | TOBA COMPACTA E IGNIMBRITA CAFÉ |
| | | | | 205 | IGNIMBRITA CAFÉ |
| | | | | 217 | IGNIMBRITA CAFÉ MORADO Y NEGRA |
| | | | | 262 | TOBA GRIS MARRON |
| | | | | 273 | TOBA GRIS MARRON FRAG. DE IGNIMBRITA CAFÉ |
| | | | | 302 | IGNIMBRITA CAFÉ POCO ALTERADA |
| | | | | 332 | FRAG DE TOBA E IGNIMBRITA EN DIVERSOS COLORES ALTERADOS |
| | | | | 358 | IGNIMBRITA CAFÉ MORADO |
| | | | | 368 | FRAG. FINOS DE IGNIMBRITA Y RIOLITA CAFÉ, NARANJA, MORADO Y NEGRO |
| | | | | 420 | IGNIMBRITA CAFÉ PRESENCIA DE ARCILLA |
| | | | | 430 | FRAGMENTOS DE TOBA, RIOLITA E IGNIMBRITA COLOR MORADO, NEGRO Y NARANJA |
| | | | | 470 | FRAG. DE RIOLITA E IGNIMBRITA COLOR CAFÉ MORADO |
| | | | | 500 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-8 | 2416881 | 727667 | | 0.00 | FRAGMENTOS ALTERADOS DE ROCA IGNEA COLOR CAFÉ OSCURO A NEGRO |
| | | | | 22.00 | ROCA IGNEA CON CUARZO |
| | | | | 26.00 | TOBA Y RIOLITA ALTERADA |
| | | | | 48.00 | FRAGMENTOS DE IGNIMBRITA CAFÉ ROJIZA |
| | | | | 56.00 | ROCA ALTERADA Y FRACTURADA |
| | | | | 121.00 | ROCA COMPACTA |
| | | | | 132.00 | ROCA MUY ALTERADA |
| | | | | 154.00 | INTERCALACIONES ARCILLOSAS |
| | | | | 162.00 | ROCA COMPACTA |
| | | | | 184.00 | ROCA ALTERADA Y FRACTURADA |
| | | | | 198.00 | ROCA COMPACTA |
| | | | | 216.00 | ROCA ALTERADA Y FRACTURADA |
| | | | | 275.50 | ULTIMO ESTRATO |
| PMX-151 | 2416881 | 727667 | | 0.00 | TEPETATE |
| | | | | 12.00 | TOBA ARCILLOSA |
| | | | | 192.00 | TOBA HIBRIDA |
| | | | | 210.00 | TOBA ARENOSA |
| | | | | 234.00 | ARENA TOBACEA |
| PMX-53 | 2417296 | 0735072 | 1620.00 | 0.00 | GRAVAS |
| | | | | 12.00 | GRAVAS Y GRAVILLAS |
| | | | | 26.00 | GRAVAS Y GRAVILLAS EMPACADAS EN ARCILLA |
| | | | | 76.00 | GRAVAS Y ARENAS |
| | | | | 130.00 | MATERIAL ARCILLO ARENOSO |
| | | | | 208.00 | ARENAS DE GRANO FINO A MEDIO |

| No. local | | | Elevación de brocal (msnm) | Profundidad parte superior | Descripción litológica |
|------------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|---|
| idp_numnac | UTM Y | UTM X | pie_elebro | lit_cima | lit_desc |
| PMX-95 | 2418307 | 0732644 | 1570.00 | 0.00 | RIOLITA ALTERADA Y FRACTURADA |
| | | | | 6.00 | GRAVAS CON MATERIAL ARCILLO ARENOSO |
| | | | | 90.00 | TOBA ARENOSA |
| | | | | 244.00 | RIOLITA MUY ALTERADA |
| /1878 | 2409094 | 727462 | | 0.00 | TEPETATE |
| | | | | 15.00 | TEPETATE CON ARENA |
| | | | | 45.00 | TEPETATE CON ARENA FINA |
| | | | | 145.00 | ARCILLA CON ARENA |
| | | | | 195.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /605 | 2420850 | 736140 | | 0.00 | TEPETATE CON ARENA |
| | | | | 40.00 | TEPETATE CON ARENA GRUESA |
| | | | | 76.00 | ARCILLA CON ARENA |
| | | | | 88.00 | TEPETATE CON ARENA |
| | | | | 133.00 | TEPETATE CON ARCILLA |
| | | | | 190.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /227 | 2415538 | 734782 | | 0.00 | TOBA HIBRIDA |
| | | | | 30.00 | ALTERNANCIA DE ARENAS DE TEXTURA MEDIA A GRUESA CON ARCILLA |
