



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA AMBIENTAL – SUELO Y AGUAS SUBTERRANEAS

**VULNERABILIDAD NATURAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL
VALLE DE TULA, HIDALGO.**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MIGUEL ANGEL BECERRIL DIAZ

TUTORA PRINCIPAL
Dra. Jiménez Cisneros Blanca Elena Instituto de Ingeniería

COMITÉ TUTORAL

Dra. Silva Martínez Ana Elisa	Facultad de Ingeniería
Dr. Marín Stillman Luis E.	Instituto de Geofísica

MÉXICO, D. F. (JUNIO) 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidenta:	Dra. Iturbe Argüelles Rosario	Instituto de Ingeniería
Secretaria:	Dra. Silva Martínez Ana Elisa	Facultad de Ingeniería
Vocal:	Dra. Jiménez Cisneros Blanca Elena	Instituto de Ingeniería
1 ^{er} . Suplente:	Dr. Marín Stillman Luis E.	Instituto de Geofísica
2 ^{do} . Suplente:	Dra. Hansen Hansen Anne	Facultad de Ingeniería Campus Mor.

INSTITUTO DE INGENIERIA

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE



Dra. Jiménez Cisneros Blanca Elena

FIRMA

INDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Descripción del problema	9
1.2. Justificación	10
1.3. Hipótesis	11
1.4. Objetivo	11
1.5. Objetivos específicos	11
1.6. Metas	11
1.7. Actividades	12
1.8. Alcances	12
1.9. Antecedentes	13
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Vulnerabilidad de acuíferos	15
2.2. Geoquímica del agua subterránea	17
2.3. Evolución o comportamiento de los niveles estáticos en los acuíferos	18
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	22
3.1. Ubicación	22
3.2. Vías de comunicación	23
3.3. Aspectos socioeconómicos	23

3.4.	Clima	24
3.5.	Hidrografía.....	24
3.6.	Infraestructura hidráulica.....	24
3.7.	Fisiografía	26
3.8.	Geología regional.....	27
3.9.	Hidrogeología.....	28
3.10.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	30
3.11.	Tratamiento no convencional de las aguas residuales	31
4.	METODOLOGÍA.....	32
4.1.	Balance hídrico superficial y subterráneo.....	32
4.1.1.	Procesos superficiales.....	32
4.1.2.	Procesos subterráneos.....	36
4.1.3.	Balance integrado.....	43
4.1.4.	Variabilidad e incertidumbre de los componentes del balance hídrico.....	44
4.2.	Caracterización de los suelos.....	44
4.3.	Caracterización del agua de la zona vadosa y subterránea	46
4.4.	Caracterización geofísica	48
4.5.	Evaluación de vulnerabilidad de acuíferos.....	49
4.5.1.	Profundidad del nivel estático (D).....	51
4.5.2.	Recarga neta (R)	52
4.5.3.	Medio acuífero (A)	53
4.5.4.	Tipo de suelo.....	53
4.5.5.	Gradiente topográfico.....	54
4.5.6.	Impacto a la zona vadosa.....	55
4.5.7.	Conductividad hidráulica	55
4.5.8.	Método DRASTIC.....	57
4.5.9.	Sensibilidad de parámetros del método DRASTIC	59

4.5.10.	Índice de contaminación potencial (IC_DRSTIC)	60
4.6.	Geoquímica del agua subterránea.....	61
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	63
4.7.	Balance de los procesos Superficiales	63
4.7.1.	Evapotranspiración (Et).....	64
4.7.2.	Usos del agua (U).....	67
4.7.3.	Retornos de agua (Re).....	68
4.7.4.	Escurrimiento aguas arriba (Ar)	68
4.7.5.	Escurrimiento de agua a la salida de la subcuenca (Ab).....	68
4.7.6.	Importaciones de cuencas vecinas (Im).....	70
4.7.7.	Exportaciones a cuenca vecinas (Ex).....	70
4.7.8.	Escurrimiento natural por cuenca propia (Cp).....	71
4.7.9.	Acumulado del Balance superficial.....	73
4.8.	Balance subterráneo.....	74
4.8.1.	Infiltración más la recarga por lluvia (I)	74
4.8.2.	Recarga inducida (Ri).....	74
4.8.3.	Entradas laterales provenientes de otros acuíferos (Es).....	76
4.8.4.	Evaporación de la zona saturada (Etz).....	77
4.8.5.	Salida de agua por manantiales (Sm).....	77
4.8.6.	Bombeo (B).....	77
4.8.7.	Balance de agua subterránea	79
4.9.	Balance integrado	79
4.10.	Características de los suelos.....	80
4.11.	Evaluación geofísica	81
4.12.	Evaluación de la vulnerabilidad	84
4.12.1.	Profundidad del nivel estático (D).....	84
4.12.2.	Recarga neta (R)	86
4.12.3.	Medio acuífero (A)	87
4.12.4.	Tipo de suelo(S)	89
4.12.5.	Gradiente topográfico (T).....	89

4.12.6.	Impacto a la zona vadosa (I)	91
4.12.7.	Conductividad hidráulica (C).....	93
4.12.8.	Mapa de vulnerabilidad total	95
4.12.9.	Índice de contaminación potencial (IC_DRSTIC)	97
4.12.10.	Sensibilidad de parámetros del método DRASTIC	99
4.13.	Perímetro de protección del Manantial Cerro Colorado (PPM).....	100
4.14.	Análisis geoquímico.....	102
4.15.	Validación de los planos de vulnerabilidad con la geoquímica.	109
5.	DISCUSION DE RESULTADOS	110
6.	CONCLUSIONES:.....	112
7.	RECOMENDACIONES.....	112
8.	BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXO 1.	CONCEPTOS BÁSICOS	119

RESUMEN

En décadas recientes, la preocupación a nivel mundial sobre la contaminación de las aguas subterráneas ha aumentado y México no es la excepción, en particular debido al estado de la sobre explotación y contaminación intrínseca de sus acuíferos. Pese a esto, existen pocos estudios sobre la contaminación y vulnerabilidad de los acuíferos nacionales (BGS-CONAGUA, 1998), específicamente los relacionados a actividades susceptibles de degradar la calidad del agua subterráneas en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado, ubicado en el Valle de Tula, Hidalgo; el cual se origina por la recarga incidental de aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). El objetivo de esta tesis fue establecer un perímetro de protección y determinar la vulnerabilidad natural del agua subterránea en la cuenca del Manantial Cerro Colorado. Este Manantial es de suma importancia para el abastecimiento de la población local y tiene un alto potencial como fuente alterna de agua para la ZMCM, por lo cual se requiere determinar su vulnerabilidad. Esto se hizo por medio de aplicar un balance hidrogeológico, en el cual se determinó que la disponibilidad de agua es de $251.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$, debido a la introducción de aguas residuales de ZMCM así como otras características particulares del suelo. Para determinar la vulnerabilidad de la cuenca se aplicó la metodología DRASTIC. Así, se encontró que en el centro-suroeste y noreste de la cuenca, la vulnerabilidad es moderada (140-159), mientras que en los alrededores del manantial es de alta a extrema (160-214). El cálculo del índice de contaminación potencial indica una alta susceptibilidad a la contaminación (40 a 70%), por lo que el radio de protección recomendado resultó de al menos 5 km. Por otro lado, se determinó que las formaciones minerales hidrogeoquímicas existentes en la zona son: Anhidrita, Calcita, Dolomita y yesos; así como gases disueltos, principalmente CO_2 , cuya combinación ha dado origen a las familias de aguas prevalecientes, entre las que están: aguas magnésicas, cálcicas y sódicas, aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, aguas bicarbonatadas sódicas y aguas sódicas, sulfatadas cloruradas sódicas. Estas últimas presenta mayor afinidad de reacción con diversos compuestos contaminantes. Los resultados obtenidos se podrán utilizar como información básica para definir políticas ambientales de desarrollo sustentable de la región, en programas de protección de acuíferos y cuerpos de agua asociados a manantiales, amenazados por actividades humanas, los cuales aumentan la susceptibilidad de contaminación de los suelos y los recursos hídricos.

ABSTRACT

In recent decades, the global concern about the contamination of groundwater has increased and Mexico is no exception due to the state of the overexploitation and intrinsic pollution of their aquifers. Despite this, there are few studies of pollution and vulnerability of the national aquifers (BGS-CONAGUA, 1998), specifically those related to activities that could degrade the quality of groundwater in the basin of the spring Cerro Colorado from the Valle de Tula, Hidalgo, which is caused by the incidental recharge of wastewater from the Metropolitan Area of the Mexico City (ZMCM). The aim of this thesis was to establish a perimeter protection and determine the natural vulnerability of groundwater in the basin of the spring Cerro Colorado. This spring is very important for water supply of the local population and has a high potential as alternate water source for the ZMCM, therefore is necessary to determine its vulnerability. This was done by applying a hydrogeological balance, in which it was determined that the availability of water is $251.4 \text{ Mm}^3/\text{year}$, due to the introduction of wastewater of the ZMCM as well as other specific characteristics of the soil. To determine the vulnerability of the basin was applied the methodology DRASTIC. It was found that in the center-west and northeast of the basin, the vulnerability is moderate (140-159), while in the vicinity of the spring water is high to extreme (160-214). The calculation of the index of potential contamination indicates a high susceptibility to contamination (40 to 70 %), so the radius of protection is recommended for at least 5 km. On the other hand, it was determined that mineral formations hidrogeochemical existing in the area are: anhydrite, calcite, dolomite and gypsum; as well as dissolved gases, principally CO_2 , whose combination has given rise to the families of prevailing waters, among which are: waters and magnesium, calcium and sodium, calcium bicarbonate waters and/or magnesium, sodium bicarbonate waters and waters, sulphated sodium chloride. The latter have a greater affinity for reaction with various polluting compounds. The results obtained may be used as basic information for defining environmental policy on sustainable development in the region, in programs for the protection of aquifers and water bodies associated with springs, threatened by human activities, which increase the susceptibility of soil contamination and water resources.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

El Valle de Tula conformado por los distritos de riego 003 (Tula), 100 (Alfajayucan) y 112 (Ajacuba) es una de las áreas más grandes del mundo irrigada con aguas negras. Éstas provienen de la Ciudad de México y han sido enviadas al valle desde 1890. Como resultado del masivo empleo de agua residual para riego junto con el tipo de suelos, esta es también probablemente una de las zonas con mayor recarga incidental ($26.5 \text{ m}^3/\text{s}$) en el mundo, tal como se reporta en el estudio realizado por (Jiménez *et al.*, 2003). Debido a lo anterior, los niveles freáticos en el subsuelo se han elevado considerablemente, de tal manera que hoy en día en sitios donde el agua subterránea se encontraba a 50 m de profundidad afloran manantiales con gastos de 40 a 600 L/s (BGS-CONAGUA, 1998). Dentro de este valle existen aproximadamente 502,000 habitantes; siendo el agua del subsuelo, la principal fuente de suministro, del cual se extraen $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$ para uso urbano (Jiménez *et al.*, 2004); por tal razón, es necesario garantizar agua para la población en suficiente cantidad y calidad.

La calidad del agua residual que sale de la Ciudad de México, se mejora durante su recorrido hasta llegar al acuífero del Valle de Tula. Ello ocurre mediante diversos mecanismos naturales tales como la degradación biológica, la fotólisis, la desorción, la oxidación, la precipitación y la dilución. Está documentado que por el paso del agua a través del suelo, este funciona como filtro y amortiguador de los contaminantes presentes en las aguas residuales que se vierten (Siebe, 1995). Hasta hace cinco años, el agua de los manantiales presentaba calidades compatibles con cualquier fuente de suministro requiriendo solo de cloración para ser potable, sin embargo hoy en día es posible que se requieran de otro tratamiento para consumo humano.

Los distritos de riego ubicados en el valle (DR03, DR100 y DR 112), han generado en consecuencia un tratamiento no convencional del agua residual, debido principalmente a su extensa área de cultivo (85 000 ha), y su antigüedad (más de 100 años). Por lo anterior, la utilización para riego de agua residual en esta zona, representa una alternativa al problema de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de México a muy bajo costo. Además, el almacenamiento del acuífero local ha aumentado, por lo que hoy la Comisión Nacional del Agua está considerando a esta zona como fuente de agua potable para Ciudad de México (Jiménez y Chávez, 2004).

Los habitantes del valle, que se dedican principalmente a actividades agropecuarias; tienen un estándar de vida mayor al de la población sin acceso al uso de agua residual para riego (Cifuentes, 1994). No obstante, a pesar de que el uso de aguas residuales tiene un beneficio económico para los habitantes, están contaminadas con organismos patógenos y sustancias químicas tóxicas que constituyen un riesgo para la salud de los agricultores, los consumidores de los productos agrícolas y de agua de abastecimiento (Jiménez y Siebe, 2004).

1.2. Justificación

La preocupación sobre la contaminación de las aguas subterráneas está aumentando en todo el mundo desde hace algunas décadas. En México se tienen pocos estudios a escala nacional y local, sobre la contaminación de los acuíferos y las zonas susceptibles a la degradación de la calidad de las aguas subterráneas. La infiltración del agua residual sin tratamiento hacia los acuíferos raramente se planea y se evalúa, sin embargo, esta práctica representa simultáneamente el potencial de un recurso benéfico y un riesgo de contaminación (Foster *et al.*, 1991). Por ello, la recarga no intencional de acuíferos con aguas residuales representa desafío técnico y de salud que debe ser evaluado cuidadosamente (Jiménez y Chávez, 2004).

El Manantial Cerro Colorado, ubicado en el Valle del Tula, en términos de cantidad (60 L/s,- CONAGUA, 1997a-), es una importante fuente de agua subterránea producto de la recarga incidental por irrigación con agua residual. Debido a los cambios hidrogeológicos en el acuífero y el tratamiento no convencional en la extensa área de cultivo, la calidad del agua del manantial es buena. Sin embargo, para crear estrategias eficientes de manejo de esta fuente a largo plazo así como para preservar su calidad, se requiere cuantificar la disponibilidad de agua superficial y subterránea de la misma al igual que su vulnerabilidad. De esta manera será posible definir políticas desarrollo sustentable y programas de protección de acuíferos.

Ante este panorama, entender los mecanismos condicionantes del movimiento de los contaminantes en el subsuelo del Valle de Tula es primordial para evaluar en qué medida se verán afectados los acuíferos de la zona a mediano y largo plazo. Esta tesis pretende contribuir con modelos cartográficos para el entendimiento de estos mecanismos, mediante la determinación de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado, en el Valle de Tula, Hidalgo. Tomando en cuenta las características propias del sistema natural y las actividades antropogénicas realizadas en el área.

1.3. Hipótesis

El uso de agua residual en las actividades agrícolas y las condiciones hidrogeológicas en las inmediaciones del Manantial Cerro Colorado, causan una alta vulnerabilidad en el acuífero debido a la carga contaminante del agua residual como: patógenos, metales pesados, descomposición de residuos orgánicos y aquellos retenidos en el suelo cuyo medio de transporte es el agua.

1.4. Objetivo

Establecer un perímetro de protección y determinar la vulnerabilidad natural del agua subterránea en la cuenca del Manantial Cerro Colorado en el Valle de Tula, Hidalgo.

1.5. Objetivos específicos

- Evaluar la disponibilidad de agua en el área de estudio.
- Determinar la vulnerabilidad del acuífero con la metodología DRASTIC.
- Evaluar un índice de contaminación potencial para la metodología empleada de la vulnerabilidad.
- Validar el mapa de vulnerabilidad con la geoquímica del agua subterránea.
- Establecer un área de protección contra la contaminación antropogénica del Manantial Cerró Colorado, tomando como base su índice de vulnerabilidad.

1.6. Metas

- Desarrollar un balance hidrológico para determinar la disponibilidad en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado.
- Determinar los parámetros hidráulicas del suelo
- Interpretar mediciones geofísicas para establecer la estratigrafía y condiciones del subsuelo.
- Determinar el índice de vulnerabilidad para cada parámetro del método DRASTIC.
- Interpretar la geoquímica del agua subterránea, para validar los mapas de vulnerabilidad.

1.7. Actividades

- Recopilación de información cartográfica digital, climatológica, hidrométrica, volúmenes de extracción y características del acuífero existente en la zona de estudio.
- Establecimiento de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado para contar con los límites del balance hidrológico.
- Muestreo de agua subterránea en piezómetros existentes, medición de los niveles freáticos y determinación de la dirección del flujo.
- Realización del balance hídrico con el fin de determinar la disponibilidad del agua en la subcuenca.
- Determinación de la vulnerabilidad del sistema mediante el uso de los paquetes de cómputo ArcGIS y Surfer, y la metodología DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).
- Validación de los mapas de vulnerabilidad a través del monitoreo de la calidad del agua subterránea en la zona de estudio.
- Análisis de la profundidad y el material del manto freático, determinación de la textura, el tipo de suelo y la conductividad hidráulica del área de estudio.

1.8. Alcances

El estudio se limitó a la subcuenca y el acuífero que incide en el Manantial Cerro Colorado. La calidad del agua se estableció a partir de la revisión de los estándares de calidad para Agua Potable de México (NOM 127 SSA1 1994) y la determinación de los iones mayores para un balance iónico, que permita establecer el tipo de agua, su procedencia y facies que se generan partir de estos.

La metodología utilizada para el procesamiento de la información recopilada se limitó a aplicar las herramientas del balance hidrológico y la vulnerabilidad DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) para generar mapas de representación e isoconcentraciones, que permitan la adecuada evaluación de la información recopilada con metodologías estadísticas ya establecidas. Se delimitó un área de protección contra el riesgo de contaminación por la recarga de aguas residuales, con base en la vulnerabilidad, la geoquímica de las aguas subterráneas y la dirección del flujo tanto superficial como subterráneo, generando un sistema de información geográfica (SIG) para futuras investigaciones.

1.9. Antecedentes

La definición tradicional de vulnerabilidad de un acuífero se refiere a la susceptibilidad natural que presenta a la contaminación, y está determinada principalmente por las características intrínsecas del acuífero. De acuerdo con el National Academy Council (1993) el concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a la tendencia o probabilidad que un contaminante alcance una posición específica en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno.

El concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, fue introducido por el hidrogeólogo francés Margat en la década de los 60's, y aunque inicialmente se relacionaba sólo con aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos de contaminación (Ramos, 2007). Se utiliza principalmente para realizar cartografía temática según la metodología de vulnerabilidad aplicada.

La mejor manera de representar la vulnerabilidad del acuífero es en forma de mapas, los cuales involucran la identificación de áreas en donde la calidad subterránea del agua es susceptible de variar, debido a la interacción de características físico-químicas que aumentan o retardan el movimiento de contaminantes en la zona no saturada.

La vulnerabilidad puede ser intrínseca o específica; la primera, que será utilizada en el presente trabajo, se refiere al riesgo potencial de contaminación del agua subterránea por contaminantes generados por actividades humanas y es independiente de la naturaleza del contaminante; mientras que la específica se utiliza para definir la vulnerabilidad del agua subterránea asociada con algún contaminante en particular, o con un grupo de contaminantes (Gogu y Dessargues, 2000).

El riesgo de contaminación de agua subterránea se puede definir como la probabilidad de que ésta se contamine con alguna sustancia, en concentraciones por encima de los valores recomendados para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991). Para que el riesgo se constituya en una amenaza seria a la calidad del agua subterránea, se requiere que existan los procesos de dispersión de los contaminantes dentro del acuífero apropiados. El propósito de una evaluación de riesgo es determinar cuáles son las fuentes potenciales de contaminación que representan un mayor potencial de alterar la calidad del agua subterránea y si ésta al ser consumida puede causar daños a la salud humana.

La vulnerabilidad no es una característica que pueda ser medida en campo (Gogu y Dessargues, 2000), sino una propiedad natural del sistema acuífero que depende de su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante debido a la contaminación antropogénica y/o natural (Viba y Zaporec, 1994).

La vulnerabilidad del acuífero depende principalmente de la accesibilidad del soluto y capacidad de atenuación de la zona no saturada, que se define como la atenuación del medio y puede ser el resultado de su actividad bacteriológica, retención física y reacción química con los contaminantes, esta sensibilidad se relaciona además, con factores asociados con la fuente contaminante en el subsuelo como:

- a) Modo de disposición del contaminante en el subsuelo y en particular de la cantidad de carga hidráulica asociada.
- b) La clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

Se han llevado acabo numerosos trabajos relacionados con el área de estudio, pero estos han tenido un carácter geológico, geohidrológico, e incluso, recientemente han sido de tipo ambiental. Entre los reportes más relevantes por la línea de investigación hidrogeológica-ambiental, los estudios realizados por Hidrotec (1970), Geocalli (1981), Futura (1990), Thorsa (1991), ARIEL (1999) y (CONAGUA *et al.*, 1998); los cuales reportaron cambios importantes en algunas características del suelo y del agua, presentes en el Valle del Mezquital Hidalgo. En dichos estudios de igual manera se obtuvieron datos de infiltración no intencional, elevación del nivel freático, detección de contaminantes orgánicos emergentes, estos principalmente en las donde más de 85 000 hectáreas de superficie agrícola, las cuales son regadas con agua residual proveniente de la ciudad de México (Jiménez *et al.*, 2004).

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los aspectos teóricos más relevantes para comprender la metodología aplicada y en el Anexo 1 se describen conceptos básicos complementarios.

2.1. *Vulnerabilidad de acuíferos*

El medio físico puede dar cierto grado de protección a los acuíferos al actuar como purificador del agua contaminada cuando se infiltra a través del suelo y otros estratos de la zona no saturada. El grado de atenuación que el ambiente físico pueda efectuar y el tipo de contaminante, determinan el potencial relativo con que un acuífero puede contaminarse (Auge, 2006).

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea que depende de la sensibilidad de estos a impactos humanos y/o naturales, lo cual se conjunta con factores hidrogeológicos que determinan tanto la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes, como la capacidad de atenuación de los estratos por encima de ella (Agüero y Pujol, 2002). Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón para que algunas áreas sean más vulnerables que otras. Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles permiten valorar la vulnerabilidad en forma cuantitativa entre las regiones que integran el área de estudio (Custodio, 1995).

La elaboración de un mapa de vulnerabilidad implica combinar varios mapas temáticos, correspondientes a los diferentes factores hidrogeológicos elegidos para la evaluación. Los cambios en el sistema acuífero hacen que el mapa de vulnerabilidad no sea estático, sino que deba ser actualizado en el correr del tiempo (Foster *et al.*, 1991).

El DRASTIC fue originalmente diseñado como un modelo de fácil uso, que mediante conocimientos básicos de hidrogeología, permite evaluar el potencial relativo de contaminación del agua subterránea. El modelo no fue diseñado para reemplazar las inspecciones en el sitio (Aller *et al.*, 1987), si no para complementarlas.

El modelo DRASTIC utiliza siete parámetros hidrogeológicos en la determinación de la vulnerabilidad y permite evaluar la susceptibilidad de un sitio a la acción de una carga contaminante permanente tales como: la disposición de desechos como la materia orgánica, metales traza, detergentes, organismos patógenos, etc. Los parámetros independientes requeridos son los que conforman su acrónimo:

- a) Depth, profundidad del agua subterránea
- b) Recharge, recarga neta
- c) Aquifer, tipo de acuífero
- d) Soil, tipo de suelo
- e) Topography, pendiente topográfica
- f) Impact of the zone vadose, impacto a la zona vadosa
- g) Conductivity hydraulic, conductividad hidráulica

Estos parámetros no se consideran estacionarios, algunos de ellos varían con el tiempo como es el caso de la profundidad del nivel estático, la recarga neta y otros, como el tipo de acuífero y la zona vadosa; que dependen de la velocidad con la que evoluciona el nivel estático (Ramos, 2007).

Las hipótesis en las que el índice DRASTIC se basa son las siguientes:

- Existe una fuente por la que el contaminante se introduce en la superficie del terreno.
- El contaminante penetra con el agua de recarga.
- El contaminante tiene la movilidad del agua.
- El área evaluada es mayor o igual a 45 hectáreas.

En la evaluación se emplea el método de índices y superposiciones, que combina un conjunto de características o atributos físicos del suelo, de la zona no saturada y de los acuíferos; a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad, mediante sistemas de matrices (superposición) y modelos de sistemas de conteo de puntos (índices). Primero se seleccionan los parámetros representativos para evaluación de la vulnerabilidad y posteriormente a cada parámetro se le asigna un rango de valores que refleja el grado de vulnerabilidad a la contaminación (Gogu y Dassargues, 2000).

El método de conteo de puntos utilizado por DRASTIC, es un sistema de evolución en los que cada parámetro es multiplicado por un peso asignado para reflejar la relación entre ellos, los parámetros evaluados y multiplicados, son después sumados para obtener la puntuación final (Gogu y Dassargues, 2000), esta puntuación provee una medida de la vulnerabilidad para cada punto del área de estudio.

El método DRASTIC produce una serie de resultados que permiten desarrollar programas para la protección del agua subterránea, su practicidad facilita aumentar o disminuir el número de parámetros y la posibilidad de adaptar estos a condiciones específicas del área de estudio.

La evaluación de la vulnerabilidad de una región, suele concluir con su representación cartográfica. La situación se va complicando a medida que crece la cantidad de información básica necesaria para desarrollar el método. El grado de detalle de la evaluación depende del objetivo perseguido. En trabajos semiregionales se utilizan escalas desde 1:100, 000 hasta 1:500, 000 y en regionales escalas de hasta 1:500, 000, que normalmente tienen como finalidad la planificación para la preservación y el uso adecuado de los recursos naturales (Ramos, 2007).

2.2. Geoquímica del agua subterránea

La composición química de las aguas subterráneas puede aportar información muy valiosa sobre el comportamiento hidrogeológico regional, principalmente acerca del flujo subterráneo. Si se dispone de una buena red de piezómetros, es posible construir mapas de isopiezas y cortes que informen detalladamente el flujo en el subsuelo. El problema es que los datos piezométricos normalmente son escasos o inexistentes, debido a sus altos costos. Los datos químicos ayudan eficazmente a establecer áreas de recarga y descarga, tiempos de permanencia en el terreno, entre otras. Para ello, hay que tener una idea de los procesos que inciden en la evolución química del agua (Daziano, 1984).

El agua de la lluvia, incluso en zonas libres de contaminación, tiene pequeñas cantidades de sustancias disueltas procedentes del polvo atmosférico, del orden de 0,2-0,4 mg/L de cada ión, e incluso mayores (Custodio y Llamas, 1983).

Un caso especial lo constituyen las lluvias ácidas que en algunas regiones llegan a destruir la vegetación o alterar la vida acuática en lagos. La causa es el azufre emitido en su forma gaseosa por diversas industrias y centrales eléctricas. Partículas de S o como gas SO_2 . ($\text{S} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{SO}_2$, $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{SO}_4^- + 2\text{H}^+$). En cualquier caso, después de producirse la precipitación, las pequeñísimas concentraciones que contiene se concentran por destilación. Al intentar explicar el origen de algunos iones en un agua subterránea, se debe considerar que una parte pudo no ser adquirida en el terreno, sino en la atmósfera (Custodio y Llamas, 1983).

La etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición química de un agua subterránea. Con frecuencia, gran parte de las propiedades geoquímicas del agua subterránea se adquieren en los primeros metros de su recorrido, esto se debe a que el agua se acidifica (por sus interacciones con el CO_2 del suelo) lo que la vuelve altamente corrosiva en materiales como los silicatos y los carbonatos; la interacción con estos materiales disminuye la acidez del agua debido a que se liberan H^+ como producto de la reacción (Drever, 1997).

Si el agua permanece en el suelo, siempre hay CO_2 presente y recupera, mediante la reacción, la acidez que ha consumido en la alteración. Esto mantendrá su agresividad mientras permanezca en el suelo, pero al llegar a un acuífero, en el medio saturado normalmente no hay aportes de acidez, entonces se hace básica y pierde su capacidad de disolver carbonatos y alterar silicatos (Marín *et al.*, 2004).

2.3. Evolución o comportamiento de los niveles estáticos en los acuíferos

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima, hasta que sale al exterior en un río, manantial o captación, pueden transcurrir unos días o miles de años, y el recorrido puede ser de unos metros o de varios kilómetros. Por tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto, y de la duración del mismo, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo (Drever, 1997).

Como norma general, a mayor tiempo de permanencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua, un agua que permanezca unas horas en contacto con cloruro sódico, será más salina que otra que esté muchos años en contacto con cuarzo, y alguna de las sustancias disueltas en el agua no aumentan sino que disminuyen (García *et al.*, 2006).

Las familias de aguas sulfatadas cálcicas, clorada sódicas y bicarbonatadas cálcicas, se obtienen a través del paso del agua por yeso sales cloradas y roca caliza respectivamente, ya que se generan iones Ca^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4 , Ca^{++} , CO_3H^- , (Figura 2.1). En los procesos de formación y disolución de minerales (Ramos, 2007).

Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, generalmente, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son bicarbonatadas. Después predomina el sulfato y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb (Kehew, 2001).

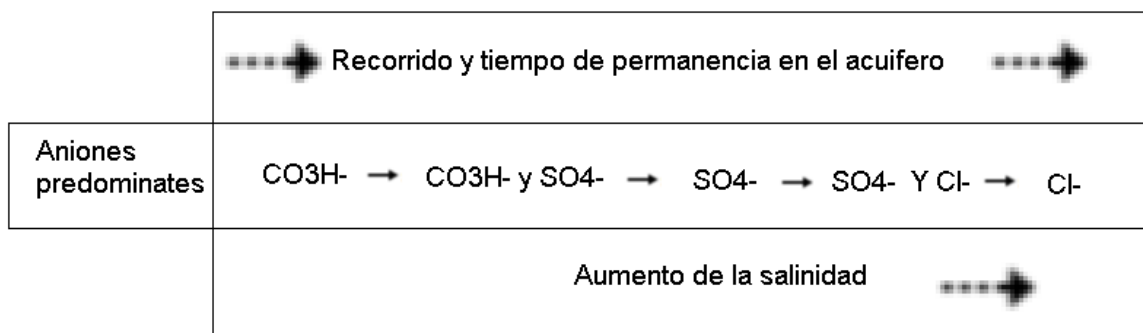


Figura 2.1. Composición catiónica en secuencia analógica (Sánchez *et al.*, 1987).

Esta secuencia se debe a dos factores: solubilidad y abundancia en el subsuelo de las distintas sales. El agua disuelve o altera los minerales presentes en el subsuelo que encuentra, hasta que se alcanza el tope marcado por la constante de equilibrio correspondiente. A cada mineral comenzando con la de menor K_{eq} a la de mayor.

La solubilidad más baja corresponde a carbonatos, sulfatos y cloruros y la más alta es para los bicarbonatos, raramente para los sulfatos y casi nunca los cloruros (Figura 2.7). Un litro de agua puede llegar a disolver 2100 mg/L de $\text{SO}_4^{=}$, mientras que puede alcanzar 360 mg/L de Cl^- (Scarrow *et al.*, 2002). La distribución de la geoquímica del agua en el subsuelo de una región se describe a más detalle en el esquema trazado por Driscoll (1986). En las grandes cuencas sedimentarias, se distinguen tres zonas en profundidad Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Distribución geoquímica del agua en el subsuelo.

Zona	Flujo	Recorrido	Tiempo (años)	Tipo de agua	sales
superior	activo	corto	Años o décadas	Bicarbonatadas	Menos salinas
intermedia	>activo	más largo	Cientos de miles	Mas salinas	Sulfato
inferior	Muy lento	Muy Largos	Miles de millos	clorada	Salinidad elevada

En una misma área pueden extraerse aguas de composiciones muy distintas aunque la litología sea relativamente homogénea; se observa en la Figura 2.2 que el sondeo A, capta un flujo regional mientras que el sondeo B, intercepta un flujo local, de modo que su química puede ser muy diferente.

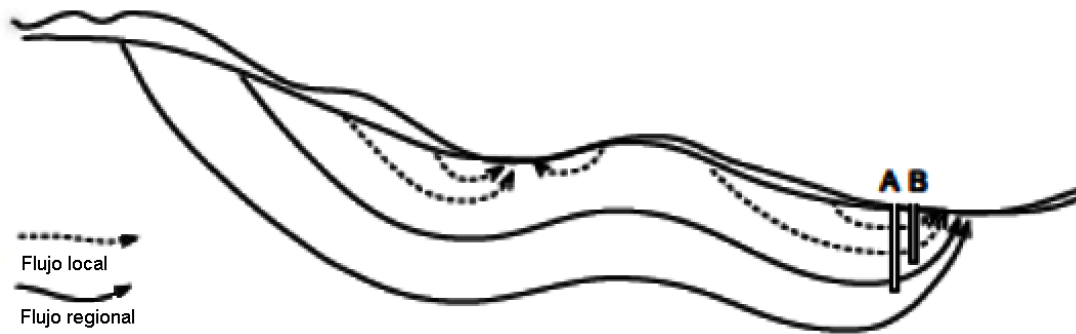


Figura 2.2. Extracción de agua a diferentes profundidades con características de flujo local o regional (Sánchez *et al.*, 1987).

Modelo geoquímico

Por medio de la hidrogeoquímica se puede conocer de manera cuantitativa el funcionamiento de los acuíferos y la calidad de los mismos. La composición química del agua está relacionada con el funcionamiento general del acuífero, ya que la concentración de los elementos depende del tipo de material que atraviesa, la porosidad y permeabilidad del mismo; así como del tiempo de residencia y longitud de recorrido. El comportamiento hidrogeoquímico de los acuíferos se puede alterar cuando la recarga presenta compuestos orgánicos, desechos industriales, sales minerales etc. (Gimeno y Peña, 1994).

Estos modelos se basan en la termodinámica, por lo cual es importante conocer las características físico-químicas del agua. Los modelos geoquímicos requieren como datos de entrada resultados de análisis físico-químicos de agua y como datos de salida dan información de la distribución de las especies acuosas y el índice de saturación de las fases sólidas posibles, de acuerdo a la composición química de la solución.

Los modelos pueden ser utilizados para 1) determinar los minerales que controlan la composición química del agua; 2) simular mezclas de aguas y los efectos que pueden tener en el acuífero; 3) conocer el índice de saturación específico de ciertos minerales o especies acuosas.

Para simplificar los cálculos de los estados de saturación se supone la existencia de iones complejos los cuales se describen por la expresión de acción de masa y se supone que los coeficientes de actividad de iones simples se describen por medio de ecuaciones que sólo dependen de la temperatura y la fuerza iónica (Gimeno y Peña, 1994).

Características del Modelo Geoquímico PHREEQE

PHREEQE (David *et al.*, 1990), es un modelo para reacciones geoquímicas basado en modelos acuosos de pares de iones o asociación de estos; sus siglas reflejan los datos que arrojan el modelo, los cuales son:

- a) Potencial Hidrógeno (pH)
- b) Potencial electrón
- c) Concentración total de elementos
- d) Cantidades de minerales u otras fases transferidas dentro y fuera de la fase acuosa
- e) Distribución de especies acuosas
- f) Estado de saturación de la fase acuosa con respecto a fases minerales específicas.

Con el modelo se pueden simular diferentes tipos de reacciones como son:

- 1) Adición de reactivos a una solución
- 2) Mezcla entre dos aguas
- 3) Titulación de una solución con otra

Previamente a la aplicación del modelo, es necesario realizar un balance iónico para conocer si los resultados de los análisis físico-químicos efectuados presentan un error máximo del 10%, ya que el modelo puede presentar problemas si el error es mayor.

Con los resultados, se determinan las concentraciones de las especies acuosas y fases minerales que pueden formarse en el acuífero (Custodio y Llamas, 1995).

3. Descripción de la zona de estudio

En este capítulo se describen las características fisiográficas más relevantes de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado.

3.1. Ubicación

El estado de Hidalgo, conformado por 84 municipios, se encuentra ubicado en la porción central del país; limita al norte con los estados de Veracruz y San Luis Potosí, al sur con el estado de México, al este con el estado de Puebla, al oeste con el estado de Querétaro, y al sureste con el estado de Tlaxcala (Figura 3.1). El área de estudio es la subcuenca del Manantial Cerro Colorado localizada dentro del Valle del Mezquital; la cual abarca una superficie de 23, 283 km², comprendida entre los paralelos 19°59'23" y 20°9'58" de latitud norte y entre los meridianos 99°20'16" y 99°7'14" de longitud oeste, delimitada por la porción del río Salado. En la entrada de la subcuenca se localiza la estación hidrométrica Tezontepec aguas abajo Salida Túnel Nuevo, (Figura 3.1). Los municipios que abarcan la zona de estudio son Tlahuelilpan, Teltipan, Doxey, Tlaxcoapan, Cardonal, Atitalaquia, Tezoquipa, Bomintzha y una porción de los municipios Tlamaco, Progreso, Presas y El Llano (Figura 3.2).

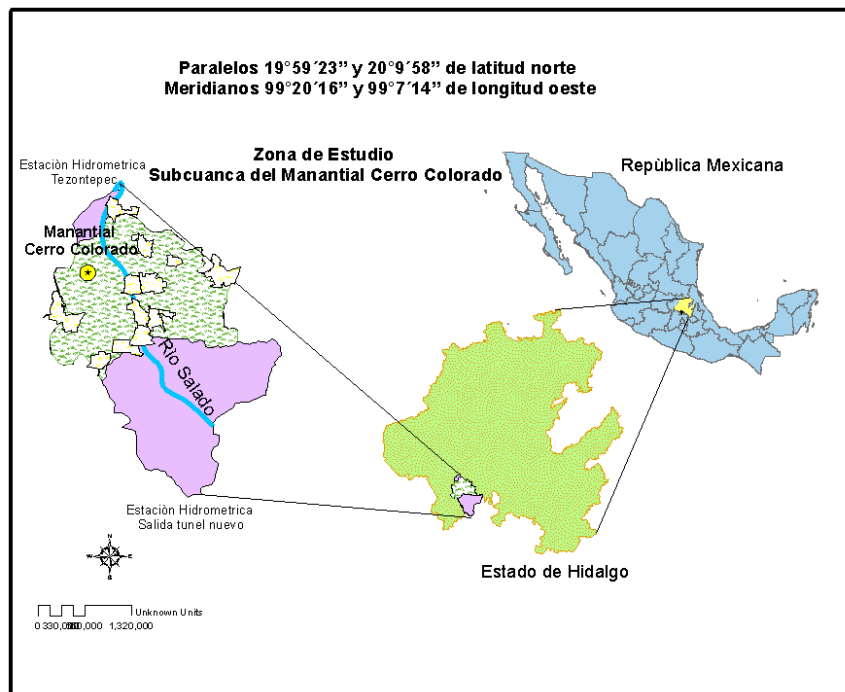


Figura 3.1 Ubicación del área de estudio (elaborado para esta tesis por Becerril, 2013)

3.2. Vías de comunicación

Las carreteras de mayor importancia son: la carretera federal No. 85 (México-Laredo), la estatal No. 45 y la estatal No. 19 (México-Querétaro); están además caminos pavimentados, de terracería y brechas que unen localmente a los poblados de la zona. Existen dos líneas de ferrocarril: la México-Nuevo Laredo y la línea México-Guadalajara (CONAGUA, 2002).

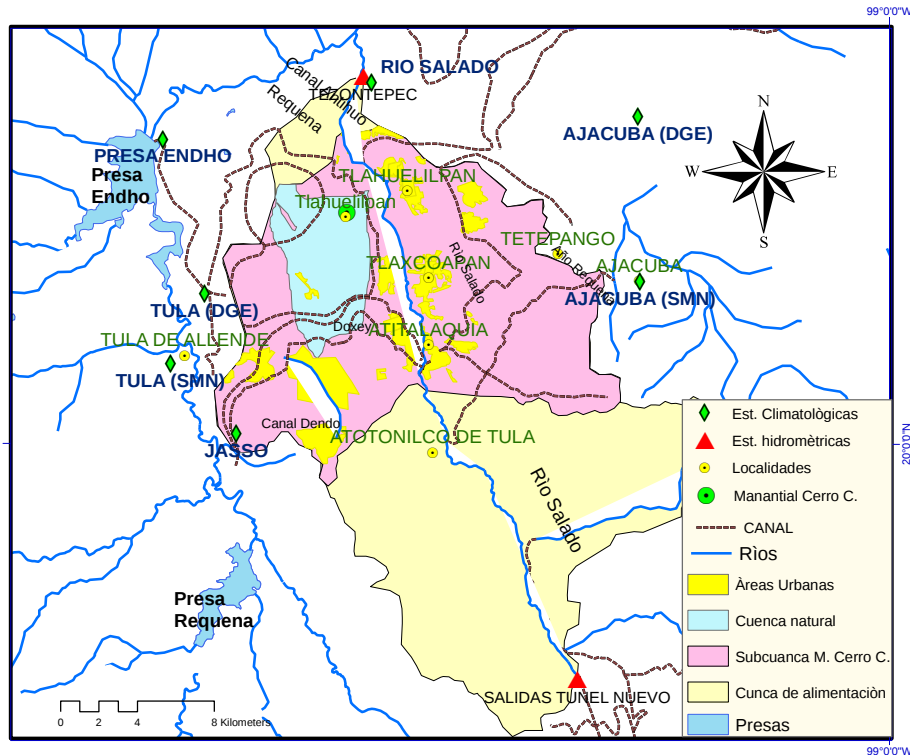


Figura 3.2. Delimitación de la cuenca del Manantial Cerro Colorado (elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

3.3. Aspectos socioeconómicos

La principal actividad de la población económicamente activa son la industria y la agricultura. La primera se desarrolla principalmente en Tula, donde se ubican industrias de transformación, extractivas, de construcción y maquiladoras; siendo las más importantes la Termoeléctrica, la Refinería de Tula, las cementeras Cruz Azul y Tolteca, y la petroquímica (Romero, 1997). En cuanto a la agricultura, dentro del valle del Mezquital se encuentran los distritos de riego 03-Tula, 100-Alfajayucan y 112-La Concepción; el DR03 por su extensión superficial regable y antigüedad, constituye el esquema de riego más grande del país. Los principales cultivos son: maíz, alfalfa, cebada, frijol, chile, calabaza y avena; mientras que los cultivos secundarios son: el tomate de cáscara, trigo, jitomate y avena (SEMARNAP, 1996).

3.4. Clima

De acuerdo a la calificación climatológica de Köppen (Lydolph, 1985), la zona de estudio tiene un clima seco semiárido. La temperatura media anual es de 16.8° C, siendo los meses más calurosos abril y mayo. La precipitación media anual es de 438 mm; la temporada de lluvias abarca los meses de mayo a septiembre. Para esta área la evapotranspiración media anual es de 1,311 mm.

3.5. Hidrografía

El Valle del Mezquital pertenece parcialmente a la Región Hidrológica No. 26, Alto Pánuco, Cuenca del río Tula. La subcuenca del Manantial Cerro Colorado se encuentra dentro del distrito de riego 03, siendo la corriente principal el río El Salto, afluente del Tula; donde se interconectan los afluentes que se utilizan para dar salida a las aguas negras provenientes del sector poniente de la Ciudad de México a través del Tajo de Nochixtongo. Las aguas del río Hondo y Cuautitlán afectan considerablemente la calidad del agua del río (Cruickshank *et al.*, 2000).

En su estado natural, la zona disponía de recursos hídricos muy limitados. El escurrimiento superficial y la recarga natural de los acuíferos eran de magnitud reducida a causa de la baja precipitación pluvial. Sin embargo, a partir de la introducción de las aguas residuales procedentes del Valle de México a fines del siglo pasado, sus condiciones hidrológicas se fueron modificando sustancialmente. Mediante la construcción de obras de infraestructura hidráulica, se ha incrementado el aprovechamiento del caudal creciente de aguas residuales con fines agrícolas (Jiménez *et al.*, 2004).

3.6. Infraestructura hidráulica

Actualmente, la zona recibe aproximadamente 40 m³/s de aguas residuales no tratadas que se utilizan parcialmente mezcladas con el escurrimiento natural del río Tula, para regar alrededor de 45,214 Ha en el Distrito de riego 03. El Distrito de riego 03 Tula, cuenta con una superficie de 45,214.52 Ha, que se riegan mediante una red de canales, siendo los principales los descritos en la Tabla 3.1. La existencia de revestimiento o no en los canales, da mayor o menor oportunidad de recarga de los acuíferos locales, por lo que es importante hacer resaltar que 81% de los canales principales están sin revestir, al igual que 52% de los canales laterales (BGS, *et al.*, 1998).

Tabla 3.1 Canales principales en el DR 03

Nombre	Capacidad (m ³ /s)
El Salto- Tlamaco	50
Canal de Fuerza	13
Dendhó	15
Endhó	15
Requena	15

El valle posee una amplia infraestructura hidroagrícola que consiste en almacenamientos, conducciones y vías de comunicación. Dentro del distrito DR03 existen 3 presas de almacenamiento y 6 derivadoras, las cuales quedaron fuera del área de estudio.

Los niveles freáticos oscilan entre los 10 y 20 metros de profundidad en dirección a Mixquiahuala, dentro de los cuales se tienen localizados 22 puntos de muestreo entre pozos, norias y matinales. Las estaciones climatológicas más cercanas son: Tula (SMN), Tula (DGE), Jasso, Presa Endhó, Río Salado, Ajacuba (DGE) y Ajacuba (SMN); las estaciones identificadas con las siglas DGE son operadas por la Dirección General de Estudios; las restantes pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA.

3.7. Fisiografía

El Valle del Mezquital se ubica en el Altiplano Mexicano, dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, en donde forma un amplio valle dividido por serranías y cerros separados. La Subcuenca del Manantial Cerro Colorado tiene un relieve pronunciado en la zona del parteaguas (Figura 3.3) y en su parte central es plano; las localidades principales son Tlahuelilpan, Tlaxcuapan, Atitalaquia y pate de Tepepango con alturas que van de los 2860 a 2020 msnm; esta parte del valle tiene una inclinación predominante hacia el noroeste y escurren sus aguas al río salado como una continuación del río Tula (BGS y CONAGUA, 1998).

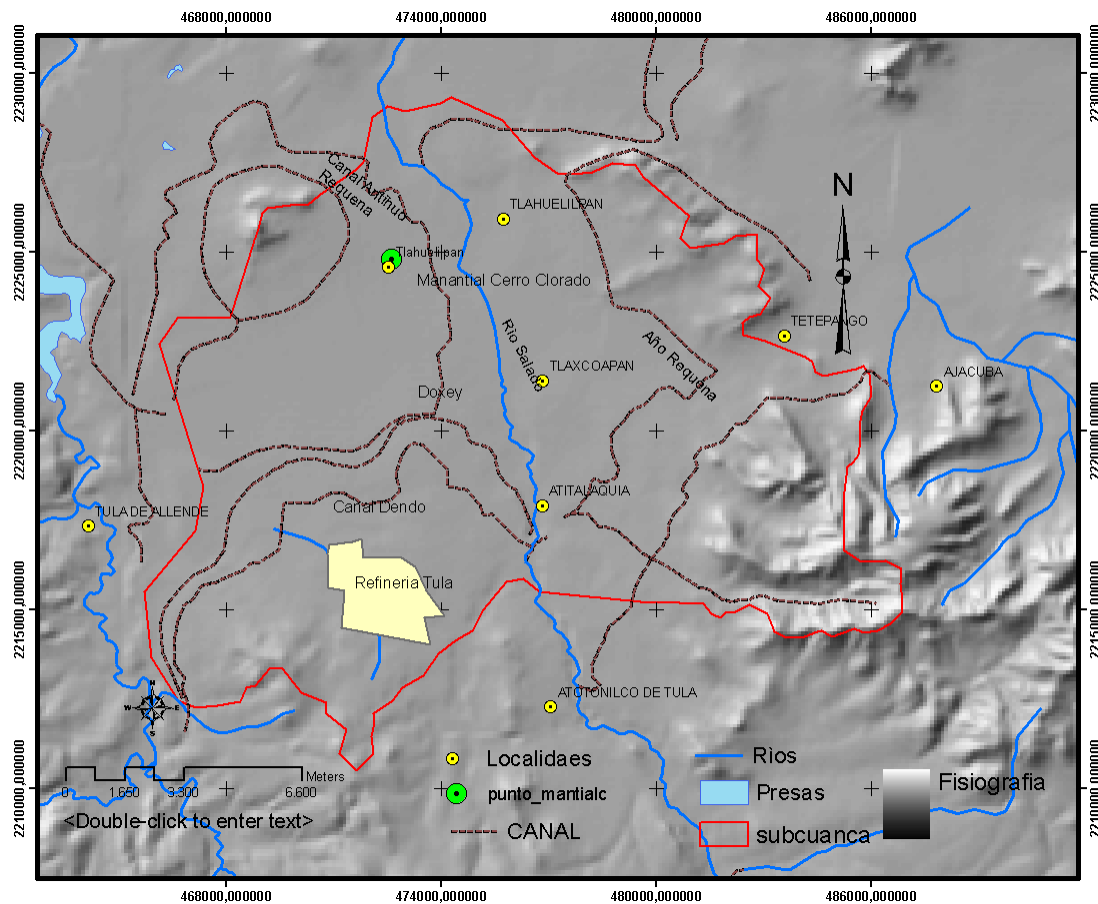


Figura 3.3. Fisonomía de la Subcuenca del Manantial Cerró Colorado (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013)

3.8. Geología regional

El eje Neovolcánico cubre al sur parte del estado, con una variedad de rocas compuestas principalmente por andesitas, riolitas y material piroclástico, aflorando rocas de tipo sedimentario e ígneo que varían en edad y composición, caracterizándose por estructuras volcánicas con una topografía poco abrupta, (BGS y CONAGUA, 1998).

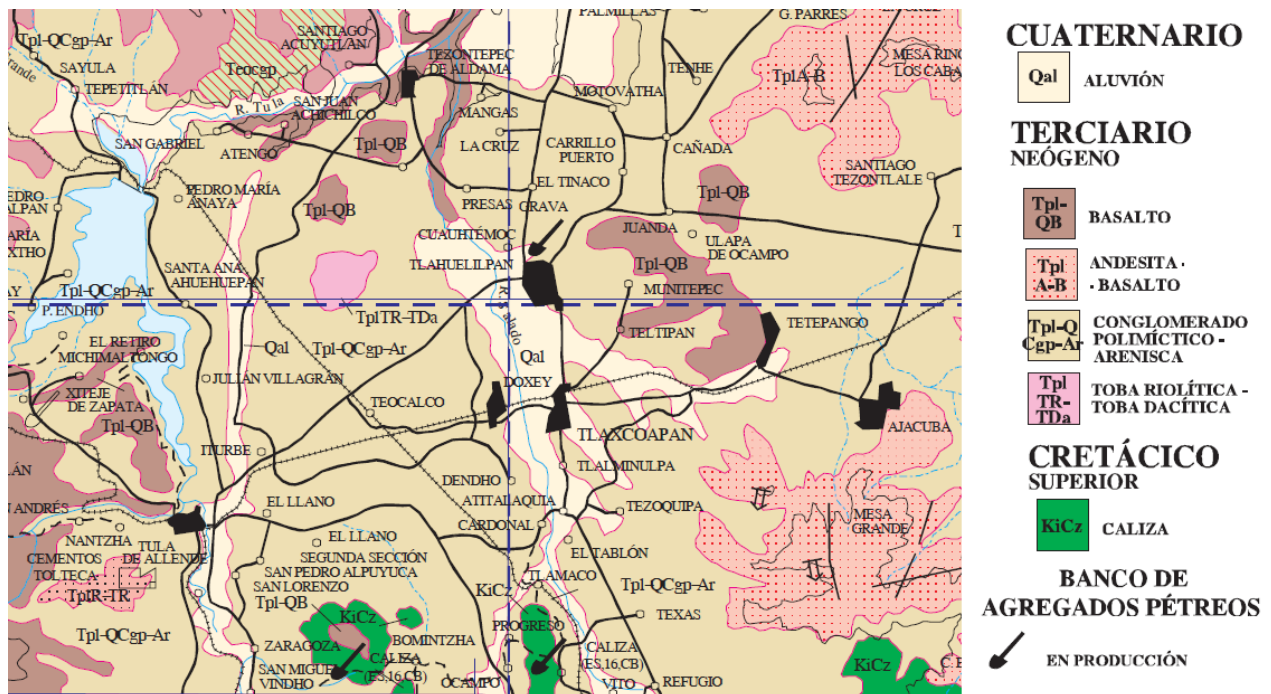


Figura 3.4 Geología de la Subcuenca del Manantial Cerro Colorado (Fries ,1962) reproducido BGS y CONAGUA, 1998)

En el área de estudio se evidencian eventos geológicos (compresivo, tectónico destensivo y actividad volcánica), como el que se manifestó afines del Cretácico-Terciario, dando como resultado cordilleras conformadas por rocas sedimentarias Mesozoicas, fallas normales y de fractura con orientación NW-SE y NE-SW, finalmente rocas intrusiva y derrames de lavas que cubren parte las rocas sedimentarias (Figura 3.4). La unidades litológicas comprendidas son del Cretácico al Reciente, siendo de origen marino-continetales (Tabla 3.2); se conforman como calizas, calizas dolomitizadas y rocas sedimentarias (lutitas areniscas, conglomerados, areniscas, limolitas y depósitos aluviales), que abarcan desde el Paleozoico (Pérmico), hasta el Cuaternario, con rocas ígneas intrusivas datan del Terciario Superior, rocas calcáreas del Cretácico Superior, dando origen a la formación Doctor con afectaciones de mineralización (BGS y CONAGUA, 1998).

Tabla 3.2 Evidencia geológica de formaciones litológicas tomado de BGS y CONAGUA, 1998.

Estratigrafía	Roca	descripción	Tiempo geológico
Mesozoico (Sistema Cretácico)	<i>"El Doctor"</i>	Está constituida por rocas sedimentarias (calizas de color claro que forman estratos masivos)	Cretácico
	<i>Mexcala</i>	Son sedimentos marinos de grano variable con intercalaciones de limonitas, lutitas, calizas y areniscas	Cretácico
	<i>Soyatal</i>	Está constituida por calizas en capas gruesas y compactas con intercalaciones de arcilla y nódulos de pedernal.	Cretácico
	<i>Grupo El Morro</i>	Se encuentra constituido por rocas sedimentarias continentales que forman cuerpos de poco espesor.	Cenozoico
Cenozoico (Sistema Terciario)	<i>Grupo Pachuca</i>	Está formado por rocas ígneas extrusivas de composición andesítica, principalmente compuesta por arenas cementadas de grano grueso a mediano, andesitas y tobas; estas últimas presentan fracturamiento abundante de escasa profundidad.	Cenozoico
Formación Tarango		Está constituido por materiales clásticos de ceniza volcánica y derrames de lava.	Actual
Material Aluvial		Este material es de origen fluvial, aflora a lo largo de los ríos	Actual

3.9. Hidrogeología

La geología de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado es muy compleja, ya que las formaciones geológicas varían litológicamente y poseen características hidrogeológicas diferentes entre sí; éstas están gobernadas por la estructura de las rocas, las fallas geológicas, la permeabilidad y porosidad de los diferentes depósitos. Dentro de las formaciones geológicas se infiere la existencia de tres unidades que forman acuíferos de utilidad. El aluvión, los derrames de lava del Cuaternario y las calizas del Cretácico Superior, que poseen permeabilidad media a alta, asociada con el fracturamientos, formaciones variables y en algunas áreas se encuentran interdigitados con depósitos de menor permeabilidad (Figura 3.5). Otra fuente de agua subterránea es la secuencia de arenas y gravas dentro de los materiales aluviales. Estos acuíferos son de tipo libre, semiconfinado y confinado, con espesores muy variables, con baja permeabilidad debido a la capa gruesa de arcillas (BGS y CONAGUA, 1998).

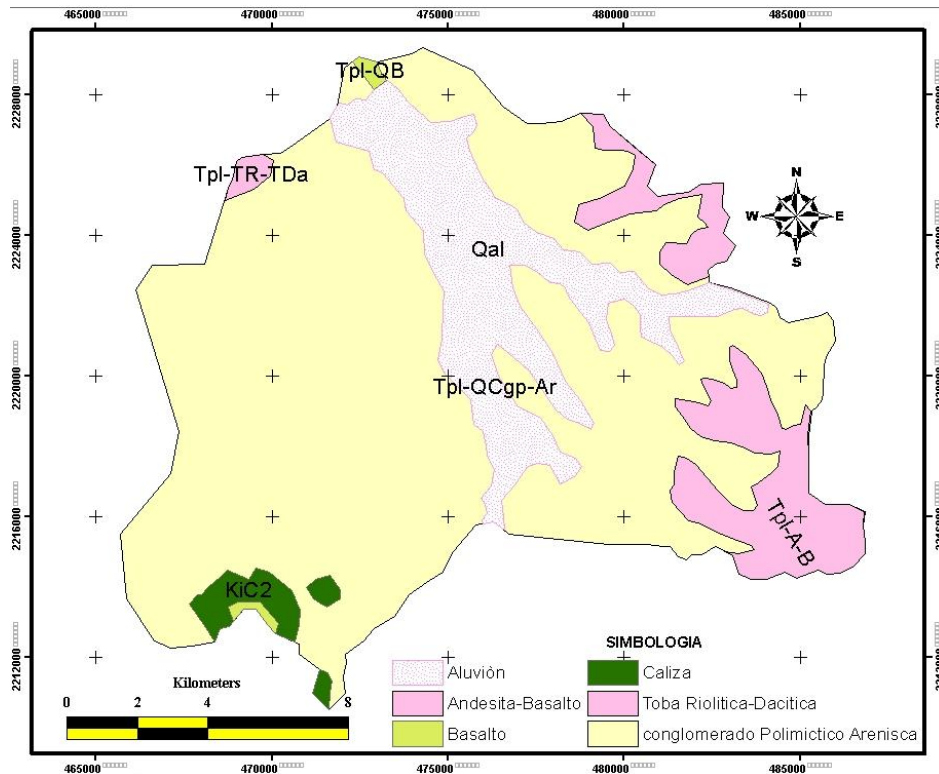


Figura 3.5. Geología delimitada por la subcuenca del Manantial Cerro Colorado (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

Por las condiciones hidrográficas actuales y recarga principal por infiltración de aguas negras, resulta de mayor importancia la formación Tarango con sus intrusiones de lavas, estos sedimentos tienen permeabilidad muy variable, por su diversa granulometría y cementación, están intercalados con derrames basálticos; a mayor profundidad se localizan las calizas cretácicas, poseen alta permeabilidad, probablemente como resultado de procesos de disolución. Las rocas básicas del terciario y cuaternario, cuando no están sepultados por sedimentos, forman parte de cerros y lomeríos, que propician por su permeabilidad, la infiltración de agua de lluvia hacia estratos profundos; pero en ellas es raro encontrar aprovechamiento por pozos o norias. En las calizas del Cretácico sí se han perforado pozos, muchos de los cuales han tenido buen rendimiento. Una manifestación de la complejidad de la estructura geológica de la región es la existencia de manantiales interdigitados en diferentes capas (Fries, 1962).

La configuración de la elevación del nivel estático muestra que el agua subterránea se mueve con una dirección preferencial de sur a norte. Los niveles someros se localizan en Atitalaquia y se profundizan hacia Tlahuelilpan, cerca del poblado de Tepatepec; se infiere un parteaguas del flujo subterráneo, donde los niveles estáticos varían de 10 a 55 m.

De los aprovechamientos que se localizan en el área de estudio, la profundidad varía de 3 a 40 m para pozos someros y norias; con pozos de abastecimiento de agua potable que van de 50 a 450m. El agua subterránea se utiliza principalmente para uso industrial en 32.5%, para uso agrícola en 25% y para uso doméstico se ocupa 16.94 % (CONAGUA, 1997a).

3.10. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Con base en estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 1998) y el British Geological Survey (BGS, 1998), en el Valle del Mezquital se han determinado algunos parámetros como conductividad eléctrica, temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad y parámetros químicos (iones principales y metales). De la interpretación de los resultados, se encontró que de los sitios de muestreo, dos pozos no cumplen con la Norma Nacional (NOM-127-SSA1-1994), en la cual se establecen los límites permisibles de calidad de agua para uso potable en México. Entre los parámetros analizados que no cumplen son nitratos, sodio, sólidos disueltos totales (STD) y cloro-flúor. Con respecto a los parámetros bacteriológicos se encontró que 5% de los aprovechamientos de la zona rebasan la Norma Nacional, la cual establece que el máximo permisible es de 2 NMP/100 ml, de Coliformes Totales; mientras que los resultados presentan valores que varían de 4 a 2490 NMP/100ml. En cuanto a coliformes fecales, se detectó que en dos aprovechamientos en la zona de estudio se presentan coliformes fecales, con valores que fluctúan de 14 a 318 MP/100 ml.

Los resultados del balance iónico muestran, que en un menor número de análisis se tendría un error superior al 10 %; para las muestras restantes es menor al 10 %, por lo cual los datos utilizados son adecuados. Las especies acuosas que se pueden formar tanto en las aguas residuales como en las subterráneas son las mismas; solo que la concentración en el agua subterránea es mayor que en las aguas residuales de los canales. Este incremento en las concentraciones se debe principalmente a la recarga inducida. Las especies resultantes son de tipo bicarbonatado (cálcico-magnésico) y especies sulfatadas (sódico-magnésicas). Las fases minerales que pueden formarse son de tipo carbonatado (cálcico-magnésico) como es el caso de la calcita, aragonita y dolomita. Estas fases debido a su índice de saturación pueden precipitarse y ocasionar incrustación de carbonato de calcio o magnesio y con ello reducir el gasto en las tuberías de conducción. En caso de presentarse un aumento en la temperatura del agua, el índice de saturación de las fases minerales cambia; por lo que aquellas que pueden presentar problemas de precipitación pueden equilibrarse, o bien diluirse (Custodio y Llamas, 1983).

3.11. Tratamiento no convencional de las aguas residuales

Parte de las aguas residuales que entran a la cuenca, pasan por un sistema de presas de sedimentación y derivación mejorando su calidad, como se muestra en la Figura 3.6. Este proceso es proporcional a un tratamiento parcial, en el cual los efluentes de las presas tienen un tiempo de retención de 1-7 meses, dependiendo de la época del año, de acuerdo con la Norma OMS (1996) para riego restringido. El agua de los ríos esencialmente es agua residual parcialmente tratada. Estas aguas presentan altas concentraciones de detergentes, grasas, aceites y metales trazas, que inciden sobre los suelos. Sin embargo, las aguas residuales utilizadas cumplen generalmente con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Méndez, 1992; BGS y CONAGUA, 1998).

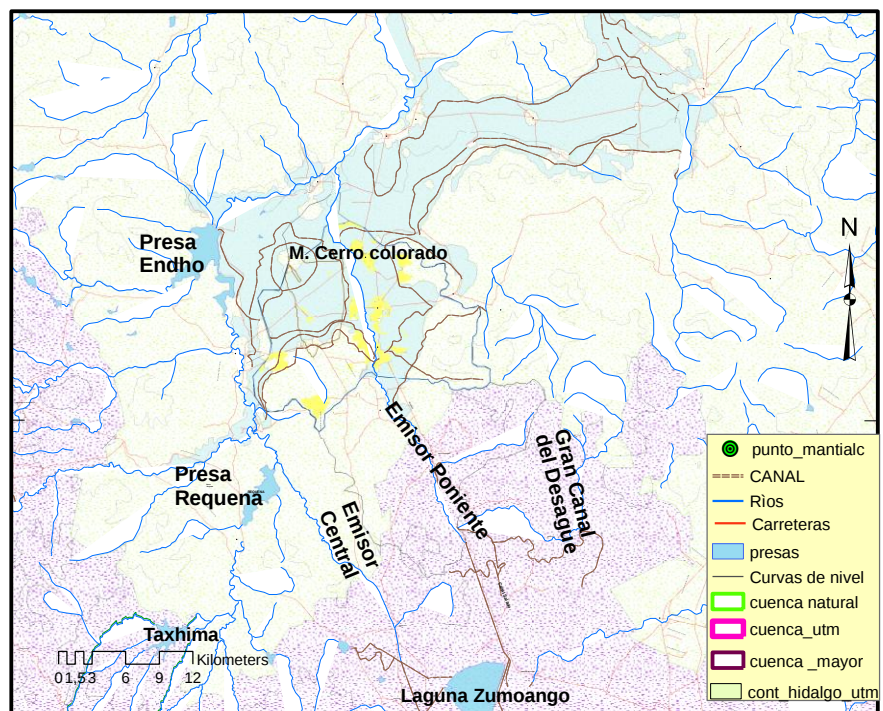


Figura 3.6 Localización del sistema de drenaje de la ciudad de México y el distrito de riego del Valle de Tula, Hgo. (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología aplicada para lograr los objetivos planteados.

4.1. Balance hídrico superficial y subterráneo

La primera etapa en este trabajo de investigación, consistió en cuantificar los componentes de los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos de la subcuenca de Cerro Colorado, mediante los métodos y técnicas propuestos por Aparicio *et al.* (2006).

4.1.1. Procesos superficiales

La evaluación del balance superficial partió de la ecuación de continuidad, expresada como:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = E - S \quad (4.1)$$

Dónde: ΔV es la variación del volumen, Δt es un intervalo de tiempo, E son las entradas de agua a la cuenca y S son las salidas.

Tomando como plano de referencia la superficie, la variación del volumen se planteó con la siguiente expresión:

$$\Delta V = C_p + A_r + R_e + I_m - (A_b + U + E_v + E_T + E_x) \quad (4.2)$$

Dónde: ΔV es la variación de volumen, C_p es el escurrimiento natural en la propia cuenca, A_r es el escurrimiento aguas arriba, R_e son los retornos de agua, I_m son las importaciones de cuencas vecinas, A_b es el escurrimiento a la salida de la cuenca (aguas abajo), U son los usos del agua, E_v es la evaporación en cuerpos de agua, E_T evapotranspiración y E_x son las exportaciones hacia cuencas vecinas. Todas estas variables son volúmenes de agua, expresadas en Millones de metros cúbicos (Mm^3) y el intervalo de tiempo es de un año.

Para obtener cada una de las variables anteriores se realizaron los procedimientos descritos a continuación:

Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración es la conjunción de dos procesos: la evaporación y la transpiración. La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas transfieren agua a la atmósfera y toman agua del suelo a través de sus raíces; una pequeña parte es para su nutrición y el resto lo transpiran (Campos, 1998).