| | | | | 200.00 | ALTERNANCIA DE ARENA FINA CON ARCILLA |
| | | | | 250.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 47 | 2411222 | 732116 | 1660.00 | 0.00 | TEPETATE |
| | | | | 10.00 | TEPETATE |
| | | | | 60.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 180.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 204 | 2419872 | 736556 | 1660.00 | 0.00 | GRAVA |
| | | | | 90.00 | ARCILLA |
| | | | | 150.00 | GRAVA-ARCILLA |
| | | | | 180.00 | ARCILLA |
| | | | | 251.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /66 | 2410997 | 733556 | | 0.00 | GRAVA CON POCA ARCILLA |
| | | | | 160.00 | ARCILLA |
| | | | | 200.00 | TOBA HIBRIDA |
| | | | | 222.00 | GRAVAS CON ALTA ARCILLA |
| | | | | 244.00 | GRAVAS |
| | | | | 266.00 | GRAVAS CON POCA ARCILLA |
| | | | | 300.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /76 | 2414557 | 732900 | | 0.00 | BOLEO CHICO |
| | | | | 6.00 | ARCILLA |
| | | | | 90.00 | ARENA |
| | | | | 132.00 | ARCILLA PEGAJOSA |
| | | | | 150.00 | ARENA |
| | | | | 156.00 | ARCILLA CON ARENA |
| | | | | 204.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /43 | 2420586 | 732812 | | 0.00 | TIERRA VEGETAL |
| | | | | 15.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 25.00 | GRAVA Y ARENA |
| | | | | 30.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 115.00 | ARCILLA |
| | | | | 135.00 | BARRO PEGAJOSO |
| | | | | 150.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /78 | 2409763 | 731217 | | 0.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 85.00 | GRAVA |
| | | | | 95.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 135.00 | ARENA |
| | | | | 162.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /77 | 2414505 | 735688 | | 0.00 | BOLEO |
| | | | | 1.00 | TEPETATE |
| | | | | 4.00 | ARENA |
| | | | | 5.00 | TEPETATE |
| | | | | 6.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 7.00 | TEPETATE |
| | | | | 10.00 | ARENA |
| | | | | 11.00 | TEPETATE |
| | | | | 12.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 18.00 | TEPETATE |
| | | | | 19.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 22.00 | TEPETATE |
| | | | | 24.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 28.00 | TEPETATE |
| | | | | 29.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 30.00 | ARENA |
| | | | | 31.00 | TEPETATE |
| | | | | 32.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 36.00 | CHAUTE |
| | | | | 38.00 | TEPETATE Y ARENA |
| | | | | 40.00 | GRAVA |
| | | | | 42.00 | ULTIMO ESTRATO |

| No. local | | | Elevación de brocal (msnm) | Profundidad parte superior | Descripción litológica |
|------------|---------|--------|----------------------------|----------------------------|--|
| idp_mumnac | UTM Y | UTM X | pie_elebro | lit_cima | lit_desc |
| /1716 | 2430763 | 740527 | | 0.00 | BOLEO |
| | | | | 8.00 | ALTERNANCIA DE CAPAS DE GRAVAS Y ARENAS Y ARCILLAS |
| | | | | 90.00 | ARCILLA CON GRAVA |
| | | | | 110.00 | RIOLITA |
| | | | | 245.00 | GRAVA CON ARCILLA |
| | | | | 250.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /2303 | 2416877 | 733757 | | 0.00 | BOLEOS Y GRAVAS EN MATRIZ ARCILLOSA |
| | | | | 30.00 | ALTERNANCIA DE ARENA CON TEXTURA MEDIA A GRUESA CON ARCILLA |
| | | | | 200.00 | ARENA FINA CON ARCILLA |
| | | | | 250.00 | ULTIMO ESTRATO |
| /1195 | 2420582 | 740825 | | 0.00 | TEPETATE |
| | | | | 5.00 | ARCILLA |
| | | | | 45.00 | TEPETATE |
| | | | | 65.00 | ARCILLA |
| | | | | 90.00 | ARCILLA CON ARENA |
| | | | | 110.00 | TEPETATE |
| | | | | 120.00 | ARCILLA |
| | | | | 125.00 | ROCA |
| | | | | 130.00 | ARCILLA |
| | | | | 135.00 | ROCA |
| | | | | 140.00 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-8 | 2416881 | 727667 | | 0.00 | SUELO RESIDUAL CAFÉ |
| | | | | 6.00 | TOBA ARCILLOSA |
| | | | | 60.00 | TOBA CON FRAGMENTOS DE RIOLITA |
| | | | | 100.00 | TOBA RIOLITICA |
| | | | | 130.00 | TOBA NARANJA Y AMARILLO OCRE CON FRAG. DE RIOLITA |
| | | | | 180.00 | RIOLITA CAFÉ |
| | | | | 270.00 | FRAGMENTOS DE ANDESITA |
| | | | | 290.00 | TOBA ARENOSA |
| | | | | 300.00 | IGNIMBRITA GRIS CON ABUNDANTES CRISTALES DE CUARZO |
| | | | | 350.00 | ULTIMO ESTRATO |
| CAL-33 | 2432067 | 741340 | 1803.00 | 0.00 | TOBA IGNIMBRITICA COLOR GRIS CLARO A CAFÉ CLARO |
| | | | | 18.00 | IGNIMBRITA CON ABUNDANCIA DE FENOCRISTALES COLOR GRIS Y CAFÉ OSCURO |
| | | | | 108.00 | FRAGMENTOS HETEROGENEOS DE IGNIMBRITA CAFÉ ROJIZA Y GRIS, ALTERNACION DE COALIN, TOBAS ROSADAS Y MORADAS |
| | | | | 190.00 | FRAGMENTOS HETEROGENEOS FINOS ALTERNACIONES DE COALIN |
| | | | | 272.00 | IGNIMBRITAS COLOR CAFÉ-GRIS |
| | | | | 385.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 212 | 2421705 | 741785 | 1780.00 | 20.00 | TOBA COMPACTA |
| | | | | 100.00 | GRAVAS Y ARENAS |
| | | | | 190.00 | RIOLITA |
| | | | | 200.00 | GRAVAS Y AREBAS |
| | | | | 260.00 | ROCA IGNEA |
| | | | | 300.00 | GRAVAS Y ARENAS |
| | | | | 330.00 | ROCA IGNEA |
| | | | | 350.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 56 | 2413078 | 730652 | 1600.00 | 0.00 | TEPETATE ARCILLOSO |
| | | | | 15.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 40.00 | ARCILLA |
| | | | | 82.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 182.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 180 | 2416511 | 736060 | 1670.00 | 0.00 | GRAVAS CON POCO BOLEO |
| | | | | 30.00 | GRAVAS |
| | | | | 128.00 | GRAVAS CON ARCILLA |
| | | | | 200.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 194 | 2424792 | 738407 | 1720.00 | 0.00 | BOLEO |
| | | | | 42.00 | ARCILLA CON ARENA |
| | | | | 141.00 | TEPETATE ARCILLOSO |
| | | | | 201.00 | ULTIMO ESTRATO |
| 67 | 2414862 | 730597 | 1600.00 | 0.00 | TEPETATE BLANCO |
| | | | | 16.00 | TEPETATE ROJO Y GRAVA |
| | | | | 22.00 | ARENA |