Existen numerosas fórmulas, teóricas o semiempíricas, y procedimientos de cálculo para estimar la evapotranspiración considerando parámetros climatológicos, agrícolas e hidrológicos. En esta investigación, se aplicó el método de Turc (Sánchez *et al.*, 1987), definido mediante la expresión siguiente:

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9} + \left(\frac{P}{L}\right)} \text{ válida para } P > 0.31L \quad (4.3)$$

Dónde: ET es la evapotranspiración real en mm/año y P es la precipitación media anual, mm/año. L se evalúa como:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (4.4)$$

Donde, T es la temperatura media anual en °C

Para obtener la precipitación y temperatura media anual en la subcuenca de Cerro Colorado, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se recopilaron los datos mensuales y anuales de precipitación y temperatura registrados en las estaciones climatológicas ubicadas dentro de la subcuenca y zonas aledañas. De forma preliminar, se seleccionaron las estaciones con un periodo mínimo de 10 años de datos continuos.
- Se eliminaron las estaciones que no cumplen con un período de registro común (1980-2010) y las que presentaron inconsistencias debido a una mala medición o errores en la captura de los registros. Tales inconsistencias se evaluaron mediante el método del U.S. Nacional Weather Service (Campos, 1998).
- Se descartaron las estaciones sin influencia en la subcuenca, de acuerdo con el criterio de los polígonos de Thiessen; el cual, consiste en obtener el área de influencia de cada una de las estaciones climatológicas (Campos, 1998).
- Se dividió el área parcial de cada polígono de Thiessen, entre el área total de la cuenca y se obtuvo un factor de ponderación que al multiplicarlo por la temperatura y lámina de lluvia media de la estación correspondiente, permitió calcular la aportación de cada estación climatológica. La suma de cada aportación correspondió al valor de la lluvia y temperatura anual de la cuenca. Los valores obtenidos fueron sustituidos en la expresión (3) para estimar la evapotranspiración.

Evaporación en cuerpos de agua (EV).

Dentro del área estudios no se tienen cuerpos de almacenamiento de agua importantes, por esta razón no se consideró el cálculo de esta variable en el balance.

Usos del agua (U).

Los detalles sobre cómo se calcularon los consumos en la cuenca son los siguientes:

- **Uso doméstico**

En este uso se incluyeron los usos: doméstico, público urbano y servicios múltiples; los cuales se estimaron mediante dotaciones, que corresponden a la cantidad de agua necesaria para una determinada actividad. Los datos utilizados se obtuvieron del REPDA (Registro del Padrón de Usuario del Agua) editado por la Comisión Nacional del Agua para los años 2006 y 2007. La dotación respectiva, fue seleccionada de la Tabla 4.1.

- **Uso industrial**

El volumen de consumo industrial se estimó con los volúmenes extraídos y descargados por cada tipo de industria. El volumen de consumo fue la diferencia del volumen extraído menos el volumen descargado según el reportado por el (REPDA, CONAGUA 2007).

- **Uso agrícola**

El agrícola es uno de los sectores más relevantes en cuanto a consumo de agua. El volumen anual extraído para los cultivos regados en la zona agrícola de la cuenca, se estimó como la diferencia del agua requerida por la planta (uso consuntivo), menos la lluvia efectiva, considerada ésta como un porcentaje de la lluvia media anual.

Tabla 4.1 Dotaciones en litros/ habitante/ día para la estimación de los volúmenes del uso doméstico (Custodio y Llamas, 1983)

Población con agua entubada ·# ha.	Clima cálido	Clima templado	Clima frío
De 2,500 o menos	125	100	75
De 2,500 a 15,000	175	150	125
De 5,000 a 30,000	200	175	150
De 30,000 a 70,000	225	200	175
De 70,000 a 150,000	275	250	225
De 150,000 a 500,000	350	300	250
De 500,000 o más	400	350	300
Habitantes con servicio de hidrante público	60 litros/ habitante /día		
Habitantes con otro tipo de servicios (pipas, acarreo etc.)	40 litros/ habitante /día		

- **Uso pecuario**

Para estimar los volúmenes de consumo se utilizaron las dotaciones en función del número de cabezas de ganado, obtenidas de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Dotaciones para la estimación de los volúmenes del uso pecuario

Dotaciones en litros / cabeza de ganado / día	
Ganado mayor a 80kg	40
Ganado menor	30
Por cada 100 aves	15 o un tercio del consumo de ganado mayor

SRH, 1975 y datos reportados por el REPDA (Can, 2007).

Una vez que se estimaron los consumos para los diferentes usos, se compararon los volúmenes obtenidos por los estudios, Geocalli (1981) y la S.A.R.H. (1991). De aquí se tomaron en cuenta los volúmenes reportados como punto de partida en comparación con los calculados en el presente estudio.

Retornos de agua (Re)

Se consideraron los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua. En la Tabla 4.3 se presentan los porcentajes utilizados.

Tabla 4.3. Porcentajes de retornos (Aparicio *et al.*, 2006)

Uso del agua	Rango %
Urbano	70-80
Agrícola	5-15
Industrial	50-60
Pecuario	5-15
Acuícola	80-90

Para estimar las pérdidas en las redes de agua potable, se consideró que estas corresponden alrededor del 30 % del volumen abastecido.

Escurrimiento aguas arriba (Ar)

El escurrimiento aguas arriba se estimó como el volumen medio registrado en la estación “Salida Túnel Nuevo”.

Escurrimiento agua abajo (Ab)

Este volumen se estimó a partir de los datos escurrimientos registrados en la estación “Tezontepec” ubicada en la salida de la subcuenca.

Importaciones y exportaciones (Im, Ex)

Se tomaron en cuenta las importaciones y exportaciones entre subcuencas hidrológicas. Se consideró la interacción existente entre subcuencas por canales, tributarios y conductos artificiales.

Volumen de escurrimiento virgen por cuenca propia (Cp)

Este parámetro caracteriza al potencial de los recursos hídricos superficiales en la cuenca. En el caso del Manantial Cerro Colorado, se utilizaron los datos hidrométricos registrados en las estaciones “Salida Túnel Nuevo” y “Tezontepec” (Figura 3.2), a partir de los cuales se obtuvo un coeficiente de escurrimiento regional. El volumen de escurrimiento virgen por cuenca propia se calculó con la expresión (4.5).

$$C_p = C_e * A * P \quad (4.5)$$

Dónde: C_p es el volumen de escurrimiento virgen por cuenca propia en Mm^3 , C_e es el coeficiente de escurrimiento, P es la precipitación media mensual en m y A es el área de la cuenca en m^2 .

El coeficiente de escurrimiento se estimó con las siguientes fórmulas:

$$c_e = \frac{K(P-250)}{2000} \quad \text{si } K \leq 0.15 \quad (4.6)$$

$$c_e = \frac{K(P-250)}{2000} - \frac{K-0.15}{1.5} \quad \text{si } K > 0.15 \quad (4.7)$$

Donde: K , es un parámetro que depende del tipo y uso del suelo y P , es la precipitación anual o mensual en mm.

4.1.2. Procesos subterráneos

Un balance hidrogeológico tiene como fundamento la ecuación de continuidad, en la que se establece que la diferencia entre las salidas y las entradas de masa en un tiempo determinado son iguales al cambio de almacenamiento del volumen de control:

$$I + R_i + E_s - E_{Tz} - S_m - B = \Delta V \quad (4.8)$$

Dónde: I es la infiltración + recarga de agua de lluvia; R_i , es la recarga inducida: retornos de riego, fugas en los sistemas de abastecimiento de agua de las zonas urbanas y aporte de agua por las arcillas; E_s , son las entradas de agua al sistema por flujo lateral subterráneo proveniente de las fronteras de la zona de balance y por otros acuíferos; ET_z , es la evapotranspiración de la zona saturada; S_m , es la salida de agua por manantiales; B , es la extracción de agua subterránea por bombeo y ΔV , es el cambio en el volumen almacenado en el área y en el tiempo estipulado de balance. Todas las variables son volúmenes de agua expresadas en Mm^3 .

Infiltración y recarga de lluvia (I).

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra, la función determinante es la permeabilidad intrínseca del medio. Esta parte del agua está disponible para ser transpirada por las plantas en la franja de penetración de las raíces (franja radicular) o para ser evaporada por la acción de la energía solar sobre la superficie del terreno (Custodio y Llamas, 1983). La infiltración y la lluvia media anual se evaluaron para cada municipio en base a la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Capacidad de infiltración y porcentaje de lluvia infiltrada según el tipo de suelo, (Custodio y Llamas 1983)

Tipo de suelo	Capacidad (lámina de agua / hora) ^A		(% de lluvia) ^B
Andosol (T)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Cambisol (B)	Lenta	0.25 a 1.75 cm	8
Feozem (H)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Fluvisol (J)	Rápida	> 2.5 cm	15
Gleysol (G)	Muy lenta	< 0.25 cm	4
Histosol (O)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Litosol (Y)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Luvisol (L)	Lenta	0.25 a 1.75 cm	8
Planosol (W)	Lenta	0.25 a 1.75 cm	8
Regosol (R)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Solonchak (Z)	Muy lenta	< 0.25 cm	4
Vertisol (V)	Muy lenta	< 0.25 cm	4

Para cada municipio y localidad, se determinó el área y porcentaje, el tipo de roca. A cada tipo de roca se le asignó un valor de porosidad eficaz (Tabla 4.5), con base en la literatura inherente al tema. Tomando en cuenta los valores de porosidad eficaz de las rocas y el volumen de infiltración definido en cada municipio, se determinó el volumen de recarga para cada uno de ellos. Posteriormente, considerando el área de cada municipio ubicado en la superficie de control piezométrico del acuífero de estudio, se definió el volumen de recarga total.

Tabla 4.5 Valores de porosidad eficaz de algunas rocas, (Custodio y Llamas, 1983).

Roca Tipo	Clave	Porosidad Eficaz (%)
Cuaternario aluvión	Qal	35
Cuaternario lacustre	Ql	03
Cuaternario inferior volcánico	Qiv	30
Cuaternario inferior cono volcánico	Qivc	30
Cuaternario- Plietoceno andesíta	QPA	15
Cuaternario volcánico	Qv	35
Cuaternario cono volcánico	Qvc	35
Formación Tarango	T	18
Terciario medio volcánico	Tmv	10
Terciario - Oligoceno volcánico	Tov	10
Terciario - Plioceno domo cinerítico	Tpdc	07
Terciario – Plioceno lacustre	Tpl	03
Terciario - Plioceno volcánico	Tpv	08
Terciario – Cuaternario tobas.	TQt	12

Recarga inducida y artificial (Ri)

- **Retornos agrícolas**

El cultivo y manejo agrícola del suelo puede ejercer una gran influencia en la calidad de las aguas subterráneas y tiene una aportación muy importante en las tasas de recarga del acuífero. El cálculo de los retornos de riego se consideró como la diferencia entre el volumen abastecido y los requerimientos ideales de agua la eficiencia de utilización para los diferentes cultivos en la zona.

Del volumen determinado por esa diferencia, se estimó el porcentaje de agua que se puede infiltrar en cada tipo de suelo, de acuerdo con los valores de la Tabla 4.4. Del este volumen, se estimó un porcentaje de esa agua que puede recargar al acuífero, en función de los valores de porosidad eficaz de la roca, establecidos en la Tabla 4.5.

- **Fugas en los sistemas hidráulicos**

Estimaciones realizadas en México consideran que las fugas a través de los sistemas hidráulicos de las principales ciudades es de alrededor del 30% del volumen abastecido. Asimismo, se estima que el caudal a considerar dentro del tópico de “fugas”, como una posible recarga inducida al sistema acuífero, sería del orden de 40% provenientes de las redes de abastecimiento.

Para el caso de estudio, se consideró un valor de 40% ya que no se cuenta con mayor información para un cálculo más preciso (Aparicio *et al.*, 2006).

- **Recarga artificial**

La recarga artificial puede ser definida como el proceso mediante el cual se vuelve a llenar de agua el subsuelo mediante estructuras diseñadas específicamente para dicho fin (Custodio, 1986; Payne, 1995).

En el área de estudio no se cuenta con infraestructura dirigida a este fin, por lo cual en el balance solo se tomó en cuenta como recarga artificial la propiciada por el riego agrícola.

Flujo lateral subterráneo (Es)

Para estimar el flujo lateral, se partió de la Ley de Darcy; (1856 en Custodio y Llamas, 1983), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$q = -K \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right) \quad (4.9)$$

Dónde:

q es el caudal que circula por m² de la superficie, (Q/sección), K es la conductividad hidráulica. El signo negativo se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia las cargas “h” decrecientes

$$\left(\frac{\partial h}{\partial l} \right) \text{ Gradiente hidráulico} \quad (4.10)$$

El factor K, según Custodio y Llamas (1983) puede descomponerse, como:

$$K = k \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) \quad (4.11)$$

Dónde: k es la permeabilidad intrínseca del medio poroso, K es la permeabilidad de Darcy o conductividad hidráulica, γ es el peso específico del fluido y μ es la viscosidad del fluido

En el caso del agua, la salinidad apenas hace variar el peso específico y la viscosidad. Solamente habría que considerar la variación de la viscosidad con la temperatura, que se duplica entre 5 y 35°C, incrementando al doble la permeabilidad de Darcy, así como el caudal circulante por la sección considerada del medio poroso. Afortunadamente, las aguas subterráneas presentan mínimas diferencias de temperatura a lo largo del año en un mismo acuífero. K depende tanto del medio como del propio fluido, como la parte que depende del fluido normalmente es despreciable, para efectos prácticos se acepta que la K de Darcy o conductividad hidráulica, es una característica del medio poroso.

En algunas circunstancias, la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico no es lineal. Esto puede suceder cuando el valor de K es muy bajo o cuando las velocidades del flujo son muy altas. En el flujo subterráneo las velocidades son muy lentas y prácticamente siempre la relación es lineal, salvo en las proximidades de las captaciones de bombeo en ciertas condiciones.

Para el cálculo del flujo lateral subterráneo proveniente de las fronteras del acuífero en estudio, se aceptó para efectos prácticos que la conductividad hidráulica es una característica del medio poroso y que el caudal es directamente proporcional a la sección y al gradiente. La fórmula empleada fue:

$$Q = LiT \quad (4.12)$$

Dónde: L es el ancho de la celda por donde fluye el agua en m, establecida por dos curvas potenciales y dos líneas de flujo; i es el gradiente hidráulico, adimensional, definido por la diferencia entre dos cargas potenciométricas y la distancia entre ellas en una celda; T es la transmisividad en m^2/s , producto de la conductividad hidráulica K por el espesor b de la sección de una celda

En este sentido, para el acuífero se consideraron las isolíneas de elevación del nivel estático para el periodo de análisis. En ellas, se estableció una serie de celdas delimitadas entre las dos curvas potenciales limítrofes de la zona de balance y dos líneas de flujo. De esta manera se obtuvo el ancho para cada celda y el gradiente hidráulico. En cuanto a la transmisividad, se tomaron en cuenta los valores obtenidos por pruebas de bombeo realizadas por CONAGUA (2002).

Evaporación y evapotranspiración de las aguas subterráneas (ETz).

En el ámbito de la evaporación de las aguas subterráneas, se sabe que el recurso no alcanza nunca la atmósfera mediante un proceso de evaporación directa, a no ser que el

nivel freático de las formaciones acuíferas esté situado a muy pocos decímetros de la superficie del suelo. No obstante, el consumo de agua por parte de las plantas constituye un medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que la evaporación directa desde los acuíferos (Custodio y Llamas, 1983). Con el uso de las Tablas 4.6 y 4.7, se estimó el área de cultivada, la profundidad promedio de las raíces de los cultivos predominantes, los resultados obtenidos se multiplicaron por un porcentaje 12% de la lámina de agua equivalente a la fracción que genera la evaporación potencial medida en la estación climatológica.

Tabla 4.6 Profundidad efectiva para las raíces de las plantas (Campos, 1998).

Cultivos	Profundidad efectiva (cm)
Cebolla y lechuga.	30
Pasto, papa, frijol, col, espinaca y fresa.	60
Maíz dulce, betabel, chícharo, calabaza, zanahoria y chile.	90
Remolacha azucarera, camote, algodón, cítricos, frijol, lima y alcachofa.	120
Melón, lino, maíz y granos pequeños.	150
Alfalfa, espárragos, frutales, vid, lúpulo, zacate, sorgo y jitomate.	180

Tabla 4.7 Consumo de agua subterránea por algunas plantas en función de la profundidad del nivel freático (Custodio y Llamas, 1983).

Planta	Clima	Prof. Nivel Freático	Consumo de agua anual(mm)
Tamarisco	Frío – seco	1.23	2 700
Sauce	Cálido – seco	0.61	1 340
Chopo	Cálido – seco	2.20	2 380
Alfalfa	Frío – seco	0.91	800
	Cálido – seco	1.38	1300
Aliso	Cálido – seco	--	1620

En este sentido, tomando en cuenta el espesor efectivo de las raíces de cada cultivo señalado y el consumo de agua subterránea por algunas plantas, así como la profundidad del nivel estático en cada acuífero en estudio, se determinó la magnitud de la evapotranspiración del agua subterránea.

Descarga por manantiales(Sm)

Considerada como una salida natural del agua subterránea, de acuerdo con la información existente (aforos, calidad y relación hidrogeológica con el acuífero), el volumen aportado

por esta fuente, se estimó a partir de la información reportada por REPDA CONAGUA (2007).

Extracción por bombeo (B)

El bombeo de agua de pozos, representa normalmente el mayor volumen de las descargas de un acuífero, para satisfacer las demandas de los diversos sectores de usuarios establecidos en la zona. Para conocer el volumen extraído del acuífero por este concepto, regularmente se realiza un inventario de los pozos y norias existentes en la zona; en éste preferentemente deben consignarse tanto los datos constructivos, como los de uso y operación. En este caso, se consideraron los valores de los volúmenes concesionados reportados por el REPDA CONAGUA (2007), mostrados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Volumen de usos del agua (m³), REPDA 2007

Tramos	Volumen		Público urbano		Doméstico		Pecuario	
USO	Total por USO		Concesión	%	Concesión	%	Concesión	%
SUPERFICIAL	45,853,166.75		3,138,766.75	6.85		0		0.00
SUBTERRÁNEO	39,886,289.90		8,433,227.04	21.14	10,328.50	0.03	50,757.36	0.13
DESCARGAS	3,896,249.98		1,904,766.33	48.89	303,700.17	8	2,023.00	0.05.
TOTALES	89,635,706.63		13,476,760.12	0.15	314,028.67	0.003	1,041,311.00	7.73

Tramos	Agrícola		Servicios		Industrial		Agroindustrial	
USO	Concesión	%	Concesión	%	Concesión	%	Concesión	%
SUPERFICIAL	10,357,200.00	23.0		0.000	22,000,000.0	47.98		0.000
SUBTERRÁNEO	182,113.00	0.00	145,882.00	0.366	30,865,669.0	77.38	16,200.00	0.041
DESCARGAS		0.00	14,426.75	0.370	1,671,333.73	42.90		0.000
TOTALES	48,930,887.00	54.5	9,460.80	0.011	54,537,002.7	60.84	16,200.00	0.018

Cambio de almacenamiento (ΔV).

Como se mencionó anteriormente, el balance hidrológico de un acuífero puede ser expresado de manera semejante al principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad. Para un intervalo de tiempo determinado la ecuación de continuidad se expresa en la forma:

$$E - S = \Delta V \quad (4.13)$$

Dónde: E son las entradas de agua al acuífero, S son las salidas de agua del acuífero y ΔV es el cambio de almacenamiento en el acuífero. Todas las variables son volúmenes de agua expresadas en hm³.

Si las entradas son mayores que las salidas se almacena agua en el acuífero y por lo tanto ΔV tiene su signo positivo. Si las salidas son de mayor magnitud que las entradas, se mina el acuífero y ΔV toma el signo negativo. El cambio en el almacenamiento en un acuífero para un intervalo de tiempo Δt determinado se calcula, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta V = S A \Delta h \quad (4.14)$$

Dónde: S es el coeficiente de almacenamiento, adimensional; A es el área del acuífero en m^2 y Δh es la variación de la carga hidráulica en m. La variación de la carga hidráulica para el periodo de análisis se estimó a través de la evolución del nivel estático en ese periodo. En tanto, el área del acuífero, se definió por la superficie de control piezométrico establecida. Los valores del coeficiente de almacenamiento (S), la transmisividad (T) y la conductividad hidráulica (K_c), se tomaron de los estudios realizados por CFE (1997) y CONAGUA (2002), los cuales fueron medidos por pruebas de bombeo y tipo de litología del acuífero, ponderándolos para el área de estudio, con base en los valores reportados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 valores de transmisividad, conductividad hidráulica y coef. de almacenamiento CFE (1997) y CONAGUA (2002).

POZO	MUNICIPIO	Unida	Kh(m/s)	Kv(m/s)	Sc	Sy	T(m^2/d)
		Litológic a					
CFE-II-02	Tula	Tpt	5.8×10^{-5}	1.2×10^{-5}	2×10^{-5}	0.15	1391.04
Bojay-02	Bojay	Tpt-Tpal	2.3×10^{-5}	5.8×10^{-6}	2×10^{-3}	0.15	150.33
			5.8×10^{-5}	1.5×10^{-5}	5×10^{-4}		
CFE-07	Tlahuelilpan	Tpt	5.4×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2×10^{-2}	0.16	15811.2

Una vez que fueron estimadas todas las variables subterráneas, utilizando un intervalo de tiempo anual, se realizó una desagregación mensual, considerando la distribución de la lluvia mensual para la salida de agua de manantiales y las entradas de agua al sistema por flujo lateral, la distribución de la evapotranspiración superficial para la evapotranspiración de la zona saturada y la distribución de los usos para la distribución de la extracción por bombeo.

4.1.3. Balance integrado

Finalmente, se hizo una integración de variables superficiales y subterráneas, con el fin de obtener la variación de volumen en toda la cuenca de estudio. La ecuación de integración fue se define por la expresión (4.15).

$$\Delta V = (VII + Ar + Im + Re + Sm + B) - (Ev + ET + Ab + Ex + U + f + In) \quad (4.15)$$

Dónde: ΔV es la variación de volumen en la cuenca, VII es el volumen de lluvia, Ar es el escurrimiento aguas arriba, Im son las importaciones de cuencas vecinas, Re son los retornos de agua, Sm son las salidas de agua por manantiales, B son las extracciones por bombeo dentro de la cuenca, Ev es la evaporación en cuerpos de agua, ET es la evapotranspiración, Ab es el escurrimiento aguas abajo, Ex son las exportaciones hacia cuencas vecinas, U son los usos del agua (superficial y subterráneo), F son las pérdidas en redes de agua potable (fugas) y In es Infiltración de lluvia. Todas las variables son volúmenes de agua y expresadas en hm^3 .

4.1.4. Variabilidad e incertidumbre de los componentes del balance hídrico.

Se llevó a cabo un análisis de variabilidad de los componentes de la ecuación de balance, considerando éstos como variables aleatorias en el tiempo y en el espacio.

Cada componente del balance tuvo su propia distribución de probabilidad; de esta forma se puede afirmar que las medidas de dispersión de una muestra de valores (varianza, desviación estándar, el rango y el coeficiente de variación) serán prácticamente las mismas que la dispersión que presente la población de dichos eventos.

Con el fin de expresar la variabilidad, se estimaron las medidas de tendencia central tradicionales como son: la moda, la mediana, la media, con la variabilidad de cada componente de la ecuación de balance, respecto a sus varianzas y a su mediana.

4.2. Caracterización de los suelos

La determinación de los parámetros hidráulicos en suelos de texturas arcillosas exige la selección de técnicas especiales que se adecuen a esas condiciones. Por ello, la conductividad hidráulica en la zona no saturada de los suelos de la parcela se determinó con la ayuda de un permeámetro Guelph modelo 2800K1 (Figura 4.1).

El Permeámetro Guelph es un instrumento fácil de usar, sirve para medir con precisión y rapidez la conductividad hidráulica en los suelos. Se puede efectuar una evaluación precisa de la conductividad hidráulica, absorción y matriz potencial de flujo en todo tipo de estos.



Figura 4.1 Permeámetro Guelph modelo 2800K1(fotografías tomada por Becerril 2009)

Para poder determinar la conductividad hidráulica (k_{fs}) del suelo, se realizó primero la apertura de un orificio donde el permeámetro mantuvo una carga hidráulica (H) constante (Figura 4.2). En cuanto el agua del reservorio fluyó a través del suelo, la columna de agua descendió y el dispositivo mantuvo estable la altura H . La velocidad de descenso, se observó y registró a través de una escala graduada (0.1 cm), en el tubo de Mariotte. Una vez que las velocidades de descenso se estabilizaron, se obtuvieron los últimos tres valores constantes, cuando las diferencias fueron menores al 5%. Así se obtuvo la razón de cambio del volumen de agua que fluye a través del suelo en estado de saturación, según (Delfino *et al.*, 1996).

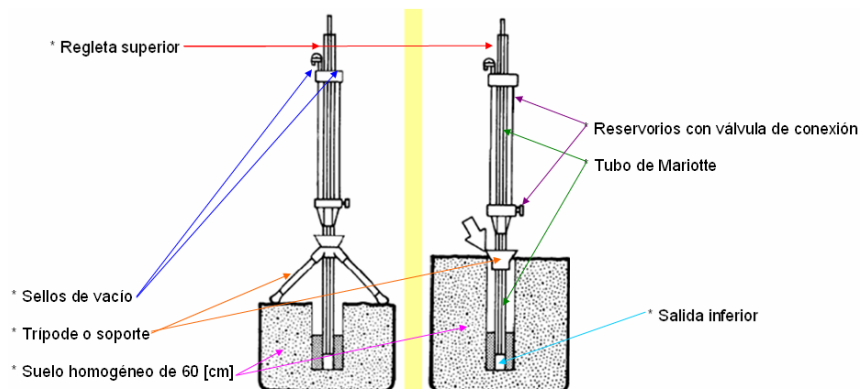


Figura 4.2. Instalación y medición con permeámetro Guelph (Daniel y Cristóbal, 2006).

En los puntos de medición seleccionados, se realizaron varias mediciones con diferentes cargas hidráulicas, así las mediciones se realizaron a 20,60 80 y 120 cm de profundidad con cargas de 5 y 10 cm respectivamente. Con la finalidad de conocer la infiltración en el contacto de las capas de menor permeabilidad. El cálculo de la kfs para cada punto se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Kfs=(0.0041)(X)(R2)-(0.0054)(X)(R1) \quad (4.16)$$

Donde:

Kfs, es la conductividad hidráulica del suelo, en cm/s; R1, es la RTASA DE CAMBIO/60, en cm/s y representa la 1er. carga hidráulica a 5 cm; R2, es la RTASA DE CAMBIO/60, en cm/s y representa la 2da. Carga hidráulica a 10 cm, y X, es la constante del reservorio (35.39 cm²).

La descripción de los puntos de muestreo de suelos seleccionados se describe en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Descripción de los puntos de muestreo de suelo seleccionados

Identificación	Localidad/zona	Antigüedad	Zona
T. aledaños al pozo 9 de CFE	Tlahuelilpan	40-60	2
T. aledaños al pozo 11 de CFE	Tlahuelilpan	40-60	2
T. aledaños al pozo San Primitivo	Tlahuelilpan	100	2
T. aguas abajo del M. Cerro Colorado. Propietario: Sr. Justino Mota Angulo	El Tanque, Tezontepec	90	2
T. aledaños al canal Salto-Tiamaco. Propietario: Sr. Fernando Meza	Dendho, Tlaxcoapa	10	1
T. Sr. Macario (parte alta)	Tlaiminulpa (cercano al Rancho Chelita)	40-60	1
T. aledaños al pozo CIC 126	Ejido El Arenal (Actopan)	30-40	3
T. del Sr. Lino Reyes Vargas	El Arenal (Actopan)	10	3

4.3. Caracterización del agua de la zona vadosa y subterránea

La instalación de piezómetros en la zona de estudio, permitió determinar los principales parámetros fisicoquímicos del agua (pH, T, iones mayores y conductividad eléctrica), con la finalidad de determinar la calidad de agua subterránea, el comportamiento de flujo subterráneo y la amplitud del área de recarga del Manantial Cerro Colorado. A partir de estas mediciones se evaluó el comportamiento del acuífero con respecto a los iones mayores así como la validación de los planos de vulnerabilidad. Las perforaciones se realizaron con un equipo manual de extracción de núcleos de 3 in, con extensiones de 1.5 m, para un máximo de 5 m de profundidad (Figura 5.7 c).

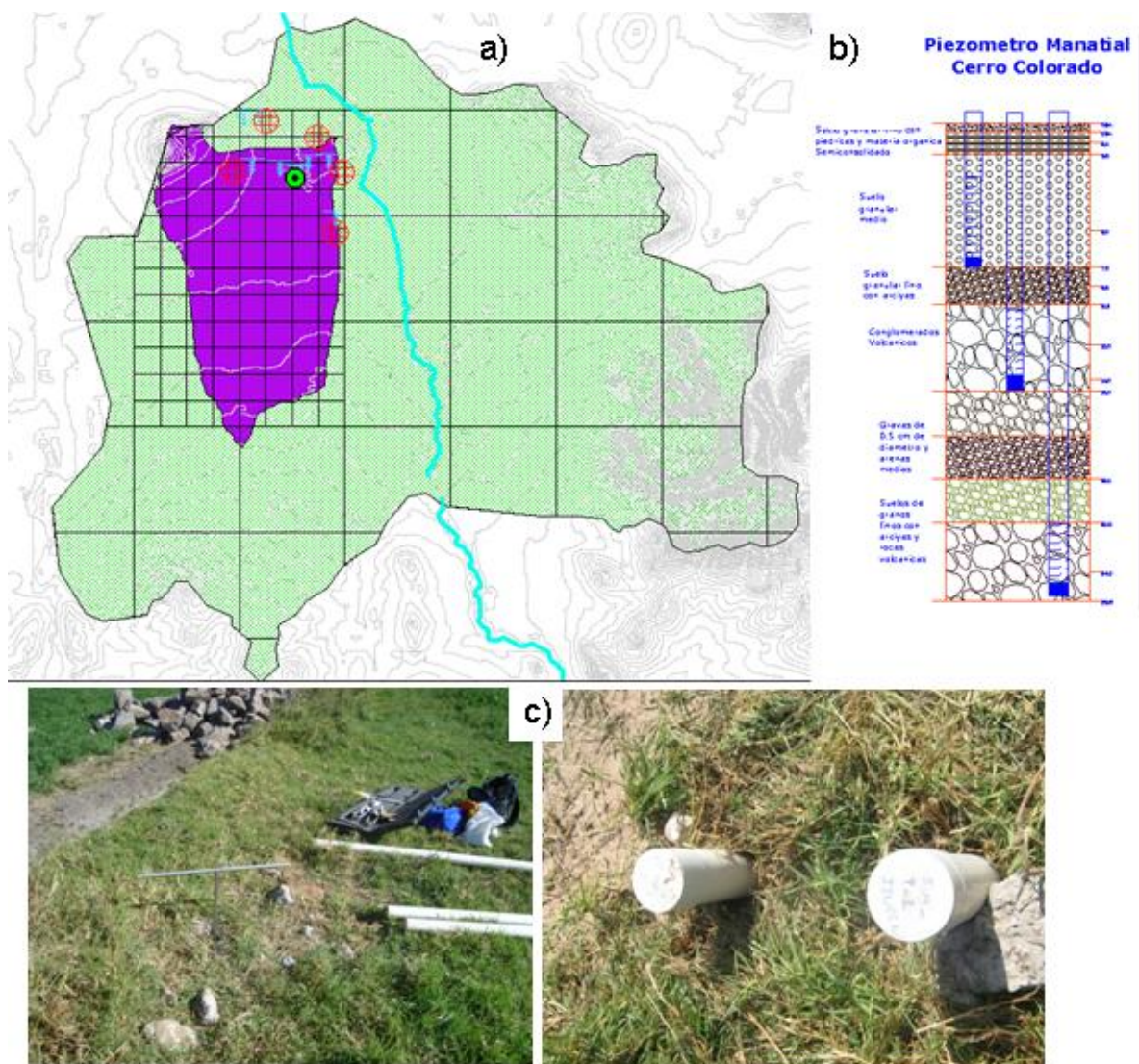


Figura 4.3 a) Ubicación espacial de piezómetros, b) Colocación de piezómetros y c) Perforación e instalación de piezómetros en la zona de estudio (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

La ubicación de los piezómetros se realizó como se muestra en las Figuras 4.3b y 4.3a.

Para la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea, se llevó a cabo muestreo, en el que se tomaron dos muestras en cada aprovechamiento de agua. Los sitios muestreados incluyeron pozos, norias y manantiales. En campo se determinaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, temperatura, pH, oxígeno disuelto y alcalinidad.

La caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea, permite ver los aspectos de los diferentes fenómenos modificadores y su influencia en la composición, transformación y estado de los diferentes compuestos que constituyen los iones del agua subterránea. Además por medio de la hidrogeoquímica se puede conocer de manera cuantitativa el funcionamiento de los acuíferos y la calidad de los mismos. La composición química del agua está relacionada con el funcionamiento general del acuífero, ya que la concentración de los elementos depende del tipo de material que atraviesa, la porosidad y permeabilidad del mismo, así como el tiempo de residencia y longitud de recorrido. El comportamiento hidrogeoquímico de los acuíferos se puede alterar cuando la recarga presenta compuestos orgánicos, desechos industriales, sales minerales etc.

Después de ordenar clasificar los datos obtenidos, se hizo la conversión de (mg/L) a (meq/L), para esto se tomaron los pesos atómicos de los iones (expresión 4.17). Posteriormente, se realizó la sumatoria de los aniones y cationes, se estimó el balance iónico y el error correspondiente en porcentaje (4.18).

$$\dots\dots\dots \cdot \frac{meq}{L} = \frac{ion * ind}{PM} \quad (4.17)$$

$$\text{Error del balance iónico EBI \%} = \frac{\Sigma cationes meq - \Sigma aniones meq}{1 \Sigma cationes meq + \Sigma aniones meq} * 100\% \quad (4.18)$$

Para poder identificar los componentes del balance iónico que más influyen en el comportamiento de la geoquímica del agua de la zona del Cerro Colorado, se obtuvo el porcentaje de cada componente del balance iónico.

De acuerdo a la expresión 4.18, se considera aceptable un EBI entre -10 y +10 % para aguas, según los estándares industriales.

4.4. Caracterización geofísica

El equipo empleado en el estudio fue un resistivímetro de la marca Iris, modelo Syscal R1 Plus (Figura 4.4) cuyas especificaciones son las que a continuación se muestran:

Transmisor:

Resolución: 10μA

Precisión: 0.3 %

Máxima salida de corriente: 2.5 A

Máxima salida de voltaje: 600 V

Máxima salida de potencia : 200 W

Duración del pulso: 0.5 s, 1 s y 2 s

Receptor:

Resolución: 1 μ V

Convertidor A/D: 20 Bit

Precisión: 0.3 %

Impedancia de salida: 10 Mohms

Rango de salida de voltaje: ± 10 V

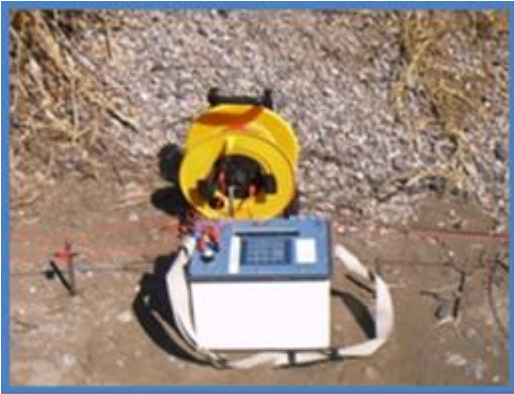


Figura 4 4 Equipo Syscal R1 Plus, utilizado durante el levantamiento de datos geofísico.

Se realizaron 10 SEV con aperturas máximas entre los electrodos AB/2 de 100 metros, utilizando un arreglo Schlumberger para lograr una profundidad teórica de investigación de 30, 50 metros figura 4.4.

Para el caso de la georeferenciación de cada uno de los sondeos, además de los pozos, se utilizó un GPS Autónomo de la marca Garmin®, con la opción habilitada WAAS (Wide Area Augmentation System) logrando mejorar notablemente la precisión.

4.5. Evaluación de vulnerabilidad de acuíferos

La vulnerabilidad del acuífero depende principalmente de la accesibilidad del soluto y capacidad de atenuación de la zona no saturada, que se define como la atenuación del medio y puede ser el resultado de su actividad bacteriológica, retención física y reacción química con los contaminantes. Ésta sensibilidad se relaciona además, con factores asociados a la fuente contaminante en el subsuelo como: a) modo de disposición del contaminante en el subsuelo y en particular de la cantidad de carga hidráulica asociada y b) la clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia (Foster e Hirata, 1991).

En este trabajo de investigación se evaluó la vulnerabilidad intrínseca en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado, la cual se refiere al riesgo potencial de contaminación del agua subterránea generada por actividades humanas y es independiente de la naturaleza del contaminante.

Se realizó una recopilación y análisis de la bibliografía para integrar la información existente del área de estudio sobre temas como la geología e hidrogeología, se evaluaron las de fuentes potenciales de puntos de muestreos, verificando su ubicación de pozos, norias, manantiales y canales.

Con esta información recopilada se integró una base de datos que contiene las coordenadas, datos de la profundidad del nivel estático, cortes litológicos y datos geoquímicos de los puntos de muestreo, de igual manera se establecieron los tipos de suelos y composición así como sus parámetros hidráulicos.

Tras evaluar la información obtenida se llegó a la conclusión de que el método DRASTIC sería el adecuado para determinar la vulnerabilidad del acuífero del Manantial Cerro Colorado, ya que resulta ser el más robusto sin que la obtención de información se convierta en un impedimento para su procesamiento.

En el procesamiento de la información recopilada se utilizó el paquete de computo ArcGIS 10, en el que se crearon las distintas capas que dieron origen al índice DRASTIC. El parámetro D (profundidad al nivel estático) se configuró a partir de datos tomados en campo y reportados por BGS y CONAGUA (1998). Para la estimación de R (recarga) se utilizó información climatológica reportada por CONAGUA (2007) aplicada al método de Turc. La cuantificación de A (litología del acuífero) así como de I (litología de la zona vadosa) se obtuvo utilizando la información proveniente de los cortes litológicos proporcionados por BGS y CONAGUA (1998) y los obtenidos por los métodos geofísicos. El parámetro S (tipo de suelo) fue configurado con datos obtenidos de la carta de suelos INEGI y los descritos en campo. La T (topografía) se generó con la ayuda de un modelo digital de elevaciones editado por INEGI, y por último, el parámetro C (conductividad hidráulica) se generó con datos calculados en campo y reportados por BGS y CONAGUA (1998). La cuantificación de cada uno de estos parámetros se describe a más detalle en los siguientes apartados.

4.5.1. Profundidad del nivel estático (D)

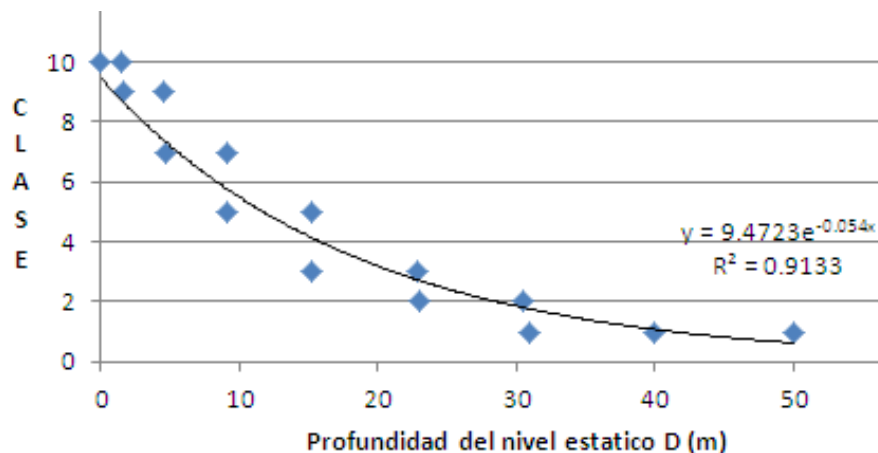
La profundidad del nivel estático, puede presentar variaciones tanto temporales como espaciales, los cambios laterales pueden ser abruptos debido a la presencia de conos de abatimiento y estructuras geológicas que cambian la conductividad hidráulica, reduciendo las condiciones de fronteras entre acuíferos. La profundidad en algunos sitios llega a ser tan importante que traducida a índices de vulnerabilidad pueden variar considerablemente.

Debido a que en México se tienen evidencias de contaminación del acuífero a profundidades mayores a los 30.5 m (Ramos, 2007; Hirata y Reboucas, 1999), se consideró conveniente realizar un ajuste de este parámetro para profundidades del nivel estático de hasta 40 m, mediante la modificación del método DRASTIC original (Aller *et al.*, 1987) adaptándolo al caso de estudio como se describe enseguida:

Se ordenaron los datos recopilados para cada punto de muestreo y se aplicó directamente la metodología convencional, los parámetros de la profundidad del nivel estático se ajustaron como se muestra en la Gráfica 4.1 y se obtuvo la ecuación (4.19) de la línea de tendencia.

$$y = 9.4723e^{-0.054x} \quad R^2 = 0.9133 \quad (4.19)$$

En la Tabla 4.11 se presenta la escala de valores considerada para la profundidad del agua subterránea en la zona de estudio; el peso de importancia (Dw) en DRASTIC de este parámetro fue de 5 puntos (Aller *et al.*, 1985).



Grafica 4.1 ajuste del parámetro D (profundidad del nivel estático)

Tabla 4.11 Valores DRASTIC para la Profundidad (Aller et al. 1985)

Parámetro	Intervalo (ft)	Intervalo (original) (m)	Intervalo (modificado) (m)	clase
PROFUNDIDAD DEL AGUA DW = 5	0-5	0-1,5	0-0.5	10
	5-15	1.5 - 4.6	0.5-3.3	9.3
	15-30	4.6 - 9.1	3.3-6.6	7.8
	30-50	9.1-15.2	6.6-9.5	6.8
	50-75	15.2 - 22.9	9.5-10.5	6.5
	75-100	22.9 - 30.5	10.5-14.7	5.2
	> 100	> 30.5	> 14.7	3.6

4.5.2. Recarga neta (R)

La recarga neta es la cantidad de agua por unidad de área del suelo que se percola al acuífero. Este es el principal vehículo que transporta al contaminante al agua subterránea. A mayor recarga habrá más oportunidad de que el contaminante sea transportado al agua subterránea. La recarga neta también llamada precipitación eficaz, depende de la precipitación y de la evapotranspiración real (Aller *et al.*, 1985; Civita y De Maío, 1997) y se define mediante la expresión (4.20).

$$RN = P - Er \left(\frac{mm}{año} \right) \quad (4.20)$$

Donde:

RN es la recarga neta (mm) P es la precipitación media anual (mm) y Er es la evapotranspiración real anual (mm), la evapotranspiración real se evalúa con la ecuación de Turc descrito en el marco teórico, el cual ésta en función de la temperatura y la precipitación.

El rango de valores obtenido se ponderó de acuerdo a la Tabla 4.12 la cual contiene los intervalos y la clase o valor ponderado de la recarga neta. El índice (Rw) de DRASTIC fue de 4 puntos (Aller *et al.*, 1987).

Tabla 4.12. Evaluación del factor de recarga neta en el DRASTIC (Aller *et al.*, 1987)

Parámetro	Intervalo (m)	(mm)	Clase
Recarga neta $Rw=4$	0-2	0-20	1
	2-4	20-27.2	3
	4-7	27.2-36.3	6
	7-10	36.3-40.6	7
	>10	40.6-45.0	8
		>71.8	9

La recarga neta considerada en el método DRASTIC se estimó como la diferencia entre la precipitación media anual y la evapotranspiración real, esta diferencia es lo que se supone se infiltra al acuífero. Posteriormente se creó la base del mapa de vulnerabilidad de *R* (recarga neta).

4.5.3. Medio acuífero (A)

El método original fue pensado para un medio homogéneo; sin embargo, en muchos escenarios es común encontrar interdigitación o estratificación de diferentes materiales. La Tabla 4.13 muestra el esquema de intervalos considerado para la evaluación del medio acuífero. Al considerar el método original de (Aller et al., 1987) se encontró que se requería un ajuste, para el cual la litológica de los puntos de muestreo se ajustó en función de: la proporción de arenas, arcillas, basaltos etc.; el grado de compactación, la granulometría característica del medio acuífero y la ubicación del nivel estático que indicó el nivel de saturación. El peso de importancia para este factor en el índice (*Aw*) de DRASTIC fue de 3 puntos.

Tabla 4.13. Evaluación del factor del medio acuífero en el DRASTIC (Aller et al., 1987)

Parámetro	Tipo de Material	Clase
Medio Acuifero $A_w=3$	Lutita masiva	1-3
	Ígnea/metamórfica	2-5
	Ígnea/metamórfica	3-5
	Trill glacial	4-6
	Arenisca estratificada,	5-9
	Arenisca masiva	4-9
	Caliza masiva	4-9
	Arena y grava	4-9
	Basaltos	2-10
	Caliza kárstica	9-10

4.5.4. Tipo de suelo

Se considera como suelo, al material no consolidado localizado a poca profundidad del terreno (1-2 m), contiene la materia orgánica y alimenta la cobertura vegetal (Boulding, 1995). El estado físico del suelo juega un papel muy importante en el transporte de una sustancia. En su interacción con el suelo, una sustancia contaminante puede sufrir procesos de retardación, dilución y en casos especiales su eliminación (Wilson, 1991; Foster e Hirata, 1991).

Para este parámetro se consideraron los suelos predominantes en la superficie de la región de estudio los cuales se caracterizaron mediante información tomada en campo que se complementó con la cartografía edafológica editada por INEGI. Se determinó que la distribución de los suelos en el área de estudio se adecua la metodología DRASTIC original (Aller *et al.*, 1987). La información utilizada para la evaluación de tipo de suelo se encuentra en la Tabla 4.14. El peso de importancia (S_w) en el DRASTIC fue de 2 puntos (Aller *et al.*, 1985).

Tabla 4.14 Evaluación del factor del tipo de suelo en DRASTIC (Aller *et al.*, 1985)

Parámetro	Material	Clase
TIPO DE SUELO $S_w=2$	Fino o ausente	10
	Grava	10
	Arena	9
	Agregado arcilloso comprimido	7
	Arenisca marga	6
	Marga	5
	Limo margoso	4
	Arcilla margosa	3
	Arcillas no agregadas y material no	1

4.5.5. Gradiente topográfico

La pendiente del terreno influye sobre el escurrimiento superficial del agua y sustancias potencialmente contaminantes, debido a que a menor pendiente topográfica mayor posibilidad existe que el agua superficial o alguna sustancia contaminante se infiltre al subsuelo (Aller *et al.*, 1987; Wilson, 1991). En zonas topográficamente abruptas las diferencias en gradientes topográficos se reflejan fácilmente en los índices de vulnerabilidad; la pendiente llega ser constante hacia los valles y presenta cambios muy importantes en las laderas. Para el cálculo de este parámetro se utilizaron Modelos Digitales de Elevación (DEM), que constituyen una representación digital de los valores de elevación de la superficie de la tierra en intervalos horizontales espaciados regularmente. Para este caso se utilizó un arreglo reticular de 90x90m, con esta resolución espacial se obtuvieron buenas configuraciones que se ajustaron a la metodología.

La Tabla 4.15 muestra los intervalos de valores para topografía utilizados. El peso de importancia (T_w) para este factor en el DRASTIC fue de 1 punto (Aller *et al.*, 1985).

Tabla 4.15. Evaluación de topografía en el DRASTIC (Aller *et al.*, 1985).

Parámetro	Intervalo (% pendiente)	Clase
Topografía $T_w=1$	0 - 0.2	10
	0.2 - 0.7	9
	0.7 - 1.9	8.8
	1.9 - 2.5	7.4
	2.5 - 5.5	5.2

4.5.6. Impacto a la zona vadosa

Este parámetro tiene un comportamiento temporal y espacial similar al tratado en el medio acuífero, ya que de igual forma, escenarios como sierras y valles presentan complicaciones en la selección de intervalos de material, que puede producir una estimación inapropiada de los índices de vulnerabilidad.

Los valores asignados a este parámetro se ajustaron a la litología del área de estudio, con base en la permeabilidad empírica de los materiales, que cuantifica el potencial de infiltración (advectiva) de un contaminante a través de una sección del medio estratificado. La asignación de un valor de impacto de la zona vadosa en el DRASTIC se llevó a cabo a partir de los datos de la Tabla 4.16, para un peso específico (I_w) y un factor de 5 puntos (Aller *et al.*, 1985).

Tabla 4.16. Evaluación del factor de impacto a la zona vadosa en el DRASTIC

Parámetro	Material	Clase
Impacto a la zona vadosa $L_w=5$	Capa confinante	1
	Conglomerados volcánicos	2-6
	Granular fino con arcillas	2-5
	granular medio	2-7
	granular con materia	3-8
	Arena, grava con limo, arcilla	4-8
	Ígneas/metamórficas	2-8
	Arena y grava	6-9
	Basalto	2-10
	Caliza Kárstica	8-10

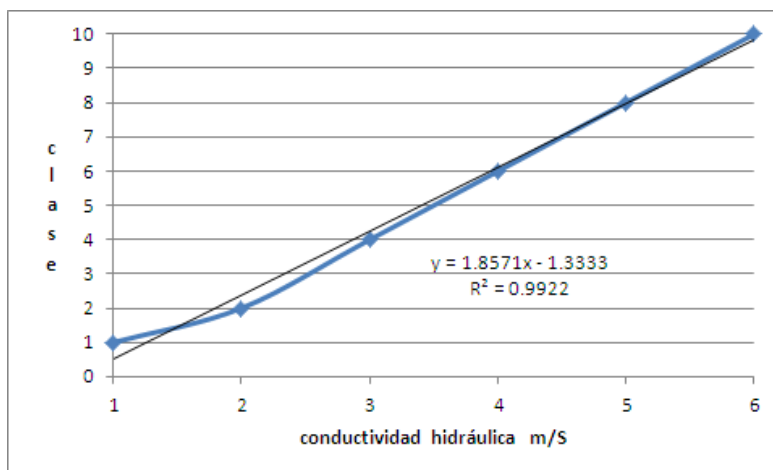
4.5.7. Conductividad hidráulica

La sensibilidad de este parámetro es de tipo espacial. Se presenta principalmente en escenarios en donde se producen interdigitaciones de materiales con diferentes propiedades hidráulicas. Este parámetro es notablemente sensible ante la presencia de estructuras geológicas como fallas, diques y cuerpos plutónicos, que cambian abruptamente la permeabilidad del medio.

Con este factor se mide la tasa de movimiento del agua dentro del acuífero, lo que afecta la velocidad a la cual se puede desplazar un contaminante. Para obtener este parámetro se realizó una recopilación de estudios anteriores: CFE (1997), CONAGUA (2002), CONAGUA y BGS, (1998), así como los calculados en campo por métodos geofísico y con el Permeámetro Guelph.

Se realizó un ajuste a la metodología original (Gráfica4.2) con la ecuación de la línea de ajuste (4.21). La Tabla 4.17 resume la información utilizada para evaluar la conductividad hidráulica del factor acuífero. El peso de importancia (C_w), fue de 3 puntos (Aller *et al.*, 1985).

$$y = 1.8571x - 1.3333 \quad R^2 = 0.9922 \quad (4.21)$$



Grafica 4.2 Ecuación de ajuste para la conductividad hidráulica.

Tabla 4.17 Evaluación de conductividad hidráulica en el DRASTIC

Parámetro	Intervalo (md)	(m/s)	clase
Conductividad hidráulica $C_w=3$	0.060 - 0.6216	6.94×10^{-7} - 7.19×10^{-6}	1.4
	0.6216 - 0.8	7.19×10^{-6} - 9.25×10^{-6}	3
	0.8 - 0.9	9.25×10^{-6} - 1.04×10^{-5}	5
	0.9 - 3.0	1.04×10^{-5} - 3.47×10^{-5}	8
	3.0 - 7.0	3.47×10^{-5} - 8.10×10^{-5}	9
	> 7.0	> 8.10×10^{-5}	10

4.5.8. Método DRASTIC

El método empleado para determinar la vulnerabilidad en el área de estudio fue el DRASTIC ya descrito anteriormente, cada uno de los parámetros del método, se caracterizan por ser variables que se clasifican numéricamente para evaluar la contaminación potencial del agua subterránea. La ecuación utilizada que describe el índice DRASTIC es la del factor de ponderación (r) multiplicado por su peso (w) asignado; sumando estos factores se obtiene el índice DRASTIC (contaminación potencial) como se indica a continuación:

$$DrDú + RrRw + ArÁw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = \text{índice DRASTIC} \quad (4.22)$$

Utilizando la ecuación antes descrita, se crearon capas para cada parámetro a las cuales se asignaron los factores de ponderación correspondientes que reflejan su influencia en la vulnerabilidad del área de estudio. Posteriormente las capas se sumaron y se generó el mapa de índice DRASTIC. Posteriormente se realizó un proceso de normalización clasificando las zonas de vulnerabilidad baja, moderada, alta, muy alta, extrema. A estos resultados se aplicó el factor del índice de contaminación potencial (IC DRASTIC), tanto a datos de calidad del agua como a los datos geoquímicos, posteriormente se delimitó un perímetro de protección para el Manantial Cerro Colorado.

La mejor manera de representar la vulnerabilidad de un acuífero es en forma de mapas, que muestren la variación espacial de los niveles de riesgo de contaminación del agua. Los mapas de vulnerabilidad son de gran utilidad para la planeación del desarrollo de zonas urbanas, ubicación de basureros, rellenos sanitarios (Rodríguez y Ramos, 1997) zonas de recarga artificial, monitoreo de calidad del agua subterránea, estudios de calidad del agua en zonas en donde se ubiquen fuentes potencialmente contaminantes como canales de aguas residuales, red de drenaje urbano, gasolineras ductos con hidrocarburos u otras sustancias peligrosas. En tabla 4.18 se muestran los valores utilizados de clasificación de la vulnerabilidad DRASTIC.

Tabla 4.18 Clasificación de la vulnerabilidad

Valor del índice	Clasificación de la vulnerabilidad
< 100	Despreciable
101 – 119	Muy baja
120 – 139	Baja
140 – 159	Moderada
160 – 179	Alta
180 – 199	Muy alta
> 200	Extrema

Los mapas de vulnerabilidad de DRASTIC para cada variable se obtuvieron mediante el método de interpolación de Kriging y se ajustaron al contorno de la subcuenca. A partir de estos, se pudo visualizar el comportamiento de los parámetros en la zona con distintos colores (Figura 4.5), lo cual ayuda a valorar con una mejor perspectiva tanto el modelo hidrogeológico como la toma de decisiones en la planificación del uso de la tierra y el manejo del agua subterránea (Silva *et al.*, 2000).

Dado la finalidad de un mapa de vulnerabilidad es mostrar las zonas más susceptibles o vulnerables, fue necesario que cada uno de los parámetros considerados mostrara variaciones espaciales que evidencien las zonas de mayor riesgo (Rodríguez y Ramos, 1997); por tal razón algunos parámetros fueron ajustados.

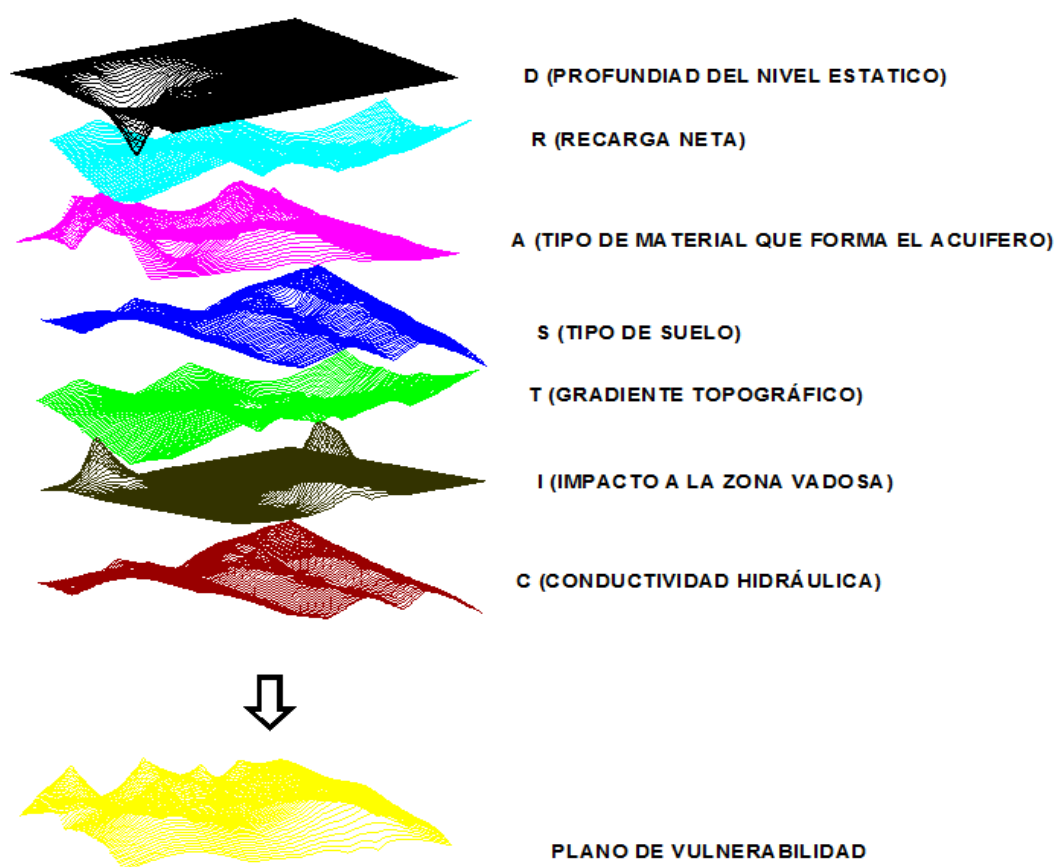


Figura 4.5. Parámetros de vulnerabilidad DRASTIC (Elaborado para este estudio por Becerril, 2013).

El mapa del índice de vulnerabilidad se validó comparándolo con las isolíneas de los iones mayores en el área de estudio. Si una misma fuente de contaminante está actuando en una región con diferentes vulnerabilidades, se deberían obtener concentraciones químicas altas en las zonas más vulnerables, ya que la distribución de los componentes fisicoquímicos es función de los campos de velocidades del flujo subterráneo y la ubicación de las fuentes contaminantes.

En este caso se identificó una asociación entre las zonas con valores más altos de concentraciones de iones y vulnerabilidades altas, razón por la cual se determinó que los resultados obtenidos son consistentes con las condiciones reales, dado que la información utilizada y la aplicación de la metodología fueron correctas.

4.5.9. Sensibilidad de parámetros del método DRASTIC

El método DRASTIC requiere una buena selección de puntuaciones en los 7 parámetros; sin embargo, la subjetividad de algunos de ellos (tipo de acuífero, tipo de suelo e impacto a la zona vadosa), en algunos casos es inevitable; debido a los amplios intervalos en los que se puede clasificar un tipo de material, esta subjetividad afecta fuertemente al mapa de vulnerabilidad final. Un análisis de sensibilidad nos da información importante sobre la influencia de valores de puntuación y pesos asignados a cada parámetro y nos ayuda a reducir la subjetividad del método. El método de sensibilidad ha sido aplicado en otras técnicas de puntuación similar al DRASTIC (Lodwik *et al.*, 1990; Gogu y Dessargues, 2000; Napolitano y Fabbri, 1996). El análisis de sensibilidad se realizó utilizando los siete parámetros. La sensibilidad de un mapa de vulnerabilidad parcial puede expresarse de acuerdo con (Lodwik *et al.*, 1990):

$$S_{xi} = \frac{V_i}{N} - \frac{V_{xi}}{n} \quad (4.23)$$

Donde

S_{xi} : es la sensibilidad (para la celda i) asociado con un mapa sin el parámetro x_i

V_i : índice de vulnerabilidad utilizando en la celda i

V_{xi} : índice de vulnerabilidad sin considerar uno de los parámetros x , (D, R, A, St T, 1, C)

N : número de parámetros considerados en DRASTIC

n : número de parámetros utilizados en mapas de vulnerabilidad parcial

Para evaluar el orden de la magnitud de la variación originada al omitir un parámetro, según (Lodwik *et al* 1990), el índice de variación puede ser calculada como:

$$V_{xi} = \frac{V_i - V_{xi}}{V_i} * 100 \quad (4.24)$$

Donde.

V_{xi} : índice de variación omitiendo un parámetro X , (D, R, A, S, T, I, C)

V_i : índice de vulnerabilidad calculada en el área i ,

V_{xi} : índice de vulnerabilidad calculada en el área i , sin considerar un parámetro X , (D, R, A, S, T, I, C)

Se aplicaron estas ecuaciones a cada parámetro de DRASTIC y posteriormente se graficaron los resultados para finalmente obtener una línea de tendencia y un intervalo de confianza, en la cual se infiere las anomalías para cada parámetro. Esta representación gráfica proporciona información, sobre si los pesos y puntajes fueron adecuados para cada parámetro.

4.5.10. Índice de contaminación potencial (IC_DRSTIC)

A más de 30 años de la introducción del término vulnerabilidad de acuíferos, aún se discute la definición y el alcance del mismo. En este sentido, la mayoría de los autores considera a la vulnerabilidad una propiedad cualitativa, que indica el grado de protección natural de un acuífero respecto a la contaminación y en general, terminan calificándola como baja, media, alta, a veces con el agregado de muy alta y muy baja. Un inventario de fuentes potenciales de contaminación es tan importante, como la propia determinación de la vulnerabilidad (Rodríguez *et al.*, 1997), ya que de la combinación de ambos, resulta el mapa de riesgo al acuífero (Ramos, 2000; Hirata y Reboucas, 1999).

En este trabajo se aplicó el índice de calidad del agua subterránea (IC-DRASTIC) descrito por Conesa (1993). Éste índice proporciona un valor global de las condiciones del agua, incorpora valores individuales ponderados, de una serie de parámetros físicos, químicos o biológicos, medidos en campo o en laboratorio. La importancia de este índice es que considera la mayor cantidad de componentes con los que se dispone. La evaluación se puede efectuar con los componentes fisicoquímicos de un análisis de agua normal (iones mayores, pH, temperatura y número de coliformes fecales), aunque a mayor cantidad de elementos de análisis, mayor relevancia tendrá la estimación.

El índice de contaminación potencial del agua subterránea está formado por dos elementos, el primero refleja la valoración de cada una de las variables y el segundo el peso o importancia relativa asignada. Los factores más importantes reciben una ponderación de 5; en tanto que los menos importantes un valor de 1 (Tabla 4.17). Matemáticamente el índice se expresa como:

$$IC_{DRSTIC} = \sum_{j=1}^6 W_j * V_j \dots\dots\dots (4.25)$$

Donde

IC_DRSTIC: índice de contaminación DRSTIC
Wj: peso asignado a la variable j; valor entre 1 y 5.
Vj: valor asignado a la variable j; valor entre 1 y 10.

Para cada uno de los variables se determinaron dos valores, el primero representa la vulnerabilidad genérica a la contaminación por desechos de tipo municipal e industrial, y el segundo indica la contaminación asociada a agroquímicos. Los valores utilizados en el presente estudio son los sugeridos por Aller *et al.* (1987).

Tabla 4.19 La variabilidad de la vulnerabilidad

Variable	Vulnerabilidad genérica	Vulnerabilidad a pesticidas
Profundidad a la tabla de agua (D)	5	5
Recarga (R)	4	4
Suelo (S)	2	5
Topografía (T)	1	3
Impacto de la zona no saturada (I)	5	4
Conductividad hidráulica (C)	3	2

4.6. Geoquímica del agua subterránea

Se seleccionaron 21 puntos de muestreo localizados en la Figura 4.6 y su descripción se encuentra en la Tabla 4.20. Las variables muestreadas fueron: Ph, temperatura, conductividad hidráulica, Sólidos Disueltos Totales, e iones mayores. Los datos de iones recopilados se ordenaron por coordenadas según su procedencia (canal, manantial o pozo) y se realizó la conversión de mg/L a meq/L, ya que estas unidades son necesarias para calcular el error del balance iónico. Posteriormente, se usó el programa EASY-QUIM.4 (Vázquez, 2002), con el que se graficaron los diagramas de Paiper, para determinar la familia de agua de las muestras.

Con la ayuda del programa phreeqi-2, se obtuvieron las variables de análisis como la actividad iónica y las posibles formaciones de compuestos ya sea por dilución o precipitación.



Tabla 4.20 Descripción de los puntos de muestreo en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado

Coordenadas UTM		Clave	Descripción
X	Y		
478239.0	2217962.0	POZO-01	Pozo Tezoquipa
479985.0	2217372.0	POZO-02	pozo Principal Cantera
477653.0	2216814.0	POZO-03	pozo el tablón
476763.0	2215862.0	Manantial 01	pozo nopales (las albercas)
473535.0	2219625.0	ARC	Canal Salto Tlamaco Km 22
473861.0	2223673.0	pozo CFEI-09	Pozo 9 del sistema 2 de CFE
474749.0	2226701.0	pozo CFEI-11	Pozo no. 11 del sistema 2 de CFE
477813.0	2225505.0	pozo3	terreno aldeaño al pozo San primitivo
472603.0	2224820.0	manantial C	M. Cerro Colorado
470160.2	2221626.5	pozoT05	Teocalco 05
469362.2	2221876.5	pozoT17	Teocalco 17
468413.7	2222796.7	pozoT19	Teocalco 19
470630.7	2222509.1	pozoT07	Teocalco 07
471740.6	2223162.0	pozoT09	Teocalco 09
472478.4	2223834.5	pozoT11	Teocalco 11
474988.3	2224245.2	pozoCFEI06	CFE6
470121.1	2219947.1	POZO CFEII-09	CFEII-09
470492.8	2219265.6	POZO CFEII-02	CFEII-02
469470.5	2220318.8	POZO CFEII-08	CFEII-08
474735.4	2216215.9	POZO BOJAY-2	BOJAY-02
472365.3	2213725.3	POZO LOS CAUTE	LOS CUATE

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología en el área de estudio.