| | | | | 36.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 78.00 | ARENA |
| | | | | 81.00 | TEPETATE ARENOSO |
| | | | | 127.00 | ARENA |
| | | | | 129.00 | BARRO ROJO |
| | | | | 177.00 | ULTIMO ESTRATO |

ANEXOS II METADATOS DE LA IMAGEN LANDSAT DEL 27/01/2002

```
L71029045_04520020127_MTL_etm.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
REQUEST_ID = "0800908110061_00001"
PRODUCT_CREATION_TIME = 2009-08-12T08:11:15Z
STATION_ID = "EDC"
LANDSAT_XBAND = "0"
LANDSAT_YBAND = "2"
GROUND_STATION = "EDC"
LPS_PROCESSOR_NUMBER = 8
DATE_HOUR_CONTACT_PERIOD = "0202804"
SUBINTERVAL_NUMBER = "02"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
PRODUCT_TYPE = "L1"
ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
PROCESSING_SOFTWARE = "LPGS_10.1.0"
EPHEMERIS_TYPE = "DEFINITIVE"
SPACECRAFT_ID = "Landsat7"
SENSOR_ID = "ETM+"
SENSOR_MODE = "SAM"
ACQUISITION_DATE = 2002-01-27
SCENE_CENTER_SCAN_TIME = 17:06:34.4621919Z
WRS_PATH = 29
STARTING_ROW = 45
ENDING_ROW = 45
BAND_COMBINATION = "12345678"
PRODUCT_UL_CORNER_LAT = 22.6339225
PRODUCT_UL_CORNER_LON = -104.2312033
PRODUCT_UR_CORNER_LAT = 22.6054123
PRODUCT_UR_CORNER_LON = -101.8797730
PRODUCT_LL_CORNER_LAT = 20.7293194
PRODUCT_LL_CORNER_LON = -104.2412575
PRODUCT_LR_CORNER_LAT = 20.7000381
PRODUCT_LR_CORNER_LON = -101.9205047
PRODUCT_UL_CORNER_MAPX = 579000.000
PRODUCT_UL_CORNER_MAPY = 2503200.000
PRODUCT_UR_CORNER_MAPX = 820800.000
PRODUCT_UR_CORNER_MAPY = 2503200.000
PRODUCT_LL_CORNER_MAPX = 579000.000
PRODUCT_LL_CORNER_MAPY = 2292000.000
PRODUCT_LR_CORNER_MAPX = 820800.000
PRODUCT_LR_CORNER_MAPY = 2292000.000
PRODUCT_SAMPLES_PAN = 16121
PRODUCT_LINES_PAN = 14081
PRODUCT_SAMPLES_REF = 8061
PRODUCT_LINES_REF = 7041
PRODUCT_SAMPLES_THM = 4031
PRODUCT_LINES_THM = 3521
BAND1_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_B10.TIF"
BAND2_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_B20.TIF"
BAND3_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_B30.TIF"
BAND4_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_B40.TIF"
BAND5_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_B50.TIF"
BAND61_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_B61.TIF"
BAND62_FILE_NAME = "L72029045_04520020127_B62.TIF"
BAND7_FILE_NAME = "L72029045_04520020127_B70.TIF"
BAND8_FILE_NAME = "L72029045_04520020127_B80.TIF"
GCP_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_GCP.TXT"
METADATA_L1_FILE_NAME = "L71029045_04520020127_MTL.TXT"
CPF_FILE_NAME = "L7CPF20020101_20020331_06"

```

```
L71029045_04520020127_MTL_etm.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
CPF_FILE_NAME = "L7CPF20020101_20020331_06"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
LMAX_BAND1 = 191.600
LMIN_BAND1 = -6.200
LMAX_BAND2 = 196.500
LMIN_BAND2 = -6.400
LMAX_BAND3 = 152.900
LMIN_BAND3 = -5.000
LMAX_BAND4 = 157.400
LMIN_BAND4 = -5.100
LMAX_BAND5 = 31.060
LMIN_BAND5 = -1.000
LMAX_BAND61 = 17.040
LMIN_BAND61 = 0.000
LMAX_BAND62 = 12.650
LMIN_BAND62 = 3.200
LMAX_BAND7 = 10.800
LMIN_BAND7 = -0.350
LMAX_BAND8 = 243.100
LMIN_BAND8 = -4.700
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QCALMAX_BAND1 = 255.0
QCALMIN_BAND1 = 1.0
QCALMAX_BAND2 = 255.0
QCALMIN_BAND2 = 1.0
QCALMAX_BAND3 = 255.0
QCALMIN_BAND3 = 1.0
QCALMAX_BAND4 = 255.0
QCALMIN_BAND4 = 1.0
QCALMAX_BAND5 = 255.0
QCALMIN_BAND5 = 1.0
QCALMAX_BAND61 = 255.0
QCALMIN_BAND61 = 1.0
QCALMAX_BAND62 = 255.0
QCALMIN_BAND62 = 1.0
QCALMAX_BAND7 = 255.0
QCALMIN_BAND7 = 1.0
QCALMAX_BAND8 = 255.0
QCALMIN_BAND8 = 1.0
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND1 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND2 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND3 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND4 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND5 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND61 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND62 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND7 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_GAIN_BAND8 = "CPF"
CORRECTION_METHOD_BIAS = "IC"
BAND1_GAIN = "H"
BAND2_GAIN = "H"
BAND3_GAIN = "H"
BAND4_GAIN = "H"
BAND5_GAIN = "H"
BAND6_GAIN1 = "L"
BAND6_GAIN2 = "H"
BAND7_GAIN = "H"

```

```
L71029045_04520020127_MTL_etm.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
BAND2_GAIN = "H"
BAND3_GAIN = "H"
BAND4_GAIN = "H"
BAND5_GAIN = "H"
BAND6_GAIN1 = "L"
BAND6_GAIN2 = "H"
BAND7_GAIN = "H"
BAND8_GAIN = "H"
BAND1_GAIN_CHANGE = "0"
BAND2_GAIN_CHANGE = "0"
BAND3_GAIN_CHANGE = "0"
BAND4_GAIN_CHANGE = "0"
BAND5_GAIN_CHANGE = "0"
BAND6_GAIN_CHANGE1 = "0"
BAND6_GAIN_CHANGE2 = "0"
BAND7_GAIN_CHANGE = "0"
BAND8_GAIN_CHANGE = "0"
BAND1_SL_GAIN_CHANGE = 0
BAND2_SL_GAIN_CHANGE = 0
BAND3_SL_GAIN_CHANGE = 0
BAND4_SL_GAIN_CHANGE = 0
BAND5_SL_GAIN_CHANGE = 0
BAND6_SL_GAIN_CHANGE1 = 0
BAND6_SL_GAIN_CHANGE2 = 0
BAND7_SL_GAIN_CHANGE = 0
BAND8_SL_GAIN_CHANGE = 0
SUN_AZIMUTH = 141.8058178
SUN_ELEVATION = 40.5315606
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
GROUP = CORRECTIONS_APPLIED
STRIPING_BAND1 = "NONE"
STRIPING_BAND2 = "NONE"
STRIPING_BAND3 = "NONE"
STRIPING_BAND4 = "NONE"
STRIPING_BAND5 = "NONE"
STRIPING_BAND61 = "NONE"
STRIPING_BAND62 = "NONE"
STRIPING_BAND7 = "NONE"
STRIPING_BAND8 = "NONE"
BANDING = "N"
COHERENT_NOISE = "Y"
MEMORY_EFFECT = "N"
SCAN_CORRELATED_SHIFT = "N"
INOPERABLE_DETECTORS = "N"
DROPPED_LINES = "N"
END_GROUP = CORRECTIONS_APPLIED
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
REFERENCE_DATUM = "WGS84"
REFERENCE_ELLIPSOID = "WGS84"
GRID_CELL_SIZE_PAN = 15.000
GRID_CELL_SIZE_THM = 60.000
GRID_CELL_SIZE_REF = 30.000
ORIENTATION = "NUP"
RESAMPLING_OPTION = "CC"
MAP_PROJECTION = "UTM"
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
GROUP = UTM_PARAMETERS
ZONE_NUMBER = 13
END_GROUP = UTM_PARAMETERS
L1_METADATA_FILE_END

```