4.7. *Balance de los procesos Superficiales*

Para no omitir o duplicar alguno de los componentes de los balances, que pudiera subestimar o sobreestimar la disponibilidad de aguas subterráneas o superficiales, se prestó especial atención a la conexión hidráulica entre las fuentes subterráneas y las superficiales. En la Figura 5.1 se muestran las subcuencas aledañas a la zona de interés, la dirección predominante del flujo subterráneo (de suroeste a noreste), así como las estaciones hidrométricas a la entrada y salida de la subcuenca, las cuales son Salida Túnel Nuevo y Tezontepec, respectivamente.

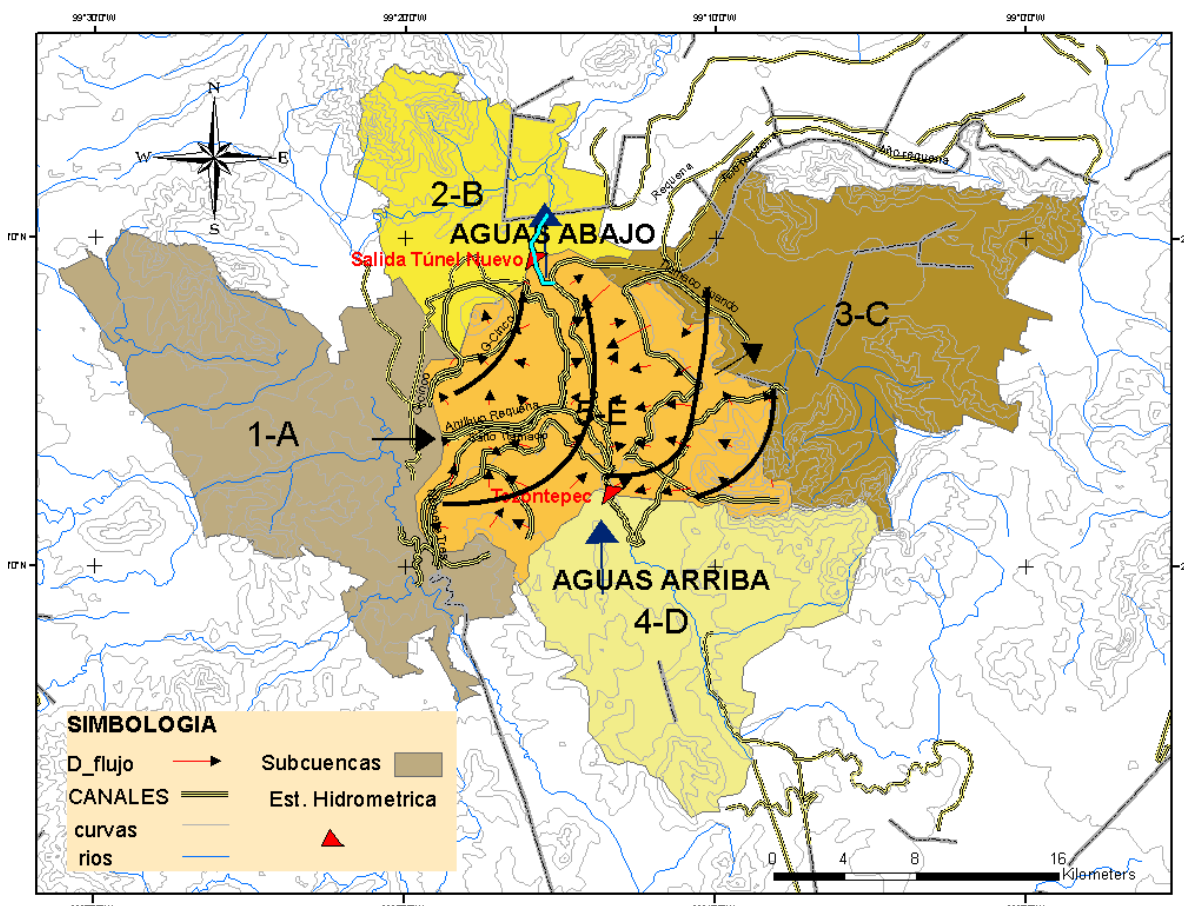


Figura 5.1. Condiciones hidráulicas de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.7.1. Evapotranspiración (Et)

La localización geográfica de las estaciones climatológicas utilizadas en el método de los polígonos de Thiessen, se muestran en la Figura 5.2. Los valores medios de precipitación y temperatura corresponden al periodo de 1980 a 2010 (Gráficas 5.1 y 5.2 respectivamente). Las estaciones con influencia dentro de la subcuenca de Cerro Colorado son: Río Salado, Presa Endhó, Ajacuba (DGE), Ajacuba (SMN), Tula (SMN), Tula (DGE) y Jasso. Los valores de la precipitación media de las estaciones y de la subcuenca se encuentran en la Gráfica 5.3.

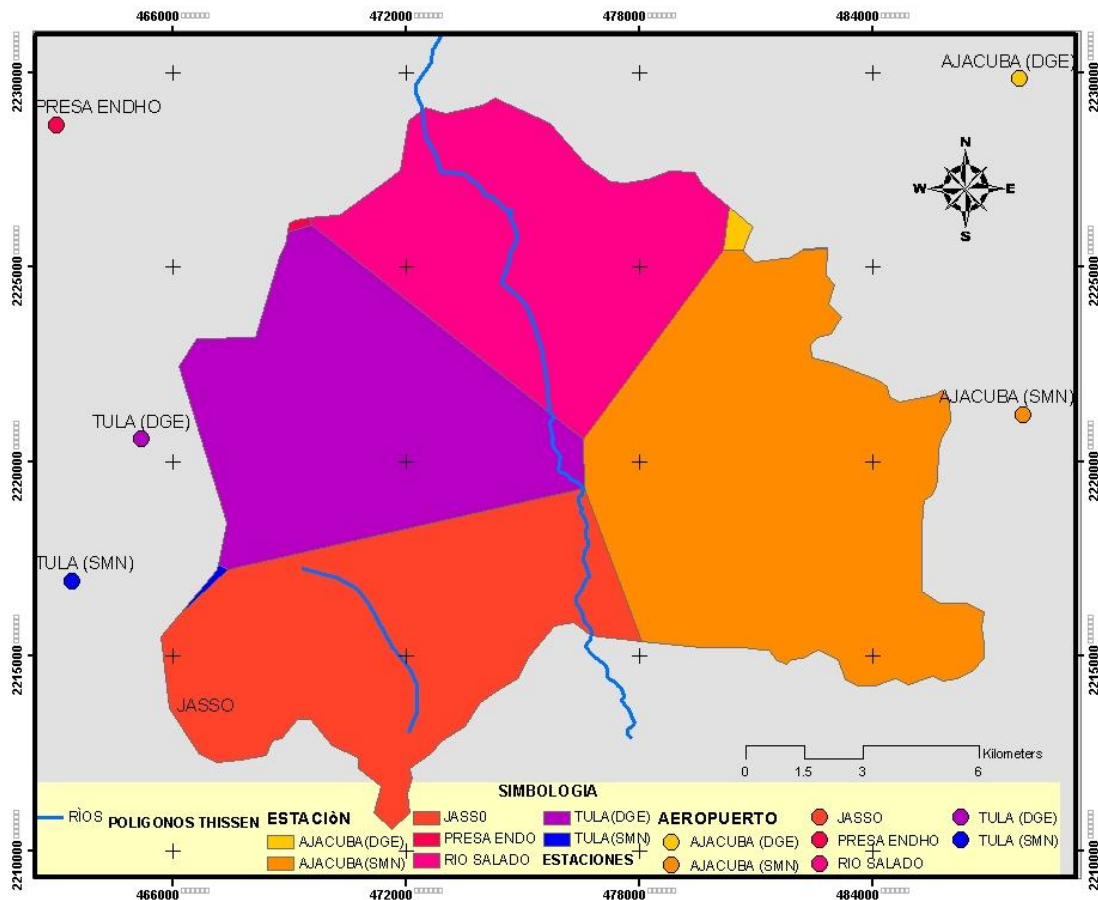
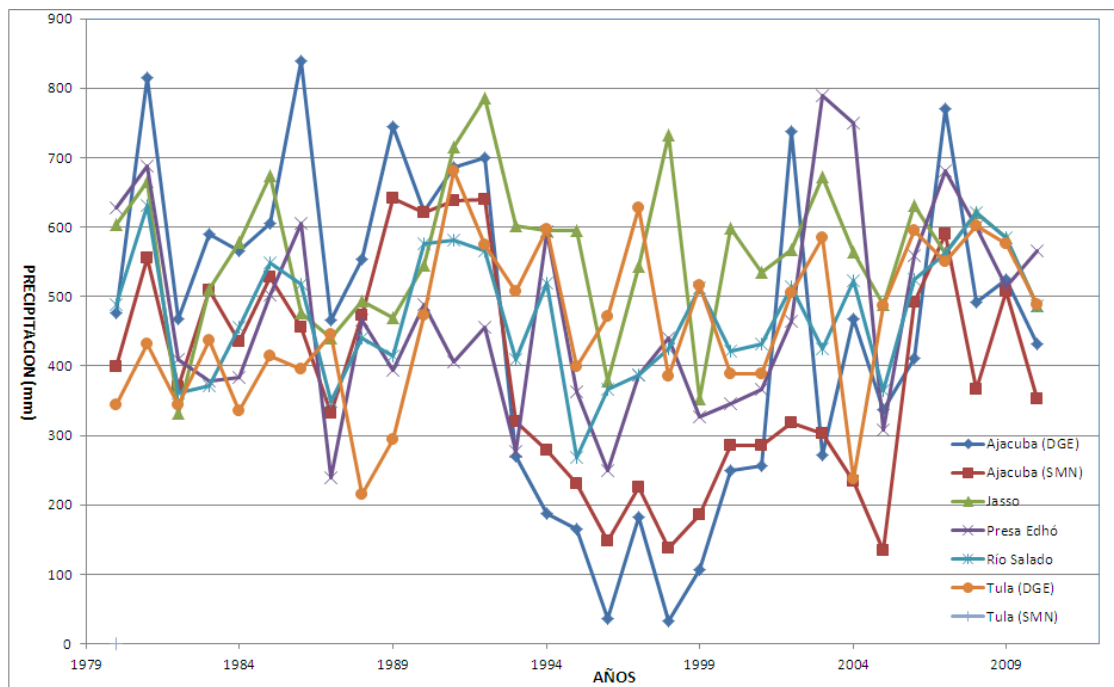
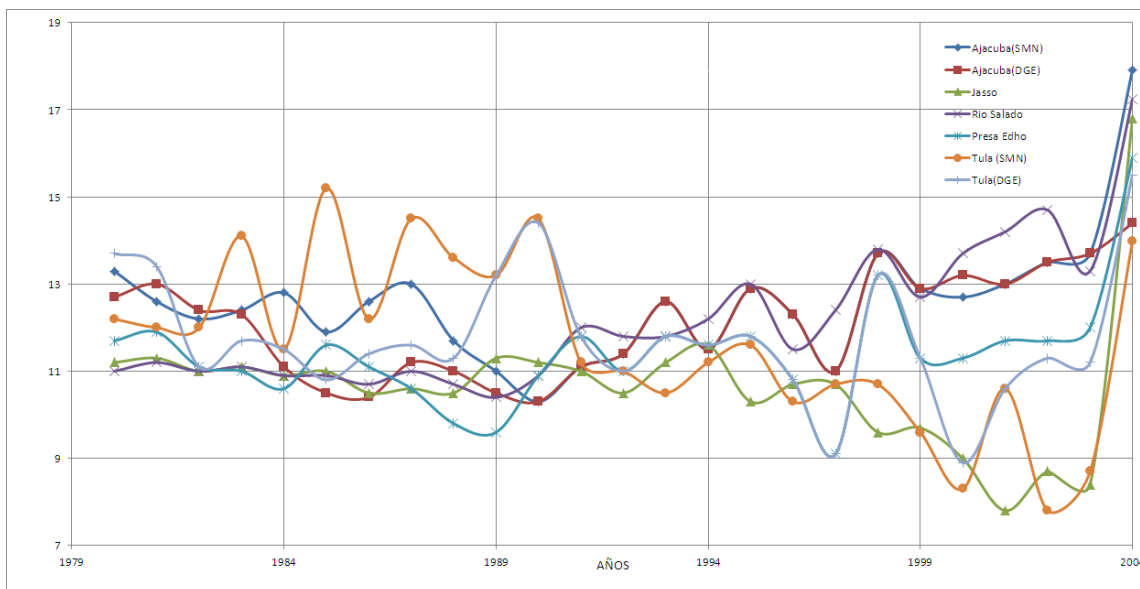


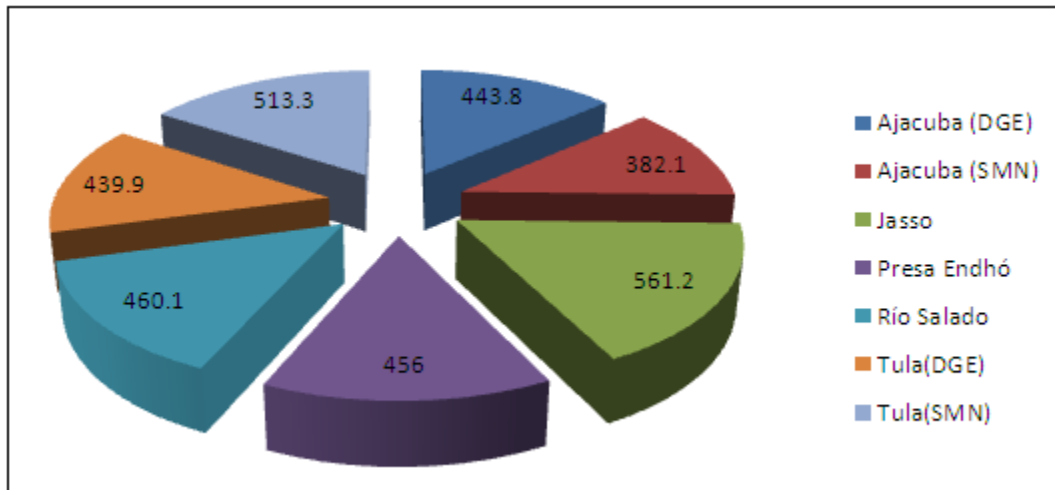
Figura 5.2. Ubicación de las estaciones climatológicas (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).



Grafica 5.1 Precipitación media anual registrada en las estaciones de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado.

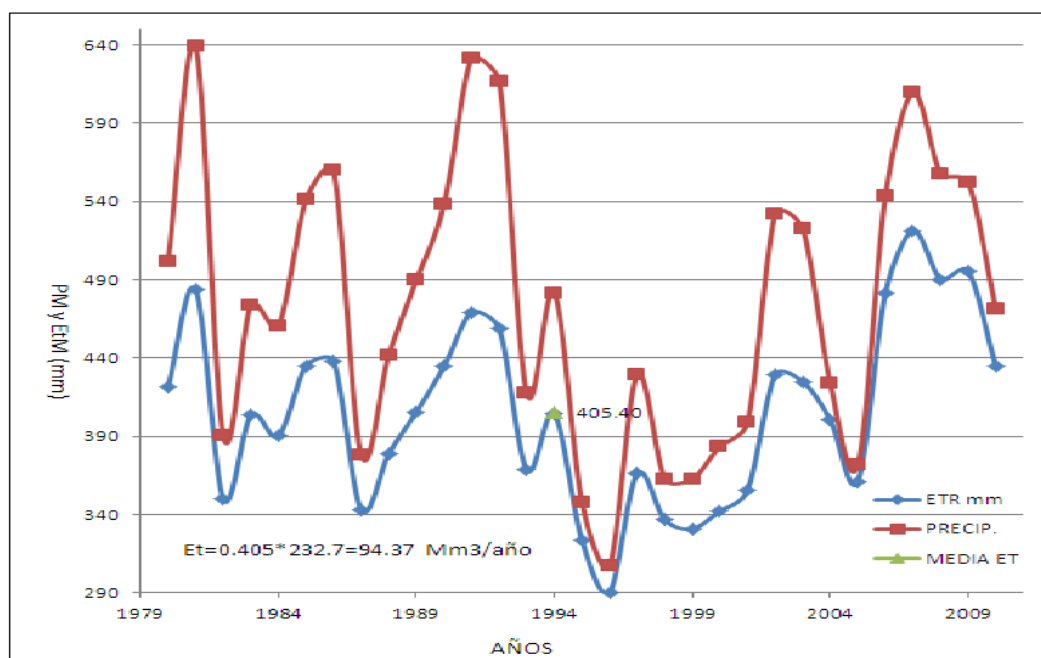


Grafica 5.2 Temperatura media anual registrada en las estaciones de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado (1980-2004).



Grafica 5.3 Precipitación media en la cuenca de Cerro Colorado, obtenida mediante los polígonos de Thissen

La precipitación media anual obtenida con los polígonos de Thissen se muestra en Grafica 5.3. Los resultados de la evapotranspiración estimada, se encuentran en la Grafica 5.4 y distribución espacial se puede observar en la Figura 5.3. Para la subcuenca, el valor medio de la evapotranspiración es de $94.37 \text{ Mm}^3/\text{año}$.



Grafica 5.4. Evapotranspiración obtenida por el método de Turc.

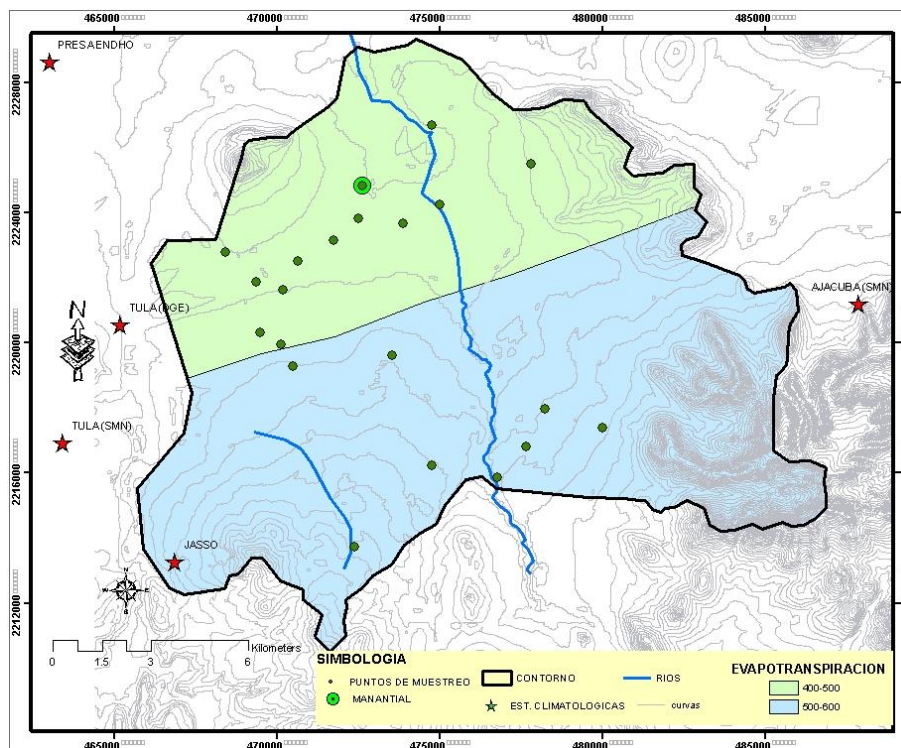


Figura 5.3 Evapotranspiración en el área de estudio (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013)

4.7.2. Usos del agua (U)

En la Tabla 5.1 se muestran los datos del padrón de usuarios (REPDA 2007) que coinciden con los obtenidos en este estudio, la Figura 5.4 contiene representación espacial. Estos datos se validaron con base en las dotaciones asignadas por habitante a los usos pecuario, industrial y agrícola. El volumen superficial obtenido fue de 43.0 Mm³/año.

Tabla 5.1 Usos del agua en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado (Volumen REPDA Mm³).

Volumen REPDA Mm3									
Tramos	volumen	PUBLICO URBANO		DOMESTICO		PECUARIO		AGRICOLA	
USO	Total por USO	concesión	%	concesión	%	concesión	%	concesión	%
SUPERFICIAL	43.0	31.39	0.73		0.0000		0.000	1,035.7	24.071
Subterráneo	43.6	84.33	1.93	10.3285	0.2368	507.6	11.64	182.1	4.176
DESCARGAS	52.5	19.05	0.36	303.7	5.790	20.2	0.39		0.000
Totales	139.09	134.77	0.97	314.03	2.2577	528	3.9	1,218	8.756

SERVICIOS		INDUSTRIAL		AGROINDUSTRIAL	
concesión	%	concesión	%	concesión	%
	0.00	2,200.0	51.13		0.00
145.8820	3.35	3,086.6	70.78	162.0	3.71
14.4	0.28	167.1	3.19		0.00
9,461	68.02	5,454	39.21	162.00	1.16

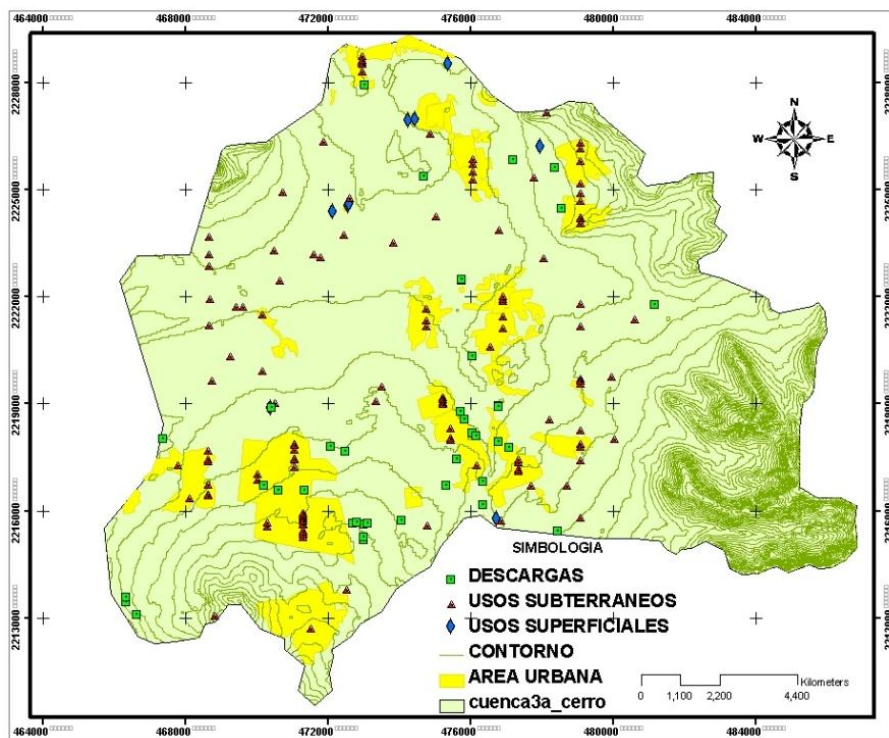


Figura 5.4 Distribución de usos del agua en el área de estudio (elaborado para este estudio por Becerril, 2013).

4.7.3. Retornos de agua (Re)

Este volumen tiene un valor estimado de $14.02 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y corresponde al valor reportado en el REPDA por la CONGUA (2007), el cual es un porcentaje de los aprovechamientos mostrados en la Tabla 5.2.

4.7.4. Esguerrimiento aguas arriba (Ar)

En la Figura 5.1, se muestra la delimitación de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado y la configuración de la red de drenaje natural y artificial de la región; se observa que el río Salado es la corriente natural que aporta los esguerrimientos superficiales que entran a la subcuenca. De acuerdo con los datos registrados en la estación hidrométrica “Salida Túnel Nuevo” mostrados en la Gráfica 5.5, el valor del esguerrimiento del Río Salado, aguas arriba de la cuenca es de $481.28 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

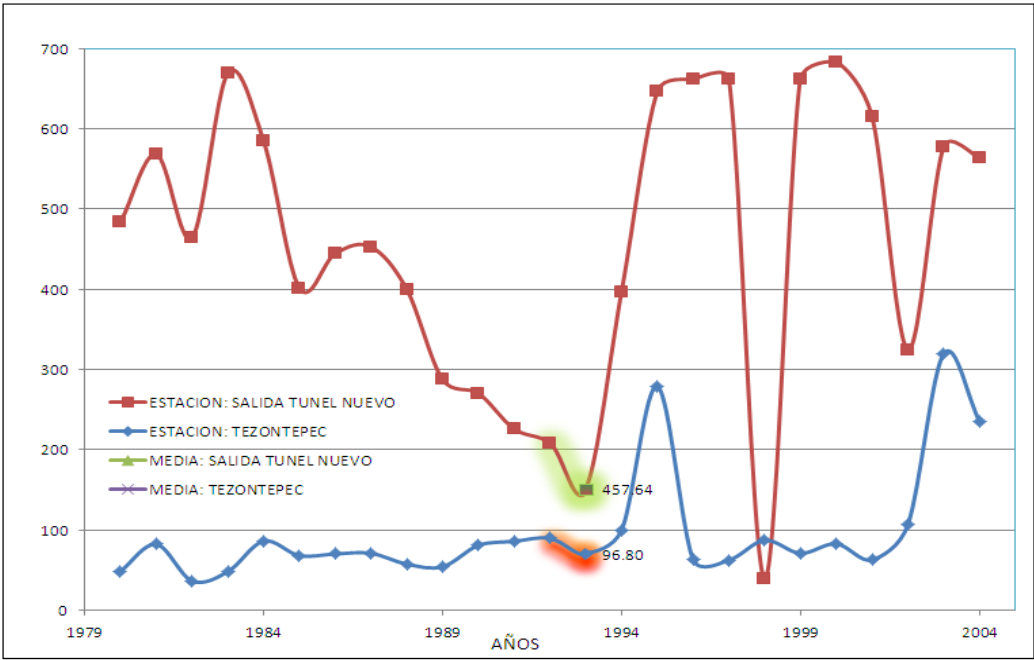
4.7.5. Esguerrimiento de agua a la salida de la subcuenca (Ab)

Como se observa en la Figura 5.1, la estación hidrométrica “Tezontepec” se encuentra ubicada en la salida de la subcuenca. De acuerdo con los datos registrados en esta estación (Gráfica 5.5), el volumen medio anual de esguerrimiento superficial que sale de la cuenca es de $96.802 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

Tabla 5.2 Retornos de agua por usos en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado (Mm³/año).

Retornos (Mm3/año)								
Tramo	uso s totales	publico urbano	domestico	pecuario	agricola	industrial	agroindustri	servicios
	%	0.20	0.20	0.40	0.40	0.10	0.60	0.20
	volumen	retorno	retorno	retorno	retorno	retorno	retorno	retorno
SUPERFICIAL	640.6	6.3	0.00	0.0	414.3	220.0	0.0	0.0
Subterráneo	729.8	16.9	2.1	203.0	72.8	308.7	97.2	29.2
DESCARGAS	31.6	3.8	0.1	8.1	0.0	16.7	0.0	2.9
sumas	14.0	27.0	2.1	211.1	487.1	545.4	97.2	32.1
	14.019664	Mm3/año						

% de retornos por uso	
publico urbano	0.20
domestico	0.20
pecuario	0.40
agricola	0.40
industrial	0.10
agroindustria	0.60
servicios	0.20



4.7.6. Importaciones de cuencas vecinas (Im)

Las importaciones, se evaluaron como el volumen de agua que entra a la subcuenca por los canales G-Cinco, Antiguo Requena, Salto-Tlamaco, Tlamaco Juando, Número tres, Dendhó, y Requena; los cuales de forma artificial aportan escurrimientos provenientes de las subcuencas colindantes (Figura 5.1). De acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 5.3, el volumen de agua por importaciones es de 27.25 Mm³/año.

Tabla 5.3 Volumen de importaciones de cuenca vecinas.

	Volumen	80% por los meses de	60% por
1-A *** 5-E	Mm3	estiaje	conducción
G-Cinco	157.68	126.14	75.69
Antiguo Requena	47.30	37.84	22.71
Salto Tlamaco	157.68	126.14	75.69
Número Tres	47.30	37.84	22.71
Total			196.78
4-D *** 5-E			
Tlamaco Juando	157.68	126.14	75.69
Total			75.69
			27.25

4.7.7. Exportaciones a cuenca vecinas (Ex)

El volumen que corresponde a las salidas de la subcuenca de forma artificial, es el agua de los canales: Antiguo Requena, G-Cinco, Tlamaco Juando, Requena y Dendho; con un volumen aproximado de salida de 16.65 Mm³/año; este valor se estimó a partir de los datos de la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Volumen de las exportaciones a subcuencas vecinas.

5_E a 2-B			
Antiguo Requena	473.04	37.84	22.71
G-Cinco	473.04	37.84	22.71
Total			45.42
5-E a 3-C			
Tlamaco Juando	1,576.80	126.14	75.69
Requena	473.04	37.84	22.71
Dendho	473.04	37.84	22.71
			121.10
			16.65

4.7.8. Escurrimiento natural por cuenca propia (Cp)

El factor K del coeficiente de escurrimiento requerido para la estimación del escurrimiento natural, se estimó para los usos de suelo del área en el área de estudio. En la tabla 5.5 se presentan los valores utilizados y las superficies correspondientes del área de estudio.

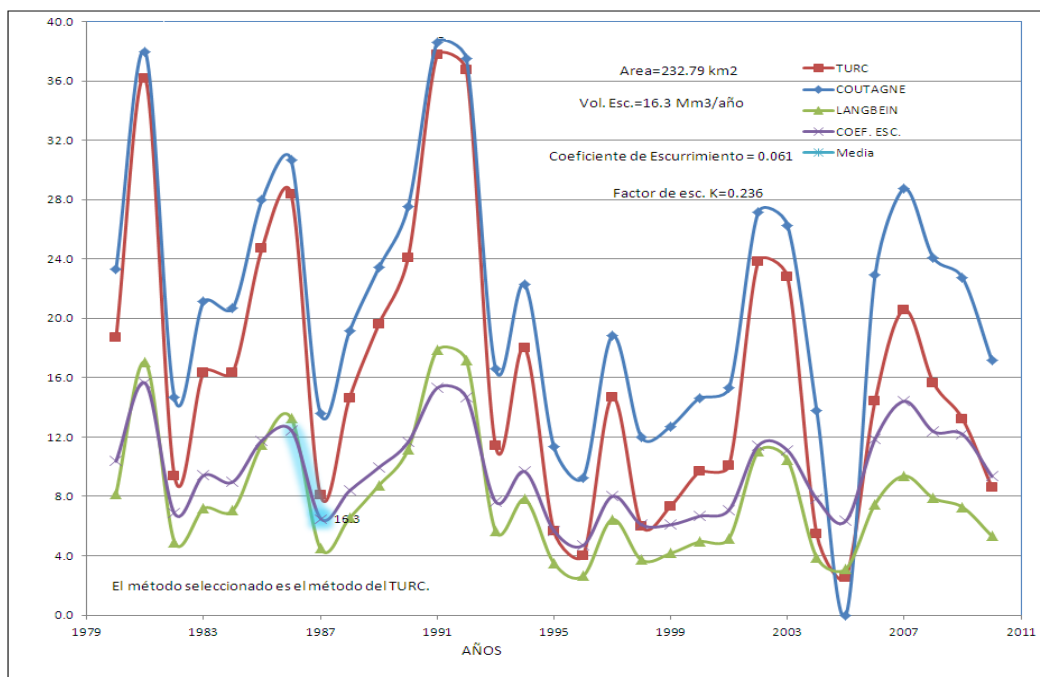
Tabla 5.5. Factor K del tipo de vegetación y suelo (Aparicio *et al.*, 2006)

del ARI	VEGETACION	TIPO	CARACTERISTICAS	SUSTRATO	Factor k	Superficie (ha)	Ponderado
2.7	AGRICULTURA DE TEMPORAL	CULTIVOS	CICLO DEPENDIENTE DEL AGUA DE LLUVIA	SUELOS PROFUNDOS O SOMEROS, NO ARENOSOS, CONDICIONADO EN FUNCION	0.24	31877241.0	0.033
59.4	AGRICULTURA DE RIEGO	CULTIVOS	CICLO ASEGURADO POR EL AGUA DE RIEGO	SUELOS PROFUNDOS O SOMEROS, NO ARENOSOS, CONDICIONADO POR RIEGO	0.24	138397938.0	0.143
2.8	BOSQUE DE ENCINO	VEGETACION ARBOREA	ESPECIES CON ALTURA ENTRE 2 Y 35 m. FORMACION Densa O CERRADA	SUELOS PROFUNDOS DE TERRENOS ALUVIALES, PLANOS, SOMEROS EN ZONAS ROCOSAS	0.16	6527889.0	0.004
6.2	PASTIZAL CULTIVADO	VEGETACION HERBACEA	INTRODUCIDO INTENCIONALMENTE EN UNA REGION CON LABORES DE CULTIVO	SUELOS ARCILLOSOS O ARENOSOS ROJOS O CAFE, FERTILES	0.24	14328743.0	0.015
16.6	Matorral Crasicaule				0.23	38555115.0	0.038
0.7	Matorral Desertico Rosetofilo				0.22	1550116.0	0.001
0.7	Zona Urbana				0.18	1593311.0	0.001
						232830353.0	0.236

De los datos que se muestran en las Tabla 5.6, la precipitación media es de 465.2mm a la cual correspondiente a un coeficiente de escurrimiento de 0.061, y un factor de escurrimiento según el tipo de suelo y vegetación en el área de estudio K de 0.236. El escurrimiento por cuenca propia obtenidos fue de 16.3 Mm³/año (Grafica 5.6).

Tabla 5.6. Determinación del escurrimiento en la subcuenca de aportadores directos al Manantial Cerro Colorado.

AÑO	PTN	TEM. MED.	TURC	COUTAGNE	LANGBEIN	COEF. ESC.	PROMEDIO
1980	501.8	12.2	18.7	23.3	8.2	10.4	15.14
1981	638.9	12.2	36.1	37.9	17.0	15.6	26.68
1982	390.0	11.5	9.4	14.7	4.9	6.8	8.95
1983	473.6	12.0	16.4	21.1	7.2	9.4	13.52
1984	460.4	11.3	16.4	20.7	7.1	9.0	13.28
1985	541.2	11.7	24.7	28.0	11.5	11.8	18.98
1986	559.5	11.3	28.3	30.6	13.3	12.5	21.17
1987	377.9	11.8	8.1	13.6	4.5	6.5	8.17
1988	441.5	11.2	14.6	19.1	6.6	8.4	12.18
1989	489.6	11.3	19.6	23.4	8.7	9.9	15.42
1990	537.9	11.8	24.1	27.5	11.2	11.6	18.60
1991	631.4	11.5	37.8	38.6	17.9	15.3	27.40
1992	616.4	11.1	36.7	37.5	17.2	14.7	26.52
1993	417.4	11.7	11.4	16.6	5.6	7.6	10.33
1994	481.5	11.6	18.0	22.3	7.8	9.7	14.45
1995	347.6	12.0	5.6	11.3	3.5	5.7	6.54
1996	307.6	11.3	4.0	9.3	2.6	4.7	5.16
1997	429.3	10.6	14.7	18.8	6.4	8.0	11.98
1998	362.5	12.5	6.0	12.0	3.7	6.1	6.94
1999	362.5	11.5	7.4	12.7	4.2	6.1	7.58
2000	383.7	11.0	9.7	14.6	5.0	6.7	8.98
2001	398.7	11.6	10.1	15.3	5.2	7.1	9.42
2002	531.8	11.6	23.8	27.2	11.0	11.4	18.37
2003	522.8	11.6	22.8	26.3	10.5	11.1	17.66
2004	423.7	16.0	5.5	13.8	3.9	7.8	7.73
2005	372.0	16.4	2.5	0.0	3.1	6.3	2.99
2006	543.7	15.8	14.4	22.9	7.5	11.9	14.17
2007	609.6	15.8	20.6	28.7	9.4	14.4	18.28
2008	557.5	15.8	15.7	24.1	7.9	12.4	15.00
2009	552.2	16.6	13.2	22.7	7.3	12.2	13.84
2010	471.6	15.9	8.6	17.1	5.3	9.3	10.11
Media	475.4	12.6	16.3	21.0	7.9	9.7	13.7



Grafica 5.6 Estimación del volumen de escurrimiento por cuenca propia (CP).

4.7.9. Acumulado del Balance superficial.

En la Tabla 5.7, se resumen los resultados obtenidos para los procesos superficiales que se presentan en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado; se estimó que la variación del volumen de agua en la subcuenca del Manantial Cerro Colorado es de $271.69 \text{ Mm}^3/\text{año}$. La Figura 5.5, es una representación esquemática de los resultados obtenidos del balance de agua superficial.

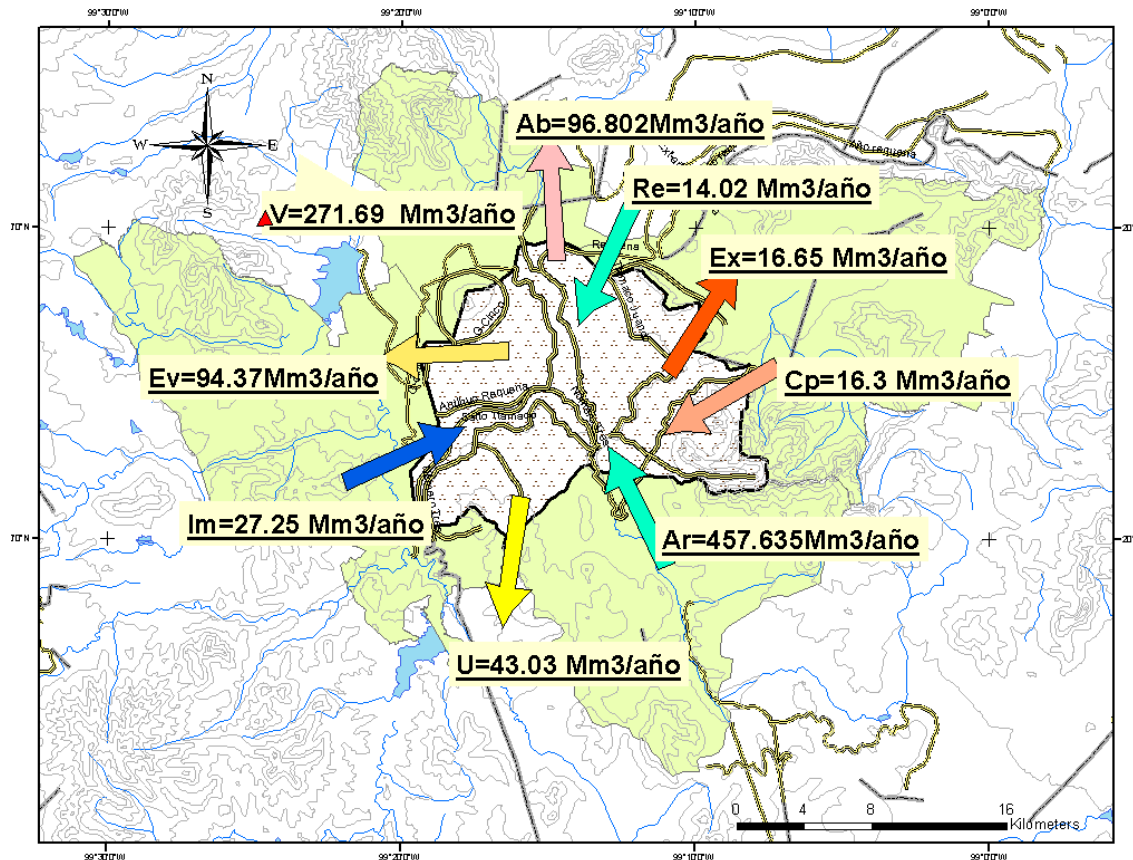


Figura 5.5. Balance de agua superficial de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado
(Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

La ecuación de balance superficial presenta un cambio del almacenamiento aceptable, ya que incluye el escurrimiento por cuenca propia, en consecuencia, en los componentes de salida se incluyen los volúmenes de evapotranspiración, evaporación en áreas sin vegetación y urbanas, así como el volumen de infiltración. Se estimó un valor de 271.69 millones de m^3 al año, que representa un coeficiente de escurrimiento de 0.061 .

Tabla 5.7. Balance del agua superficial de la subcuenca del Manantial Cerro Colorado

CONEXIÓN		ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO AGUAS ABAJO												ΔV
		OFERTA POTENCIAL						EXTRACCIONES POR CUENCA PROPIA Y ACUMULADA						
Subcuenca vecina	DE	HACIA	Cp	Cp.A	Arriba	Im	Re	TOTAL	U	ETR	Ex	Ab	TOTAL	
B	C	D	E	F		G	H	I=E+F+G+H	J	K	L	P	M=J+K+L+P	O=(I)-(M)
Tula	*	5-E	50.91			19.68								
Tzontepac	5-E	2-B	14.21								4.54			
Ajacuba	5-E	3-C	12.08								12.11			
La Mora	*	5-E	23.64			7.57								
Manantial	*	*	16.29	481.28	27.25	14.02		522.54	43.03	94.37	16.65	96.80	250.86	271.69

4.8. Balance subterráneo

4.8.1. Infiltración más la recarga por lluvia (I)

Mediante la Tabla 5.8 y la lluvia media anual en el área de estudio, se estimó la capacidad de cada tipo de suelo para permitir la infiltración (Tabla 5.9). El volumen total obtenido de agua por infiltración es de 10.34 Mm³/año.

Tabla 5.8 Porcentaje de lluvia por tipo de suelo

% de lluvia	suelo
0.04	Vertisol
0.12	Feozem
0.12	Rendzina

4.8.2. Recarga inducida (Ri).

Los retornos por riego se cuantificaron mediante la diferencia entre el volumen abastecido y los requerimientos de los cultivos. Con volumen suministrado de 45.40 Mm³/año y un volumen de escurrimiento de 20.51 Mm³/año incorporado al río Salado, más un volumen por fugas en redes urbanas equivalente a 11.97 Mm³/año (3% del volumen suministrado por aguas subterráneas), como se describe en la tabla 5.10, se obtuvo un volumen de recarga inducida de 12.94 Mm³/año.

Tabla 5.9 Infiltración estimada por municipio y tipo de suelo

Municipio/Est. Clim	Feozem	Rendzina	Vertisol	Total general	I Mm3/año
Ajacuba	14320578.23			14320578.23	753.0332856
AJACUBA (SMN)	14320578.23			14320578.23	
438.2	14320578.23			14320578.23	
Apaxco	815646.2			815646.2	42.88993978
AJACUBA (SMN)	815646.2			815646.2	
438.2	815646.2			815646.2	
Atitalaquia	15097211.61	38815038.63	6052836.417	59965086.66	3459.821287
AJACUBA (SMN)	13778318.97	10117905.44	5531061.459	29427285.87	
438.2	13778318.97	10117905.44	5531061.459	29427285.87	
JASSO	1318892.644	25434167.75	52229.07796	26805289.47	
589.9	1318892.644	25434167.75	52229.07796	26805289.47	
TULA (DGE)		3262965.436	469545.8807	3732511.317	
518.4		3262965.436	469545.8807	3732511.317	
Atotonilco de Tula	3687198.688	5440248.818	56114.77957	9183562.286	564.189559
AJACUBA (SMN)	3687198.688	1470912.287		5158110.975	
438.2	3687198.688	1470912.287		5158110.975	
JASSO		3969336.532	56114.77957	4025451.311	
589.9		3969336.532	56114.77957	4025451.311	
Tetepango	13425818.34		1537849.953	14963668.3	748.1594367
AJACUBA (DGE)	7810.336181			7810.336181	
456.4	7810.336181			7810.336181	
AJACUBA (SMN)	13418008.01		1537849.953	14955857.96	
438.2	13418008.01		1537849.953	14955857.96	
Tezontepec de Aldama			26464808.51	26464808.51	521.5331597
PRESA ENDHO			125679.0382	125679.0382	
466.6			125679.0382	125679.0382	
RIO SALADO			16862271.26	16862271.26	
493			16862271.26	16862271.26	
TULA (DGE)			9476858.209	9476858.209	
518.4			9476858.209	9476858.209	
Tlahuelilpan	6155346.916		12955499.5	19110846.42	581.34039
AJACUBA (DGE)	532805.217			532805.217	
456.4	532805.217			532805.217	
AJACUBA (SMN)	2270545.485		551860.6487	2822406.133	
438.2	2270545.485		551860.6487	2822406.133	
RIO SALADO	3351996.214		12403638.85	15755635.07	
493	3351996.214		12403638.85	15755635.07	
Tlaxcoapan	30617.7284	5962223.952	35928865.49	41921707.17	1041.922044
AJACUBA (SMN)	30617.7284		7482732.619	7513350.348	
438.2	30617.7284		7482732.619	7513350.348	
RIO SALADO			16620563.59	16620563.59	
493			16620563.59	16620563.59	
TULA (DGE)		5962223.952	11825569.28	17787793.24	
518.4		5962223.952	11825569.28	17787793.24	
Tula de Allende		36132562.51	9913851.592	46046414.11	2624.011144
JASSO		24471679.02	15466.66822	24487145.69	
589.9		24471679.02	15466.66822	24487145.69	
TULA (DGE)		11485001.39	9898384.924	21383386.31	
518.4		11485001.39	9898384.924	21383386.31	
TULA (SMN)		175882.1078		175882.1078	
555.2		175882.1078		175882.1078	
Total general	53532417.72	86350073.92	92909826.24	232792317.9	10.33690025
% de lluvia	suelo				
0.04	Vertisol				
0.12	Feozem				
0.12	Rendzina				

Tabla 5.10 Volumen de recarga inducida.

Clave	Tipo	Era	area (m2)	area (km2)	Porosidad Eficaz %		Infiltración % lluvia		Vol. Suministrado
Tpl-QCgp-Ar	conglomerado Polimictico Arenisca	Terciario Neogeno	166888809.72	166.89	0.03	5.01	0.1	0.60	4540.00
KiC2	Caliza	Cretacico Superior	3536999.75	3.54	0.15	0.53	0.2	0.08	retorno al rio
Tpl-QB	Basalto	Terciario Neogeno	576105.31	0.58	0.03	0.02	0.1	0.00	4410.62
KiC2	Caliza	Cretácico Superior	557220.45	0.56	0.15	0.08	0.2	0.01	fugas por redes
Tpl-TR-TDa	Toba Riolitica-Dacitica	Terciario Neogeno	947852.98	0.95	0.03	0.03	0.1	0.00	1.31
Tpl-A-B	Andesita-Basalto	Terciario Neogeno	5899767.28	5.90	0.03	0.18	0.1	0.02	
Tpl-A-B	Andesita-Basalto	Terciario Neogeno	16906717.32	16.91	0.03	0.51	0.1	0.06	
Qal	Aluvi_n	Cuaternario	36745509.01	36.75	35.00	1286.09	0.0	51.44	
Tpl-QB	Basalto	Terciario Neogeno	403614.72	0.40	0.03	0.01	0.1	0.00	
KiC2	Caliza	Cretácico Superior	366616.19	0.37	0.15	0.05	0.2	0.01	
			232829212.75	232.83		129.38		52.23	

4.8.3. Entradas laterales provenientes de otros acuíferos (Es).

Se consideraron como fronteras subterráneas las subcuencas superficiales vecinas (Figura 5.5.); aunque se trata del mismo acuífero, se tomó como base la metodología de la ley de Darcy, considerando una longitud de acuífero de 200 m, siendo la frontera el siguiente acuífero confinado, con un volumen evaluado de entrada de 19.34 Mm³ y un volumen de salida igual a 35.10 Mm³. Al estimar la diferencia de estos, se obtuvo un valor de 15.76 Mm³/año (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 volúmenes de flujo subterráneo desde cuencas vecinas.

clave	áreas m ²	L(m)	i	T (m2/s)	Q (m3/s)	Vm ³ /año	% del flujo lateral	Entradas
1-A	289849206.00	15000.00	30.00	0.003	1215.00	37791.36	11337.41	19,336.58
2-B	136584414.00	12700.00	25.00	0.003	857.25	26663.90	7999.17	
3-C	279774006.00	20700.00	35.00	0.002	1449.00	45069.70	13520.91	Salidas
4-D	207632296.00	12500.00	50.00	0.004	2312.50	71928.00	21578.40	35,099.31
5-E	232830516.00	18000.00	10.00	0.002	270.00	8398.08	2519.42	15.763

4.8.4. Evaporación de la zona saturada (Etz)

A partir de las características de los cultivos predominantes, la profundidad promedio de las raíces y la evapotranspiración potencial en el área de estudio, se calculó que el volumen evapotranspirado en el subsuelo es de 3.24 Mm³/año, como se observa en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Evapotranspiración en el subsuelo

Cultivo	profundidad efectiva(m)	consumo anual (m3/año)	EV en la estación (mm)	% de la lámina R	área km2	Etz Mm3/año
alfalfa	1.80	0.80	1,561.77	0.60	232.79	111.74
Maíz	0.90	1.30		0.70		211.84
	1.35					3.24

4.8.5. Salida de agua por manantiales (Sm)

A partir de los volúmenes aforados en estudios de CONAGUA (2007) y Geocalli (1981), se tomó como valor representativo del flujo de agua producida por los manantiales un volumen de 19.907 Mm³/año (Tabla 5.13), más un volumen aproximado de 10.98 Mm³/año del dren al acuífero hacia el río salado de aproximadamente dando un total de 31.10 Mm³/año.

Tabla 5.13. Volúmenes por manantiales

	Manantial (L/s)	m ³ /año	Mm ³ /año
M. Cerro Colorado	600.00	18,662,400.00	18.66
M las albercas	40.00	1,244,160.00	12.44
			31.10

4.8.6. Bombeo (B)

Para conocer el volumen extraído del acuífero por bombeo, se tomó en cuenta el inventario de los pozos y norias existentes en la zona. Se consideraron los valores reportados por el REPDA CONAGUA (2007), como volúmenes concesionados, los cuales se especifican en la Tabla 5.14. El volumen calculado de bombeo de 24.99 Mm³/año.

Tabla 5.14. Volúmenes de agua subterránea extraídas por bombeo

Tipo de Consumo	Usos Subterráneos			Vol. TOTAL
	Vol. I (m ³)	Vol. II (m ³)	Vol. III (m ³)	
AGRICOLA	35,344,067.20	528,139.85	3,826.00	35,876,033.10
DOMESTICO	54,275.00	2,326.00	547.00	57,148.00
PECUARIO	4,118,689.00	483,258.85	2,809.00	4,604,756.85
SERVICIOS	66,000.00	42,555.00	470.00	109,025.00
(en blanco)	31,105,103.20	0.00	0.00	31,105,103.20
AGROINDUSTRIAL	196,200.00	0.00	0.00	196,200.00
DOMESTICO	193,549.15	139,956.35	72,000.00	405,505.50
INDUSTRIAL	111,510,180.20	110,981.20	0.00	111,621,161.00
MULTIPLES	8,485,822.60	124,081.00	98,550.00	8,708,453.60
PUBLICO URBANO	129,374.00	0.00	0.00	129,374.00
PECUARIO	772,451.74	35,852.25	109.50	808,413.49
PUBLICO URBANO	91,584,534.39	0.00	0.00	91,584,534.40
SERVICIOS	527,858.60	5,548.00	219.00	533,625.60
Total general	248,744,037.90	944,558.65	174,704.50	249,863,30.10

24.99

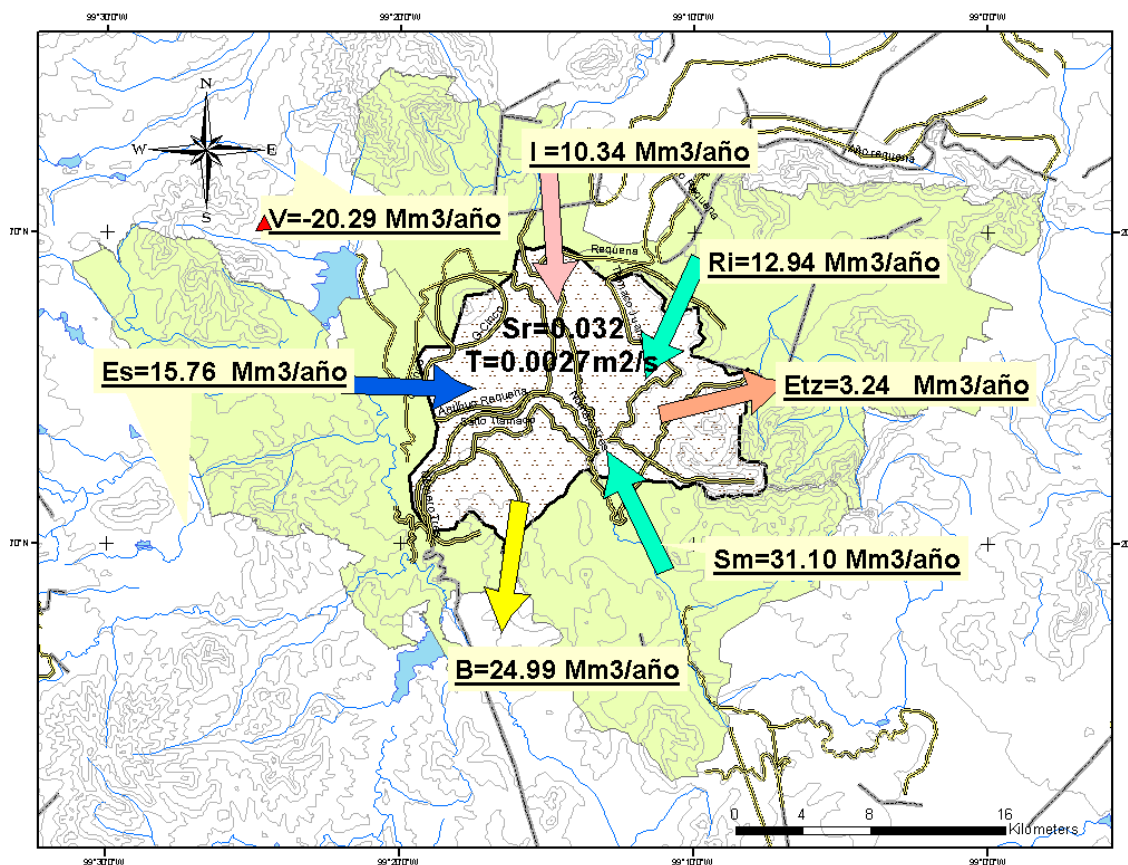


Figura 5.6 Balance se aguas subterráneas (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.8.7. Balance de agua subterránea

Se diferenciaron dos horizontes acuíferos, uno superficial y otro profundo. Como resultado del balance de aguas subterráneas, se encontró que la principal entrada de agua al acuífero del valle del Mezquital corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México, a través de canales y retornos de riego. Para este balance solo se consideró el acuífero superficial, ya que, es el de mayor influencia al Manantial Cerro Colorado. El flujo principal es de suroeste a noreste, (Figura 5.1), con niveles estáticos que van de los 10 m hasta 40 m principalmente; un $T=0.00275 \text{ m}^2/\text{s}$ y $S_r=0.032$, dando un cambio en el almacenamiento para la fracción de acuífero que comprende el Manantial Cerro Colorado de $\Delta V=-20.29 \text{ Mm}^3/\text{año}$, con una zona de mayor flujo horizontal, ya que es la transición entre los acuíferos y los manantiales existentes en el área de estudio, tal como se observa en la Figura 5.6.

4.9. Balance integrado

De la diferencia entre el ΔV superficial y ΔV subterráneo se obtuvo una disponibilidad $D=251.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$, el cual es un volumen significativo que se manifiesta como suelos anegados en algunos puntos del área de estudio.

4.10. Características de los suelos

Los cálculos de las mediciones realizadas con el Permeámetro Guelph, se basaron en el modo de combinación del reservorio, utilizando la constante $X=35.12 \text{ cm}^2$. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tablas 5.16.

La Tabla 5.15 indica los resultados para cada punto de aplicación en campo, la conductividad hidráulica y matriz de flujo potencial. Alfa es una constante que depende de las propiedades porosas del suelo, y la absorción "S", que está en función de $\Delta\theta$, donde θ indica la variación volumétrica en el contenido de agua. Los valores de conductividad hidráulica, con cambios de orden de magnitud (0.0005 cm/s a 0.001297 cm/s), se puede interpretar como la discontinuidad hidrológica, causada típicamente por la estratificación del suelo o por la presencia de flujos preferenciales por fracturas. En general se obtuvo una conductividad hidráulica superficial representativa de la zona de 0.0005 cm/s.

Tabla 5.15 los valores de conductividad hidráulica.

FIRSTS ITERATION						SECOND ITERATION					
PERFIL 1 iteration= 1.1						iteration= 1.2					
H=	5	[cm]	H=	10	[cm]	H=	5	[cm]	H=	10	[cm]
Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]
Profundidad=	20	[cm]	Profundidad=	20	[cm]	Profundidad=	45	[cm]	Profundidad=	45	[cm]
Tasa Cambio=	0.3		Tasa Cambio	0.55		Tasa Cambio	0.25		Tasa Cambio	0.5	
	0.3			0.65			0.25			0.5	
	0.3			0.55			0.25			0.5	
	0.3			0.583			0.25			0.5	
PERFIL 2 iteration= 2.1						iteration= 2.2 tepetate					
H=	5	[cm]	H=	10	[cm]	H=	5	[cm]	H=	10	[cm]
Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]
Profundidad=	23	[cm]	Profundidad=	23	[cm]	Profundidad=	57	[cm]	Profundidad=	57	[cm]
Tasa Cambio=	0.55		Tasa Cambio	1.2		Tasa Cambio	0.9		Tasa Cambio	0.7	
	0.55			1.25			0.8			0.75	
	0.45			1.2			0.75			0.7	
	0.517			1.217			0.817			0.717	
PERFIL 3 iteration= 3.1						iteration= 3.2					
H=	5	[cm]	H=	10	[cm]	H=	5	[cm]	H=	10	[cm]
Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]	Cte=	35.12	[cm ²]
Profundidad=	25	[cm]	Profundidad=	25	[cm]	Profundidad=	45	[cm]	Profundidad=	45	[cm]
Tasa Cambio=	0.25		Tasa Cambio	0.3		Tasa Cambio	0.2		Tasa Cambio	0.45	
	0.25			0.3			0.2			0.45	
	0.25			0.3			0.2			0.45	
	0.25			0.3			0.2			0.45	

Los suelos presentes en la zona se originaron a partir de aportaciones de andesitas, decitas, riolitas, cenizas y material calizo sedimentario. Se encontraron cuatro subsuelos típicos:

- a. Arcilla pesada. Poco permeable y con drenaje interior y superficial deficientes. Color en varios tonos de gris.
- b. Tepetate café amarillento o café rojizo, compacto y acomodado en forma laminar, lo que impide la penetración de las raíces y provoca un drenaje interior deficiente.
- c. Caliche fuertemente cementado, color blanco rojizo amarillento, ocasionalmente acomodado en capas con drenaje interior deficiente.
- d. Arena o migajón arenoso fino, gris o café grisáceo.

Estos suelos fueron clasificados en cuatro series, en dos grupos: uno de suelos recientes, aluviales, profundos, de texturas variables y topografía plana: el segundo con suelos mixtos y grados de desarrollo variables.

4.11. Evaluación geofísica

Las mediciones geofísicas realizadas, contribuyeron a conceptualizar la litología y estratigrafía del acuífero del manantial de Cerro Colorado, su nivel estático teórico, y la conductividad hidráulica probable, con base en las características determinadas para el acuífero.

Se realizaron 10 SEV con aperturas máximas entre los electrodos AB/2 de 100 metros, utilizando un arreglo Schlumberger para lograr una profundidad teórica de investigación de 30, 50 metros.

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), se distribuyeron como se muestra en la Figura 5.7. A partir de los datos obtenidos se realizaron 9 pseudosecciones, cuya localización se describe a continuación:

Sección 1: Del SEV9 al SEV10, localizada al noroeste del área de estudio, al este del cerro Xicuco con una longitud aproximada de 393 metros.

Pseudosección 2: SEV 10 y 8, teniendo una orientación aproximada N-S y con una longitud de 1413 metros.

Pseudosección 3: SEV 8,4,3 y 2, con una longitud de 1359 metros y orientación aproximada E-W.

Pseudosección 4: SEV 4 y 1, con 408 metros de longitud.

Pseudosección 5: SEV 1, 2 y 7, de una longitud de 3627 metros.

Pseudosección 6: SEV 5, 2 y 10, siendo esta la más larga con 3627 metros de longitud cubriendo con una orientación NW-SE el área de estudio.

Pseudosección 7: SEV 5,1 y 4 con una longitud de 2035 metros cubriendo la parte sureste del terreno hasta el centro del mismo.

Pseudosección 8: SEV 8, 7 y 6, cubriendo el centro y este del terreno, con una longitud de 2195 metros.

Pseudosección 9: SEV 6 y 5, con una longitud de 1579 metros. Estas últimas pseudosecciones cercanas al pozo MD de Cerro Colorado (Britis, y CONAGUA, 1998).

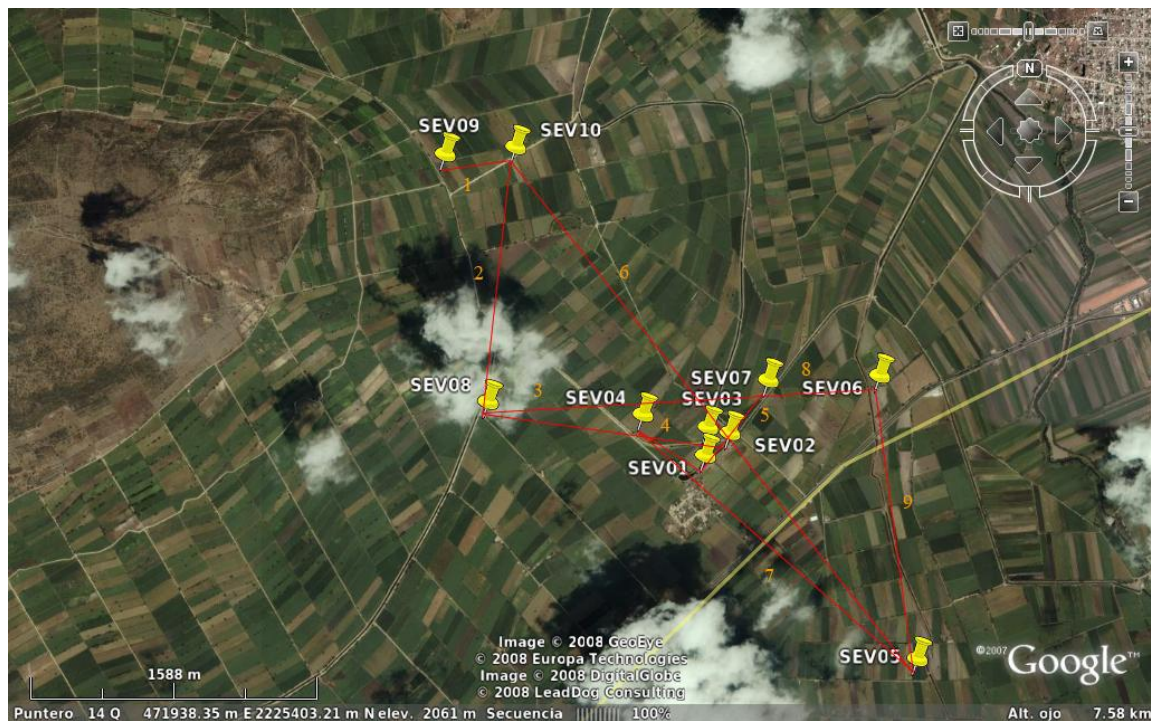


Figura 5.7. Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales y las pseudosecciones.

Se obtuvieron cuatro mapas de isorresistividades aparentes (Figura 5.8) a distintos AB para identificar la ubicación de los cambios a distintas profundidades desde una ubicación horizontal.

Los sondeos se realizaron sobre la formación Tarango, compuesta por depósitos sedimentarios de origen fluvial, intercalados con rocas volcánicas retrabajadas, con areniscas conglomeráticas hasta arcillas y calizas lacustres. La siguiente formación más cercana es San Juan, la cual está formada de rocas compuestas de basalto y andesita con intercalaciones de secuencias aluviales.

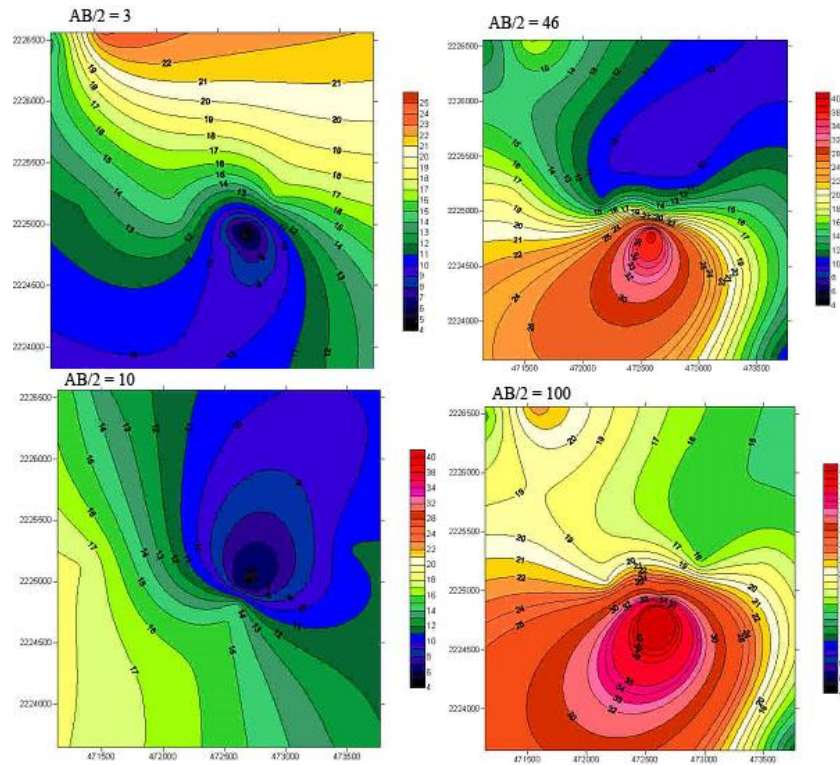


Figura 5.8. Mapas de isorresistividad con AB/2 de 3, 10, 46 y 100.

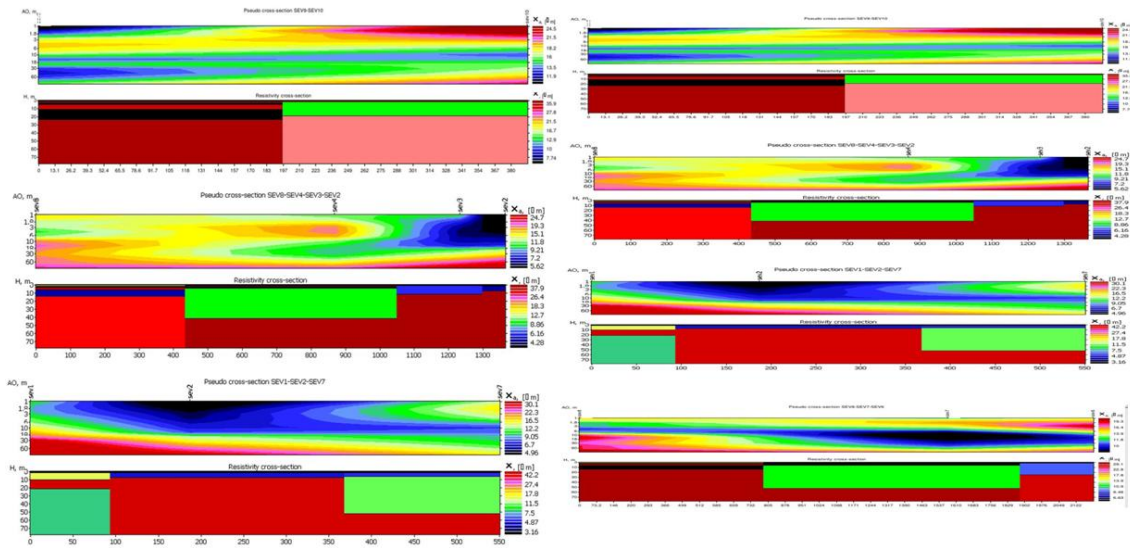


Figura 5.9. Variación de la resistividad de las Pseudosecciones geoelectricas.

Con base en las pseudosecciones realizadas (Figura 5.9), al correlacionar los datos del pozo MD de Cerro Colorado (Britis, y CONAGUA, 1998), la ubicación, relación con las unidades Tarango y San Juan (Carta Geológico-Minera, Pachuca F14-D81) y los mapas de isorresistividades se encontraron las siguientes 4 unidades geoeléctricas:

UA) Se identifica en todas las secciones, existe una variación de resistividades de 16 a 25 ohms.m. En la sección 8-4-3-2 la encontramos en toda la superficie, pudiendo interpretarse como arena fina con guijarros, arena media y grava (figura5.9).

UB) Se identifica en todas las secciones, sus resistividades varían entre 10 y 15 ohms.m. En la sección 5-1-4 la encontramos en toda la superficie y puede ser interpretada como arenas finas, limos y arcillas (figura5.9).

UC) Se identifica en todas las secciones y tiene una variación de resistividades de 5 a 10, pudiendo ser menos en algunos casos, se puede interpretar como arcillas, y en algunos casos con contenido de agua, esto se comprueba en las secciones que contengan al sev1 y sev2, ya que se realizaron muy cerca del manantial (figura5.9).

UD) Se identifica en las secciones 8-4-3-2, 4-1, 1-2-7, 5-2-10 y 5-1-4, subyace a las demás unidades, pero en las secciones 9-10, 5-2-10 la encontramos en la superficie, esto debido a que se encuentran al NW de la zona, cercanos al cerro Xicuco, perteneciente a la formación Tarango, por lo tanto se puede interpretar como areniscas conglomeráticas de origen volcánico (figura5.9).

4.12. Evaluación de la vulnerabilidad

4.12.1. Profundidad del nivel estático (D)

Las aguas someras tienen una mayor oportunidad de contaminarse, en comparación con pozos de niveles profundos. Para el área de estudio este parámetro se ajustó de acuerdo a las características de la región. Se tomaron intervalos de 21 m hasta la profundidad máxima de 43 m (Figura 5.11), correspondientes a valores de peso de entre 1 y 10. Los valores obtenidos se describen en la Tabla 5.16. Para los puntos con nivel estáticos más someros, representados en azul en la Figura 5.10, se obtuvieron los valores del índice DRASTIC más altos 34-50; por el contrario, para los niveles más profundos los valores fueron de 18-26, representados en color morado, naranja y rosa. Los valores medios se observan en color naranja claro.

Tabla. 5.16 Parámetros y clase del índice de Profundidad del nivel estático.

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	parámetro	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	parámetro	clase	Índice DRASTIC
PROFUNDIDAD DW=5	POZO-01	28	6.5	32.5	PROFUNDIDAD DW=5	pozoT05	34	5.2	26.0
	POZO-02	39	3.6	18.0		pozoT17	34	5.2	26.0
	POZO-03	29	6.8	34.0		pozoT19	39	3.6	18.0
	Manantial 01	34	5.2	26.0		pozoT07	34	5.2	26.0
	Noria1	34	5.2	26.0		pozoT09	34	5.2	26.0
	ARC	34	5.2	26.0		pozoT11	29	6.5	32.5
	pozo CFEI-09	25	9	45.0		pozoCFEI06	25	9	45.0
	pozo CFEI-11	25	9	45.0		POZO CFEII-0	29	6.8	34.0
	ARC	29	6.8	34.0		POZO CFEII-0	29	6.8	34.0
	pozo3	29	6.8	34.0		POZO CFEII-0	34	5.2	26.0
	manantial C	21	10	50.0		POZO BOJAY	39	3.6	18.0
	Noria 1	25	9	45.0		POZO LOS CA	39	3.6	18.0

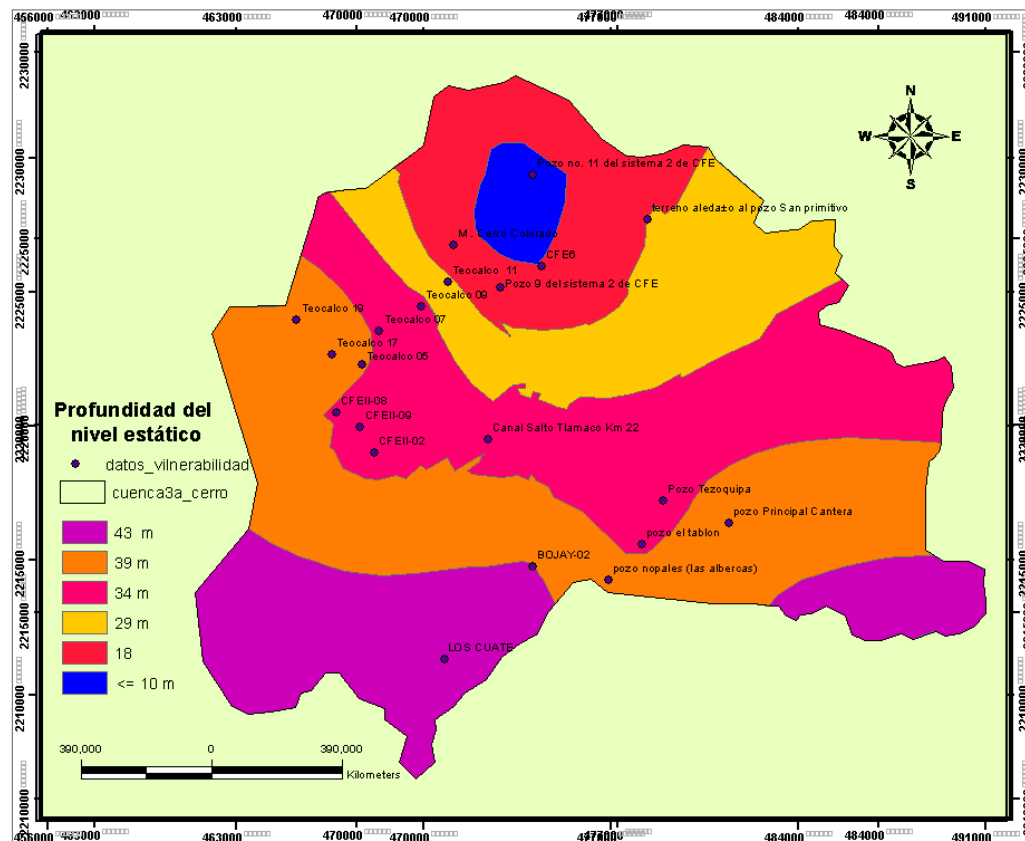


Figura 5.10. Profundidad del nivel estático (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.2. Recarga neta (R)

Para el área de estudio se modificaron las categorías (clases) de recarga netas de acuerdo con las características de la región, obtenidas a partir del cálculo de la evapotranspiración (Figura 5.11). Se obtuvieron valores clase de entre 1 a 10, con los que estimaron los valores DRASTIC contenidos en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17. Valores DRASTIC

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Recarga (mm)	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Recarga (mm)	clase	Índice DRASTIC
Recarga neta $R_w=4$	POZO-01	64	9.4	37.6	Recarga neta $R_w=4$	pozoT05	46	8.5	34.0
	POZO-02	46	8.5	34.0		pozoT17	39	8.3	33.2
	POZO-03	83	10	40.0		pozoT19	46	8.4	33.6
	Manantial 01	64	9.4	37.6		pozoT07	39	8.3	33.2
	Noria1	64	9.4	37.6		pozoT09	28	8.2	32.8
	ARC	57	9.2	36.8		pozoT11	28	8.2	32.8
	pozo CFEI-09	17	8.1	32.4		pozoCFEI06	39	8.3	33.2
	pozo CFEI-11	46	8.5	34.0		POZO CFEII-C	64	9.4	37.6
	ARC	28	8.2	32.8		POZO CFEII-C	57	9.3	37.2
	pozo3	28	8.2	32.8		POZO CFEII-C	46	8.4	33.6
	manantial C	17	8.1	32.4		POZO BOJAY	75	9.5	38.0
	Noria 1	28	8.2	32.8		POZO LOS CA	75	9.5	38.0

Las zonas que en la Figura 5.11 se visualizan en colores rosa, verde y azul claro, tienen pesos de clases entre 8.1 a 8.3 y corresponden a un índice DRASTIC entre 32.8 y 38, lo cual indica una vulnerabilidad espacial moderada. Para la parte sur y sureste representados en color verde y rosa oscuro, con clases de 9.4 a 10 e índices DRASCTIC entre 38 y 40, que indica una vulnerabilidad mayor.

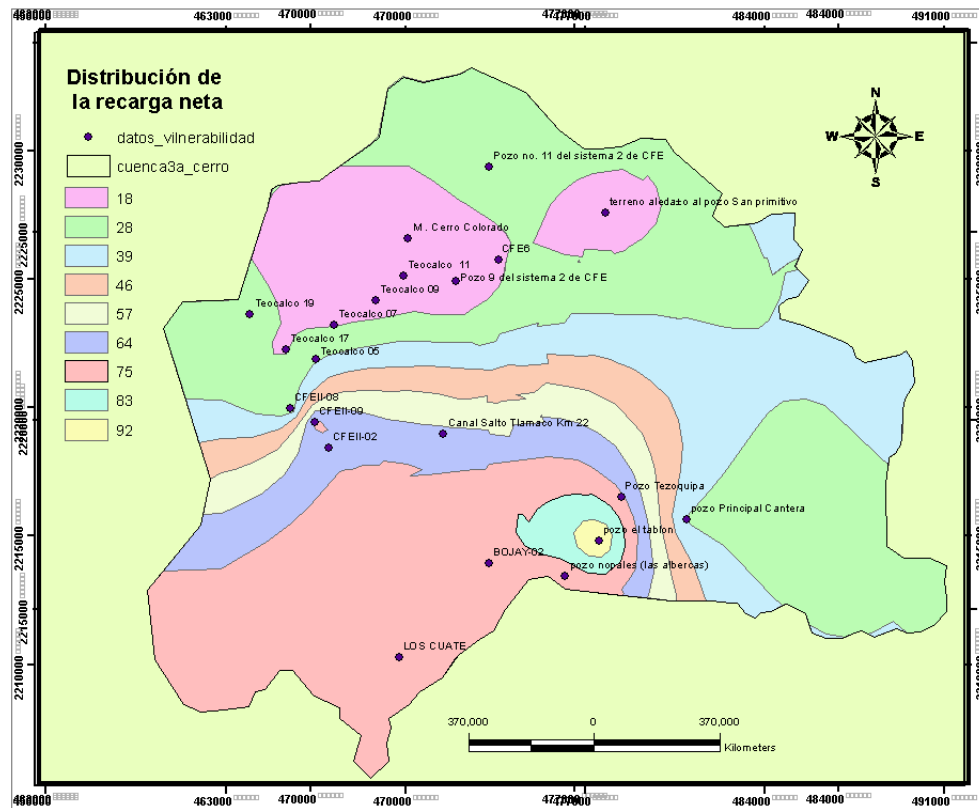


Figura 5.11. Distribución de la recarga neta (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.3. Medio acuífero (A)

La estratificación de materiales en la zona, está constituida por areniscas muy finas con alta contenido de arcilla, por lo tanto se les asignaron puntajes de 6 a 7, que es el mínimo previsto para las areniscas. En otros puntos está formada por areniscas finas a conglomerádicas mal seleccionadas con estratificaciones, que da un carácter poco atenuador debido a la facilidad del agua para fluir y la menor área relativa de los granos para entrar en contacto con el líquido; a estos se asignó un puntaje de 8 a 9.5. La Tabla 5.18 resume los puntajes otorgados y la Figura 5.12 los muestra gráficamente.

Los parámetros por clase variaron de 3 a 9 reflejando un índice DRASTIC entre 9 y 21, para las zonas que en la figura 5.13 se observa en color verdes más claros, en estas hay poca sensibilidad en este parámetro hacia la vulnerabilidad; sin embargo para las clases más altas con índices DRASTIC de 22 a 27, en colores verde oscuro ubicadas en el centro de la subcuenca, la sensibilidad hacia la vulnerabilidad cambia abruptamente.

Tabla 5.18. Valores de los índices DRASTIC correspondientes al medio acuífero

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Medio acuífero	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Medio acuífero	clase	Índice DRASTIC
Medio Acuifero Aw=3	POZO-01	17	5	15.0	Medio Acuifero Aw=3	pozoT05	19	6.2	18.6
	POZO-02	18	7	21.0		pozoT17	19	6.4	19.2
	POZO-03	19	6.5	19.5		pozoT19	19	6.5	19.5
	Manantial 01	19	6.3	18.9		pozoT07	19	6.5	19.5
	Noria1	19	6.8	20.4		pozoT09	19	6.5	19.5
	ARC	19	6.1	18.3		pozoT11	19	6.5	19.5
	pozo CFEI-09	15	4	12.0		pozoCFEI06	17	5	15.0
	pozo CFEI-11	19	6.5	19.5		POZO CFEII-C	19	6.3	18.9
	ARC	19	6.5	19.5		POZO CFEII-C	19	6.4	19.2
	pozo3	17	5	15.0		POZO CFEII-C	19	6.3	18.9
	manantial C	23	9.5	28.5		POZO BOJAY	19	6.3	18.9
	Noria 1	17	5	15.0		POZO LOS CA	23	9.5	28.5

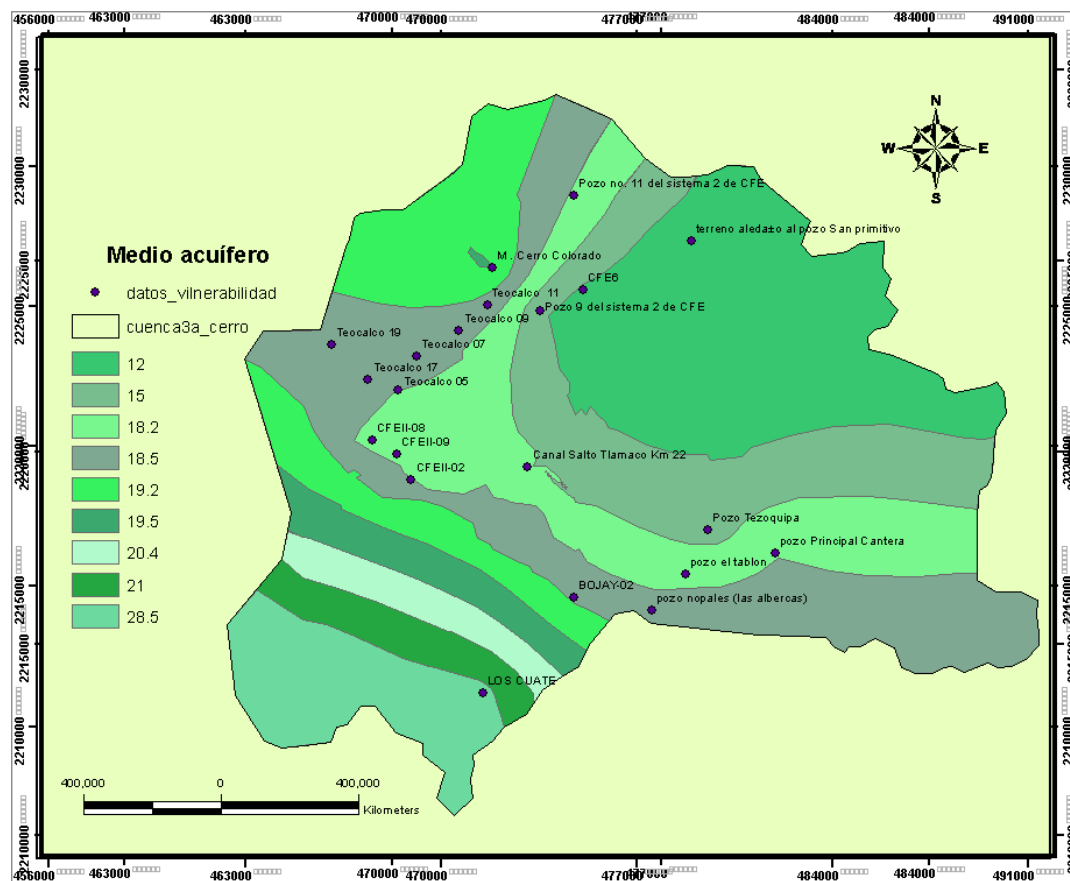


Figura 5.12. Medio acuifero (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.4. Tipo de suelo(S)

Los suelos predominantes, se componen de arenas, agregados arcillosos comprimidos, areniscas margas y arcillosas, siendo esta propiedad la que define el mayor o menor índice DRASTIC. Los puntajes asignados a las distintas unidades según el método DRASTIC, se muestran la Tabla 5.19. La Figura 5.13 corresponde al mapa obtenido.

Tabla 5.19. Índice DRASTIC correspondiente al tipo de suelo

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Material	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Material	clase	Índice DRASTIC
TIPO DE SUELO Sw-2	POZO-01	Areniscas margas	6	12.0	TIPO DE SUELO Sw-2	pozoT05	Areniscas margas	7.5	15.0
	POZO-02	Areniscas margas	7	14.0		pozoT17	Arcillas margosas	4.4	8.8
	POZO-03	Arcillas margosas	5	10.0		pozoT19	Areniscas margas	7	14.0
	Manantial 01		9	18.0		pozoT07	Areniscas margas	6.8	13.6
	Noria1	Areniscas margas	6	12.0		pozoT09	Areniscas margas	6.9	13.8
	ARC	Areniscas margas	6	12.0		pozoT11	Areniscas margas	7.3	14.6
	pozo CFEI-09	Areniscas margas	7.5	15.0		pozoCFEI06	Agregado arcilloso o	8	16.0
	pozo CFEI-11	Agregado arcilloso o	8	16.0		POZO CFEI-C	Arcillas margosas	5	10.0
	ARC	Arena	9	18.0		POZO CFEI-C	Areniscas margas	6	12.0
	pozo3	Arcillas margosas	4	8.0		POZO CFEI-C	Areniscas margas	7.2	14.4
	manantial C	Arena	9.5	19.0		POZO BOJAY	Areniscas margas	7.5	15.0
	Noria 1	Areniscas margas	7	14.0		POZO LOS CA	Agregado arcilloso o	7.8	15.6

4.12.5. Gradiente topográfico (T)

La topografía en la zona de estudio se caracteriza por ser suave (salvo en las barrancas y cerros), donde la oportunidad del agua para infiltrarse y con ella los contaminantes es moderada a alta, dependiendo del porcentaje de pendiente; en la Figura 5.14 se aprecia la distribución de estos puntajes. Dentro del gradiente topográfico predominan las pendientes del rango de 3 a 9.8, y algunas zonas de pendiente del orden de 1.5 a 8 localizadas en las barrancas, laderas en cerros y montículos, que influyen significativamente en valores de índices RASTIC de 3 a 9.8 como se observa en la Tabla 5.20.

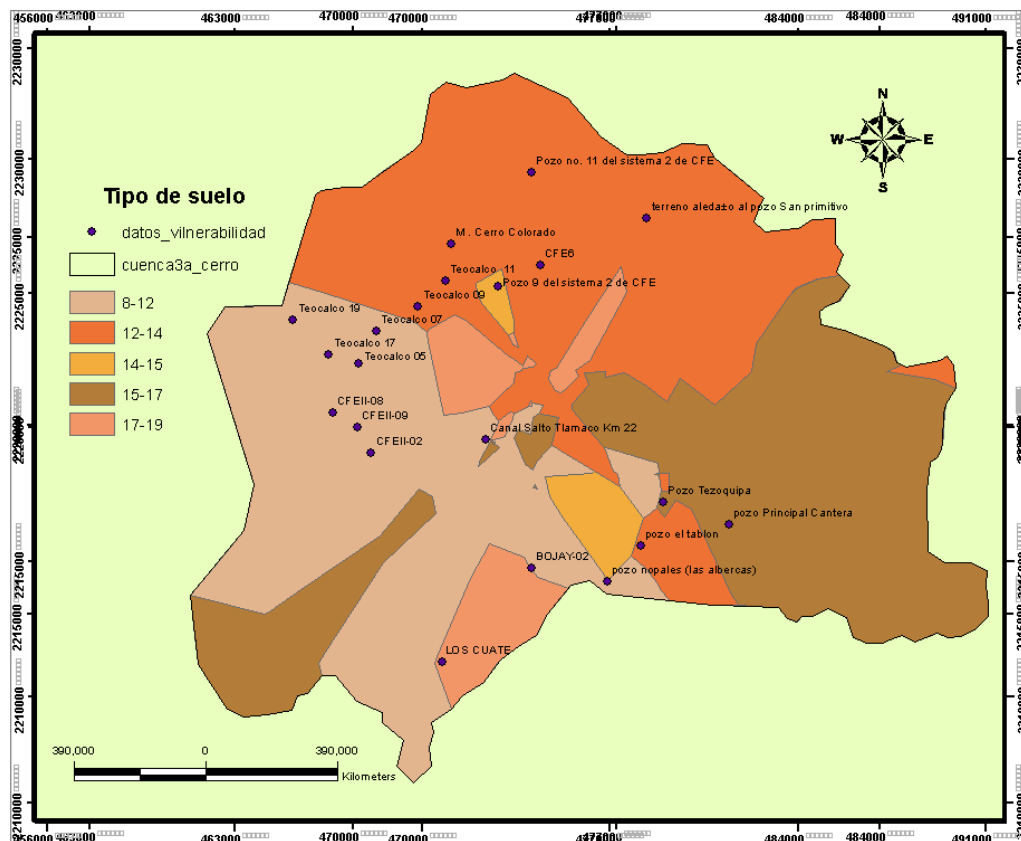


Figura 5.13. Tipo de suelo (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

Tabla. 5.20. Índice DRASTIC correspondiente a la pendiente de topográfica

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Intervalo (% pendiente)	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Intervalo (% pendiente)	clase	Índice DRASTIC
Topografía Tw=1	POZO-01	1.5	9.3	9.3	Topografía Tw=1	pozoT05	4	5.5	5.5
	POZO-02	2	8.3	8.3		pozoT17	2.5	7.4	7.4
	POZO-03	2	8.3	8.3		pozoT19	2.5	7.4	7.4
	Manantial 01	2.5	7.4	7.4		pozoT07	2.5	7.4	7.4
	Noria1	3	6.8	6.8		pozoT09	2	8.8	8.8
	ARC	2.5	7.4	7.4		pozoT11	2	8.8	8.8
	pozo CFEI-09	1.5	8.8	8.8		pozoCFEI06	3	5.5	5.5
	pozo CFEI-11	3.5	5.2	5.2		POZO CFEI-C	2.5	7.4	7.4
	ARC	3.5	5.2	5.2		POZO CFEI-C	2.5	7.4	7.4
	pozo3	5	3	3.0		POZO CFEI-C	2	8.8	8.8
	manantial C	1.5	9.8	9.8		POZO BOJAY	2	8.8	8.8
	Noria 1	2.5	7.4	7.4		POZO LOS CA	2	8.8	8.8

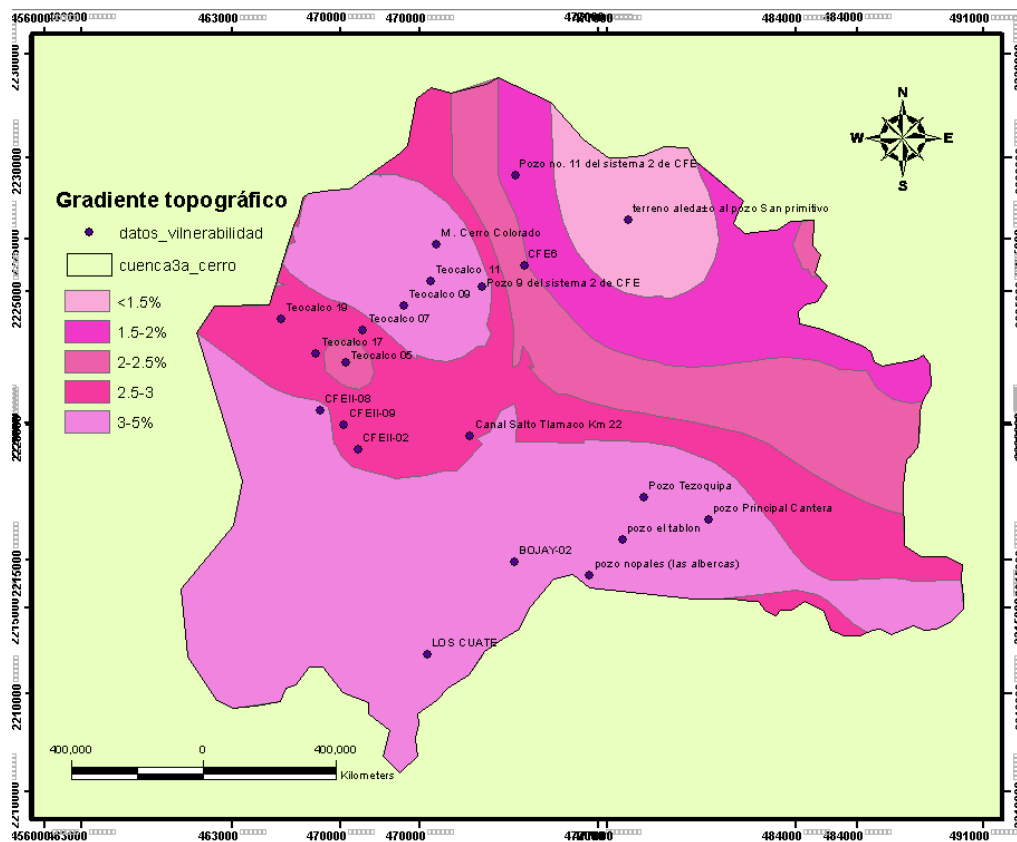


Figura 5.14. Gradiente topográfico (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.6. Impacto a la zona vadosa (I)

Este parámetro refleja la sensibilidad del material geológico que ocupa los primeros metros desde la superficie hasta el nivel estático. Las zonas que presentan menor índice son aquellas donde se encuentra la mayor proporción de arcillas en el sur-este de la subcuenca, esto, a causa de la baja permeabilidad de este tipo de depósitos. Los valores de permeabilidad se encuentran en el rango de 0.0005 cm/s a 0.001297 cm/s. La aproximación para la evaluación del impacto de la zona vadosa en el DRASTIC se presenta en la Tabla 5.21, con un peso específico (I_w) para este factor de 5 puntos (Aller et al 1985).

Tomando en cuenta la anisotropía del subsuelo se tomaron puntos de sustrato repetitivos como son lutitas, calizas, areniscas y arenas- gravas entre otros (Figura 5.15), dando los índices DRASTIC mostrados en la Tabla 5.22.

Tabla 5.21. Evaluación del factor de impacto a la zona vadosa en el DRASTIC

Parámetro	Material	Clase
Impacto a la zona vadosa LW=5	Capa confinante	1
	Limo/arcilla	2-6
	Lutita	2-5
	Caliza	2-7
	Arenisca	4-8
	Caliza estratificada, arenisca, lutita	4-8
	Arena, grava con limo, arcilla	4-8
	Ígneas/metamórficas	2-8
	Arena y grava	6-9
	Basalto	2-10
	Caliza Karstica	8-10

Tabla 5.22. Valores del Índice DRASTIC correspondientes a la zona vadosa

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Material	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Material	clase	Índice DRASTIC
Impacto a la zona vadosa LW=5	POZO-01	Caliza estratificada, arenisca,	6	30.0	Impacto a la zona vadosa LW=5	pozoT05	Caliza estratificada, arenisca,	6	30.0
	POZO-02	Lutita	4	20.0		pozoT17	Caliza estratificada, arenisca,	6.5	32.5
	POZO-03	Caliza estratificada, arenisca,	7	35.0		pozoT19		7.5	37.5
	Manantial 01	Caliza estratificada, arenisca,	6	30.0		pozoT07	Caliza estratificada, arenisca,	7.8	39.0
	Noria1	Caliza y Arenisca	5.5	27.5		pozoT09	Caliza estratificada, arenisca,	7	35.0
	ARC	Caliza estratificada, arenisca,	7	35.0		pozoT11	Caliza estratificada, arenisca,	7.8	39.0
	pozo CFEI-09	Caliza estratificada, arenisca,	8	40.0		pozoCFEI06	Arena, grava con limo, arcilla	8	40.0
	pozo CFEI-11	Arena, grava con limo, arcilla	7.5	37.5		POZO CFEII-09	Caliza estratificada, arenisca,	7.5	37.5
	ARC	Arena, grava con limo, arcilla	7	35.0		POZO CFEII-02	Lutita	1.56	7.8
	pozo3	Caliza estratificada, arenisca,	6	30.0		POZO CFEII-08	Caliza estratificada, arenisca,	7.8	39.0
	manantial C	Arena y grava	9	45.0		POZO BOJAY-2	Caliza estratificada, arenisca,	7.9	39.5
	Noria 1	Caliza estratificada, arenisca,	7.7	38.5		POZO LOS CAUT	Caliza estratificada, arenisca,	7.7	38.5

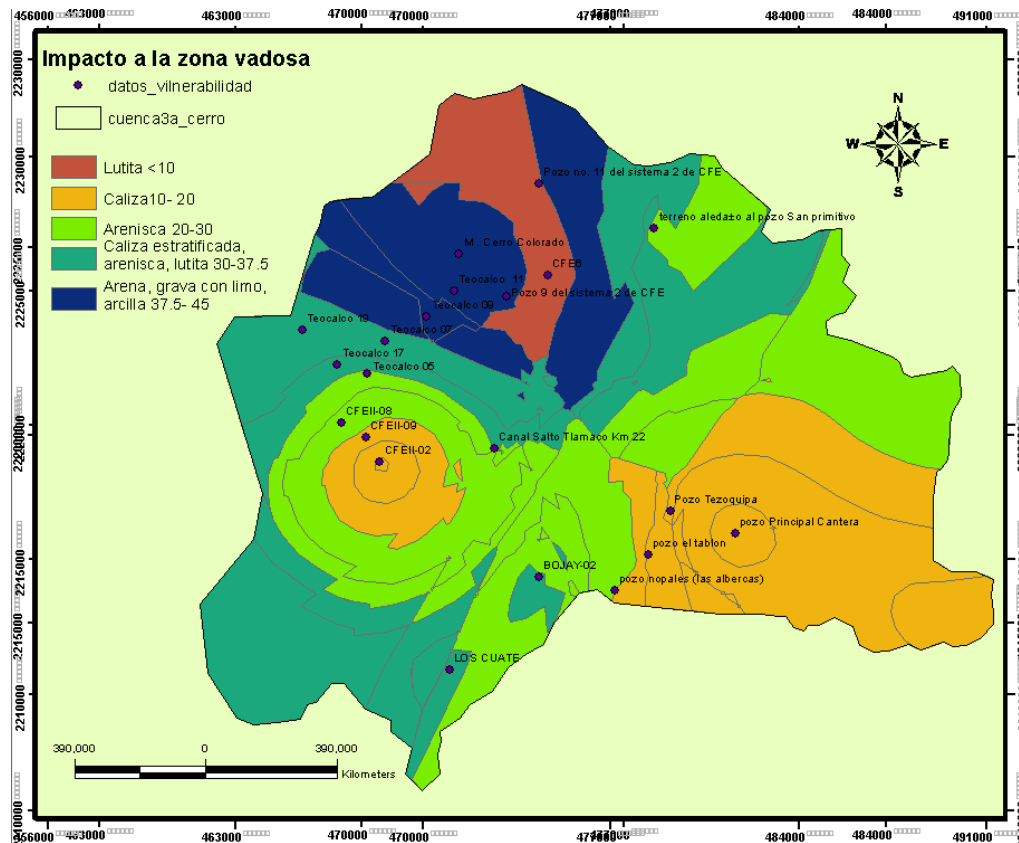


Figura 5.15. Impacto a la zona vadosa (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.7. Conductividad hidráulica (C)

Los valores de los intervalos utilizados en el acuífero se ajustaron a los resultados de las pruebas realizadas en los acuíferos, con las cuales se obtuvo el valor de la conductividad hidráulica correspondiente, que dieron como resultados los índices DRASTIC descritos en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23. Valores del Índice DRASTIC correspondientes a la conductividad hidráulica

Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Intervalo (m/s)	clase	Índice DRASTIC	Parámetro	PUENTA DE MUESTREO	Intervalo (m/s)	clase	Índice DRASTIC
Conductividad hidráulica $Cw=3$	POZO-01	$4,7 \times 10^{-4}$	5	15.0	Conductividad hidráulica $Cw=3$	pozoT05	$4,7 \times 10^{-4}$	5.22	26.1
	POZO-02	$4,7 \times 10^{-4}$	5.5	16.5		pozoT17	$4,7 \times 10^{-4}$	5.22	26.1
	POZO-03	$4,7 \times 10^{-4}$	5.7	17.1		pozoT19	$4,7 \times 10^{-5}$	5.22	26.1
	Manantial 01	$4,7 \times 10^{-4}$	5.5	16.5		pozoT07	$4,7 \times 10^{-6}$	5.4	27.0
	Noria1	$4,7 \times 10^{-4}$	5	15.0		pozoT09	$4,7 \times 10^{-7}$	5.58	27.9
	ARC	$4,7 \times 10^{-4}$	6.7	20.1		pozoT11	$4,7 \times 10^{-8}$	5.34	26.7
	pozo CFEI-09	$9,5 \times 10^{-4}$	15.5	46.5		pozoCFEI06	1.4×10^{-4}	3.3	16.5
	pozo CFEI-11	$9,5 \times 10^{-4}$	8.8	26.4		POZO CFEII-C	$4,7 \times 10^{-8}$	5.52	27.6
	ARC	$9,5 \times 10^{-4}$	7.7	23.1		POZO CFEII-C	$4,7 \times 10^{-9}$	5.34	26.7
	pozo3	$4,7 \times 10^{-4}$	6	18.0		POZO CFEII-C	$4,7 \times 10^{-10}$	5.1	25.5
	manantial C	$9,5 \times 10^{-4}$	9.8	29.4		POZO BOJAY	7×10^{-5}	1.98	9.9
	Noria 1	$9,5 \times 10^{-4}$	6.3	18.9		POZO LOS CA	1.4×10^{-4}	3.3	16.5

En la tabla 5.23 se muestran los valores obtenidos con la metodología descrita, para conductividades hidráulicas del orden de 7×10^{-5} se obtuvieron índices de menor peso 9.9, como se observa en la Figura 5.16, lo cual implica una baja sensibilidad del parámetro en estos puntos; sin embargo para los puntos con conductividades hidráulicas del orden de 4.7×10^{-4} a 9.5×10^{-4} , se tienen pesos que son los más representativos del índice DRASTIC.

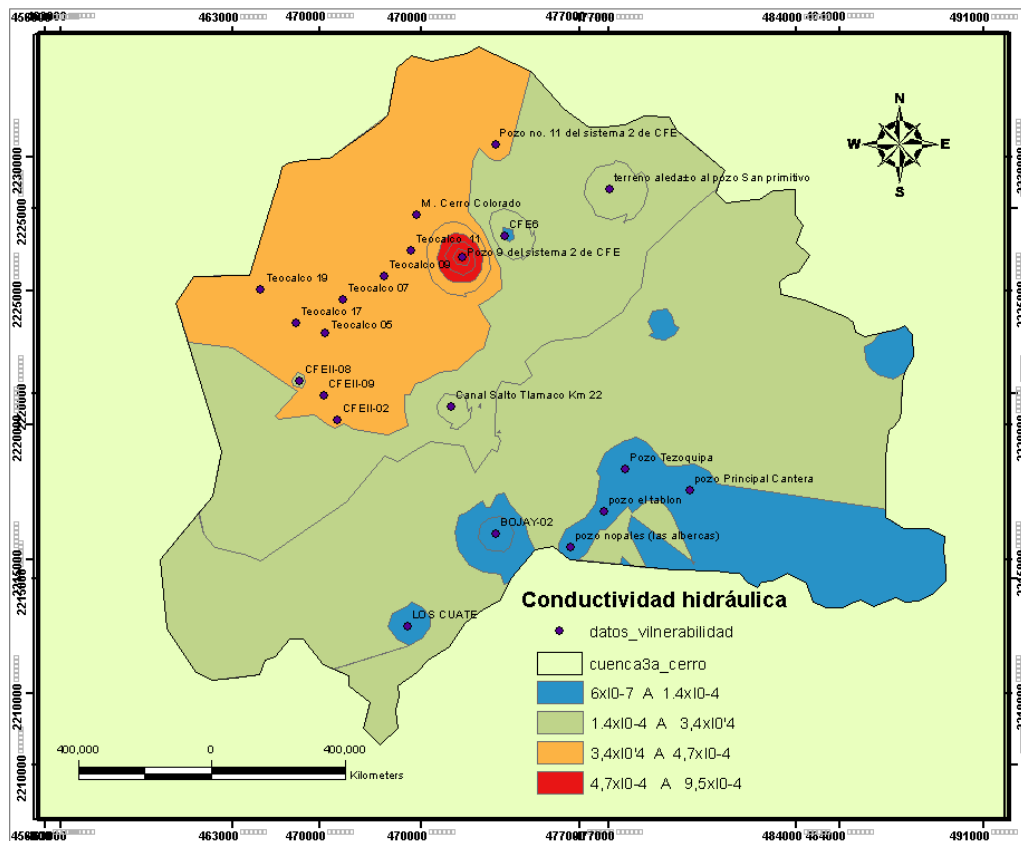


Figura 5.16. Conductividad hidráulica (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.8. Mapa de vulnerabilidad total

La distribución espacial de la vulnerabilidad obtenida para el área de estudio (Figuras 5.19 y 5.20), está condicionada principalmente por la litología. Los valores de vulnerabilidad más bajos (Tabla 5.24), corresponden al sur, centro y suroeste de la subcuenca; los valores más elevados corresponden al noroeste de la subcuenca (alrededores del Manantial Cerro Colorado). Otros factores que también influyeron en el grado de vulnerabilidad fueron la profundidad del nivel freático, la composición mineralógica y la conductividad hidráulica. Además merece destacarse que, en algunas zonas con vulnerabilidad moderada, se sitúan cerca de las localidades en donde se desarrollan actividades potencialmente contaminantes. Los valores calculados corresponden a niveles moderado, alto y muy alto. El acuífero libre-semiconfinado, presenta vulnerabilidad alta, lo cual concuerda con los indicios de contaminación reportados por BGS CONAGUA (1998), como consecuencia de las intensas actividades antropogénicas que se desarrolla sobre este, desde hace más de 100 años.

Tabla 5.24 Pesos y clasificación de la vulnerabilidad.

PUNTO_DE_M	D	R	A	S	T	I	C	V	Clasificación de la V
Pozo Tezoquipa	32.5	37.6	15.0	12.0	9.3	30.0	15.0	151.4	MODERADA
pozo Principal Cantera	18.0	34.0	21.0	14.0	8.3	20.0	16.5	131.8	BAJA
pozo el tablon	34.0	40.0	19.5	10.0	8.3	35.0	17.1	163.9	ALTA
pozo nopales (las albercas)	26.0	37.6	18.9	18.0	7.4	30.0	16.5	154.4	MODERADA
Fam Gonzáles Lopúz	26.0	37.6	20.4	12.0	6.8	27.5	15.0	145.3	MODERADA
Canal Salto Tlamaco Km 22	26.0	36.8	18.3	12.0	7.4	35.0	20.1	155.6	MODERADA
Pozo 9 del sistema 2 de CFE	45.0	32.4	12.0	15.0	8.8	40.0	46.5	199.7	MUY ALTA
Pozo no. 11 del sistema 2 de CFE	45.0	34.0	19.5	16.0	5.2	37.5	26.4	183.6	MUY ALTA
Canal Principal Requena (compuerta 6)	34.0	32.8	19.5	18.0	5.2	35.0	23.1	167.6	ALTA
terreno aledaño al pozo San primitivo	34.0	32.8	15.0	8.0	3.0	30.0	18.0	140.8	MODERADA
M. Cerro Colorado	50.0	32.4	28.5	19.0	9.8	45.0	29.4	214.1	EXTREMA
terreno del Sr. Juan Cardenas	45.0	32.8	15.0	14.0	7.4	38.5	18.9	171.6	ALTA
Teocalco 05	26.0	34.0	18.6	15.0	5.5	30.0	26.1	155.2	MODERADA
Teocalco 17	26.0	33.2	19.2	8.8	7.4	32.5	26.1	153.2	MODERADA
Teocalco 19	18.0	33.6	19.5	14.0	7.4	37.5	26.1	156.1	MODERADA
Teocalco 07	26.0	33.2	19.5	13.6	7.4	39.0	27.0	165.7	ALTA
Teocalco 09	26.0	32.8	19.5	13.8	8.8	35.0	27.9	163.8	ALTA
Teocalco 11	32.5	32.8	19.5	14.6	8.8	39.0	26.7	173.9	ALTA
CFE6	45.0	33.2	15.0	16.0	5.5	40.0	16.5	171.2	ALTA
CFEII-09	34.0	37.6	18.9	10.0	7.4	37.5	27.6	173.0	ALTA
CFEII-02	34.0	37.2	19.2	12.0	7.4	7.8	26.7	144.3	MODERADA
CFEII-08	26.0	33.6	18.9	14.4	8.8	39.0	25.5	166.2	ALTA
BOJAY-02	18.0	38.0	18.9	15.0	8.8	39.5	9.9	148.1	MODERADA
LOS CUATE	18.0	38.0	28.5	15.6	8.8	38.5	16.5	163.9	ALTA

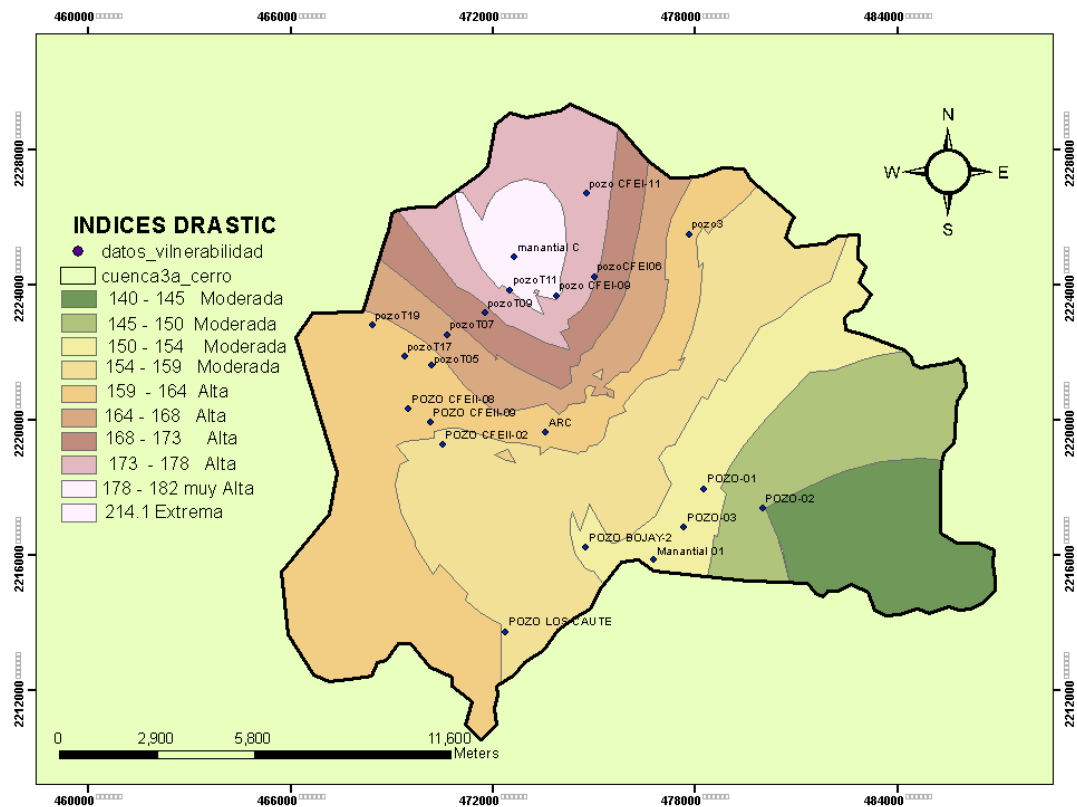


Figura 5.17. Índices DRASTIC (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

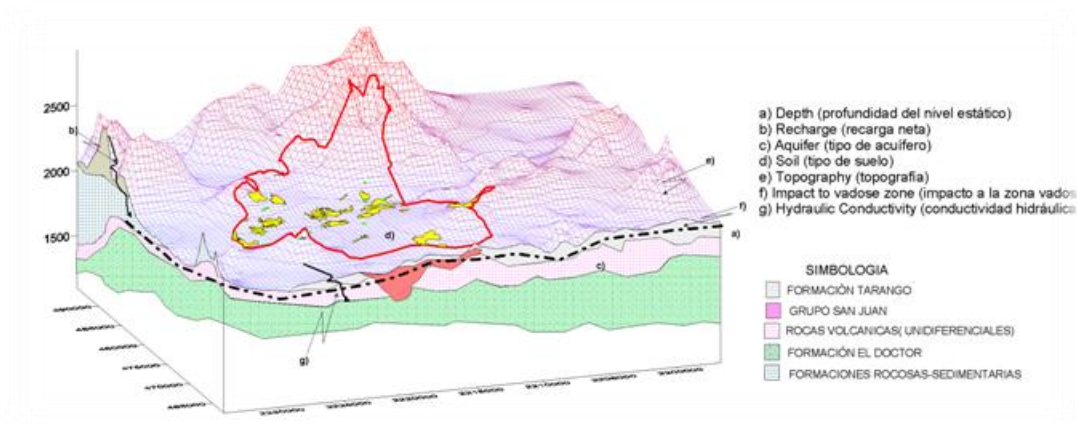


Figura 5.18. Aspecto y distribución de los parámetros DRASTIC (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.9. Índice de contaminación potencial (IC_DRSTIC)

Los parámetros bacteriológicos utilizados en la estimación de IC-DRASTIC, se describen en las Tablas 5.25, 5.26 y los valores obtenidos del índice se encuentran en la Tabla 5.27. La distribución espacial del índice mostrado en la Figura 5.19, muestra que en la zona predominan valores entre 40 y 70% de susceptibilidad a la contaminación (Figura 5.19) principalmente en los alrededores del Manantial Cerro Colorado. Esto indica que el acuífero no será capaz de soportar todo tipo de atenuación sobre él, si no se toman medidas para evitar su contaminación.

Tabla 5.25 Base de datos recopilados de muestreos.

x	y	PUNTO_DE_M	PH	T (°C)	Ce μS/cm	SDT (mg/L)	CO3 2- (mg/L)	HCO3- (mg/L)	SO4(mg/L)	Cl(mg/L)	NO3 (mg/L)	Na(mg/L)	K(mg/L)	Ca(mg/L)	Mg(mg/L)
478239	2217962	Pozo Tezoquipa	7.3	20.5	2195.0	1093.3	48.0	552.0	244.6	673.8	20.9	133.7	25.5	29.0	17.0
479985	2217372	pozo Principal Cantera	7.1	25.8	2386.7	1209.0	24.0	338.0	290.8	84.3	22.2	127.2	28.0	28.0	16.0
477653	2216814	pozo el tablon	7.0	19.9	4186.7	2176.7	64.0	546.0	263.1	279.0	59.4	295.6	47.0	34.0	13.0
476763	2215862	pozo nopales (las albercas)	7.1	24.8	4460.0	2324.3	128.0	624.0	122.0	276.5	56.0	295.6	47.0	24.0	9.0
478279	2217932	Fam Gonzáles Lopúz	7.1	21.6	4606.7	2420.0	92.0	562.0	251.7	358.8	82.2	398.6	39.7	40.0	30.0
473535	2219625	Canal Salto Tlamaco Km 22	7.3	22.2	1854.3	928.3	56.0	318.0	111.1	75.8	102.5	967.5	64.7	11.0	5.0
473861	2223673	Pozo 9 del sistema 2 de CFE	7.0	19.4	1643.3	823.3	76.0	528.0	276.1	184.7	14.8	195.0	29.7	26.0	13.0
474749	2226701	Pozo no. 11 del sistema 2 de CFE	7.2	20.3	3130.0	1604.7	60.0	450.0	1220.9	181.9	15.3	183.0	27.8	78.8	90.0
473866	2223698	Canal Principal Requena (compuerta 6)	7.6	19.2	1480.0	735.0	44.0	280.0	2492.2	122.9	163.5	555.0	13.2	13.1	16.9
477813	2225505	terreno aledante al pozo San primitivo	7.5	21.4	3623.3	1868.7	96.0	404.0	347.8	230.9	56.5	184.6	60.5	27.0	15.0
472603	2224820	M . Cerro Colorado terreno del Sr. Juan	7.7	19.2	3613.3	1865.3	68.0	444.0	1750.1	164.0	56.4	208.6	37.5	90.0	45.0
474749	2226701	cardenas	7.1	21.6	4606.7	2420.0	92.0	562.0	251.7	358.8	102.8	266.3	21.1	40.0	30.0
470160	2221627	Teocalco 05	7.4	21.5	2120.0	1327.0	253.0	707.0	144.0	225.0	75.0	268.0	23.0	78.0	63.0
469362	2221876	Teocalco 17	7.3	18.0	1839.0	1167.0	122.0	580.0	200.0	172.0	47.0	206.0	20.0	134.0	30.0
468414	2222797	Teocalco 19	7.2	19.5	1742.0	1102.0	40.0	487.0	210.0	169.0	44.0	176.0	31.0	101.0	47.0
470631	2222509	Teocalco 07	7.3	20.7	1860.0	1157.0	104.0	550.0	216.0	165.0	45.0	195.0	42.0	113.0	40.0
471741	2223162	Teocalco 09	7.3	21.0	1999.0	1207.0	138.0	649.0	122.0	225.0	67.0	206.0	26.0	114.0	54.0
472478	2223835	Teocalco 11	7.3	22.0	1724.0	1077.0	311.0	684.0	128.0	166.0	55.0	203.0	32.0	87.0	38.0
474988	2224245	CFE6	7.3	20.0	1431.0	1073.0	97.0	412.0	270.0	83.0	37.0	170.0	25.0	94.0	19.0
470121	2219947	CFEII-09	7.2	23.1	1869.0	1199.0	25.0	466.0	213.0	231.0	51.0	207.0	30.0	113.0	38.0
470493	2219266	CFEII-02	7.3	24.6	2020.0	1297.0	287.0	580.0	193.0	227.0	64.0	312.0	23.0	72.0	27.0
469471	2220319	CFEII-08	7.1	22.2	2240.0	1357.0	104.0	656.0	155.0	284.0	51.0	244.0	23.0	154.0	40.0
474735	2216216	BOJAY-02	7.2	23.8	835.0	1003.0	26.0	218.0	136.0	53.0	26.0	62.0	27.0	62.0	23.0
472365	2213725	LOS CUATE	7.3	23.8	1061.0	1115.0	23.0	281.0	124.0	107.0	37.0	88.0	23.0	67.0	33.0

Tabla 5.26 Calidad del agua (bacteriológico).

x	y	NOMBRE	Total Bacteria count (55 °C)	Total Bacteria count (37 °C)	Total Bacteria count (22 °C)	Total Bacteria count (5 °C)	Faecal coliforms	E.Coli
			UFC/100 mL*, UFC/g**	UFC/100 mL*, UFC/g**	UFC/100 mL*, UFC/g**	UFC/100 mL*, UFC/g**	UFC/100 mL*, UFC/g**	UFC/100 mL*, UFC/g**
473861.00	2223673.00	Pozo no. 9 del sistema 2 de CFE	2.2	6.6	4.3	2.6	6.4	6.4
474749.00	2226701.00	Pozo no. 11 del sistema 2 de CFE	2	3	2	1.5	2.6	2.5
476745.8147	2226897.15	Pozo Miravalle	ND	146.3	66.7	19.0	5.3	ND
476889.38	2225698.11	Pozo 5 de mayo	ND	111.7	77.7	17.7	6.3	ND
472603.00	2224820.00	Cerro Colorado	ND	105.0	53.7	14.7	1.7	ND
476763.00	2215862.00	Manantial Pudehe	ND	200.0	95.0	15.7	1.3	ND
475434.8828	2223702.03	Canal Principal Requena	ND	2566.7	110.0	98.7	22.0	19.7
472218.0164	2227610.81	Canal de Riego (Sr. Justino Mota)	ND	41.0	27.3	0.0	21.3	15.3
x	y	NOMBRE	Enterococci UFC/100 mL*, UFC/g**	clostridium spores UFC/100 mL*, UFC/g**	F* (Male Specific) UFP/mL*, UFP/g	Somatics UFP/mL*, UFP/g	Giardia spp Cyste/L*, Cyste/g**	Helminth eggs He/L*, He/g**
473861.00	2223673.00	Pozo no. 9 del sistema 2 de CFE	5.0	4.1	2.8	4.9	2000	13.8
474749.00	2226701.00	Pozo no. 11 del sistema 2 de CFE	3.9	1.7	ND	ND	ND	0.1
476745.8147	2226897.15	Pozo Miravalle	0.0	1.2	ND	1.7	ND	ND
476889.38	2225698.11	Pozo 5 de mayo	0.0	3.6	ND	8.3	ND	ND
472603.00	2224820.00	Cerro Colorado	0.3	1.2	ND	0.3	ND	ND
476763.00	2215862.00	Manantial Pudehe	0.0	0.0	ND	0.0	ND	ND
475434.8828	2223702.03	Canal Principal Requena	11.7	3.6	0.0	21.0	0.0	0.0
472218.0164	2227610.81	Canal de Riego (Sr. Justino Mota)	0.0	14.3	0.0	0.0	0.0	0.07

Tabla 5.27 índice de contaminación potencial IC-DRASTIC

PUNTO_DE_M	V DRASTIC	IC DRASTIC	PUNTO_DE_M	V DRASTIC	IC DRASTIC
Pozo Tezoquipa	151.4	65	Teocalco 07	165.7	65
pozo Principal Cantera	131.8	50	Teocalco 09	163.8	64
pozo el tablon	163.9	72	Teocalco 11	173.9	78
pozo nopales (las albercas)	154.4	62	CFE6	171.2	70
Canal Salto Tlamaco Km 22	155.6	53	CFEII-09	173.0	75
Pozo 9 del sistema 2 de CFE	199.7	92	CFEII-02	144.3	63
Pozo no. 11 del sistema 2 de CFE	183.6	84	CFEII-08	166.2	71
terreno aledaño al pozo San primitivo	140.8	58	BOJAY-02	148.1	60
M. Cerro Colorado	214.1	100	LOS CUATE	163.9	73
Teocalco 05	155.2	58	TULA	163.9	73
Teocalco 17	153.2	47	ATOTONILCO	131.8	46
Teocalco 19	156.1	59	AJACUBA	154.0	51
			TLAXCOZPZN	154.0	51

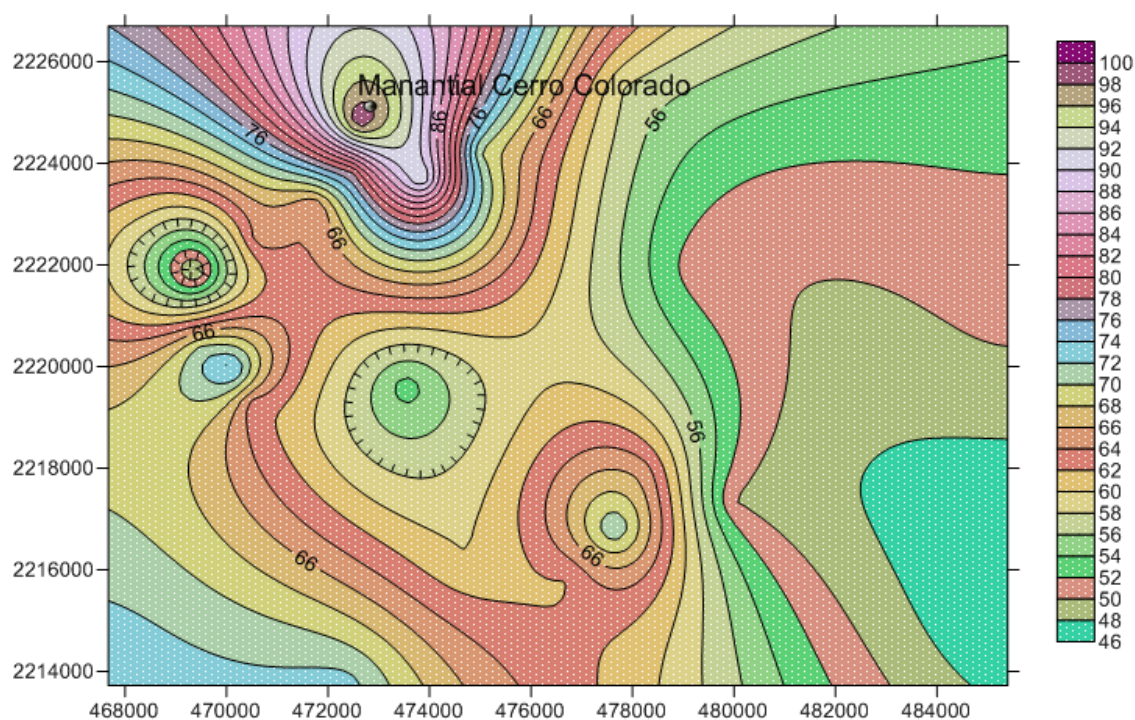


Figura 5.19. Índices IC DRASCTIC (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.12.10. Sensibilidad de parámetros del método DRASTIC

Luego de realizar el ajuste de los parámetros, los de mayor variación corresponden, como era de esperarse, a la profundidad y zona vadosa (Tabla 5.28), además hay una mejor correlación entre la variabilidad de éstos y su influencia esperada. La menor variabilidad corresponde al medio acuífero y conductividad hidráulica, ésta última originalmente se encontraba sobrevaluado.

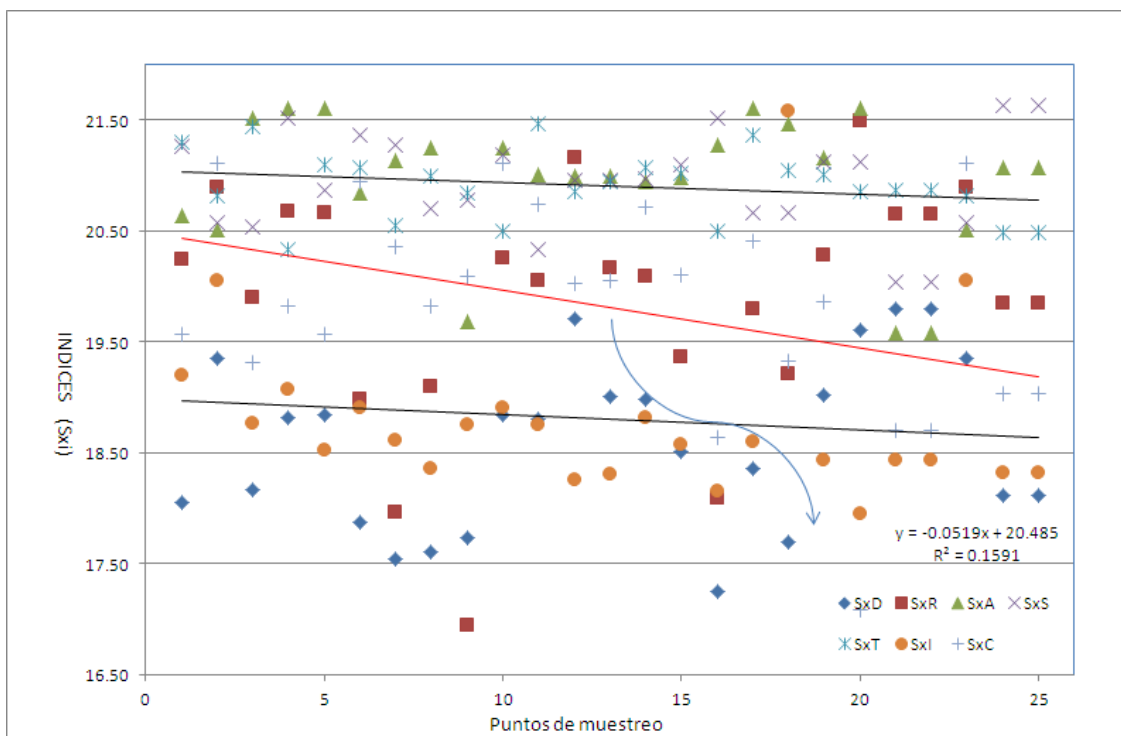
Tabla 5.28 Sensibilidades de los parámetros DRASTIC

Estadística	SxD	SxR	SxA	SxS	SxT	SxI	SxC
Minimo	18.47	19.76	20.51	20.58	20.82	19.62	20.60
Maximo	17.25	16.95	19.58	20.04	20.33	17.96	17.09
Media	18.80	20.09	21.07	20.96	20.86	18.60	19.86
Varianza	18.13	14.88	19.48	20.42	21.06	18.12	16.13
Desviación estandar	20.87	20.57	21.03	21.18	21.32	20.86	20.67

En teoría los parámetros de profundidad e impacto a la zona vadosa tienen mayor peso; sin embargo, utilizando la escala original, la profundidad y la topografía, tienen los menores pesos y sólo la zona vadosa tiene mayor peso.

La gráfica de frecuencia mostró que los índices que más prevalecieron fueron los valores de la zona vadosa y profundidad del nivel estático, en la Gráfica de 5.7 y la Tabla 5.27, se comparan la variabilidad, pesos y porcentaje asignados a cada parámetro. La profundidad

y la conductividad hidráulica se encuentran sobrestimadas, el resto de los parámetros están subestimados. Para cada parámetro, después de reescalar los rangos originales, los pesos calculados se aproximaron más a los asignados. El peso evaluado para el impacto a la zona vadosa es el mayor, seguido de la profundidad del nivel estático. El parámetro con menor peso es el gradiente topográfico. La conductividad hidráulica también tiene poco peso en la vulnerabilidad, con este ajuste se calcularon nuevamente los pesos de los parámetros y se encontró una buena correlación entre la media de pesos y los pesos teóricos, esto se observa en el orden decreciente y el grado de influencia de cada parámetro en la vulnerabilidad.



Grafica 5.7 frecuencias de sensibilidad de los parámetros DRASTIC.

4.13. *Perímetro de protección del Manantial Cerro Colorado (PPM).*

Para el trazado de un perímetro de protección, varios trabajos discuten la sensibilidad de los métodos, sobre todo, en el sentido de las dificultades que puede causar la heterogeneidad de los acuíferos, sumada a la falta de información precisa (Hirata, 1994). Los principales factores de influencia son el gradiente regional, la transmisividad, la anisotropía y la heterogeneidad de la conductividad hidráulica, la recarga inducida de los ríos, la porosidad efectiva y los efectos de la recarga por lluvias en las dimensiones y características del acuífero (Lerner, 1992).

En este caso, con los resultados obtenidos en los mapas de vulnerabilidad se delimito el perímetro conforme al contorno de la isolínea de vulnerabilidad alta, tomando como alternativas la delimitación de la urbanización, las fosa sépticas, rellenos sanitario, calidad el agua de riego en parcelas cercanas al manantial, el pastoreo entre otros. En la Figura 5.20 se muestra un área de 11.32 km² correspondiente a un radio de 5 km, que equivalen a 48.6 % del área total, como el área de protección y las direcciones de flujo tanto superficial como subterráneo. Esta información será útil en la determinación de las políticas ambientales del manejo que garantice la sustentabilidad del recurso para los diferentes actividades en las que se emplea.

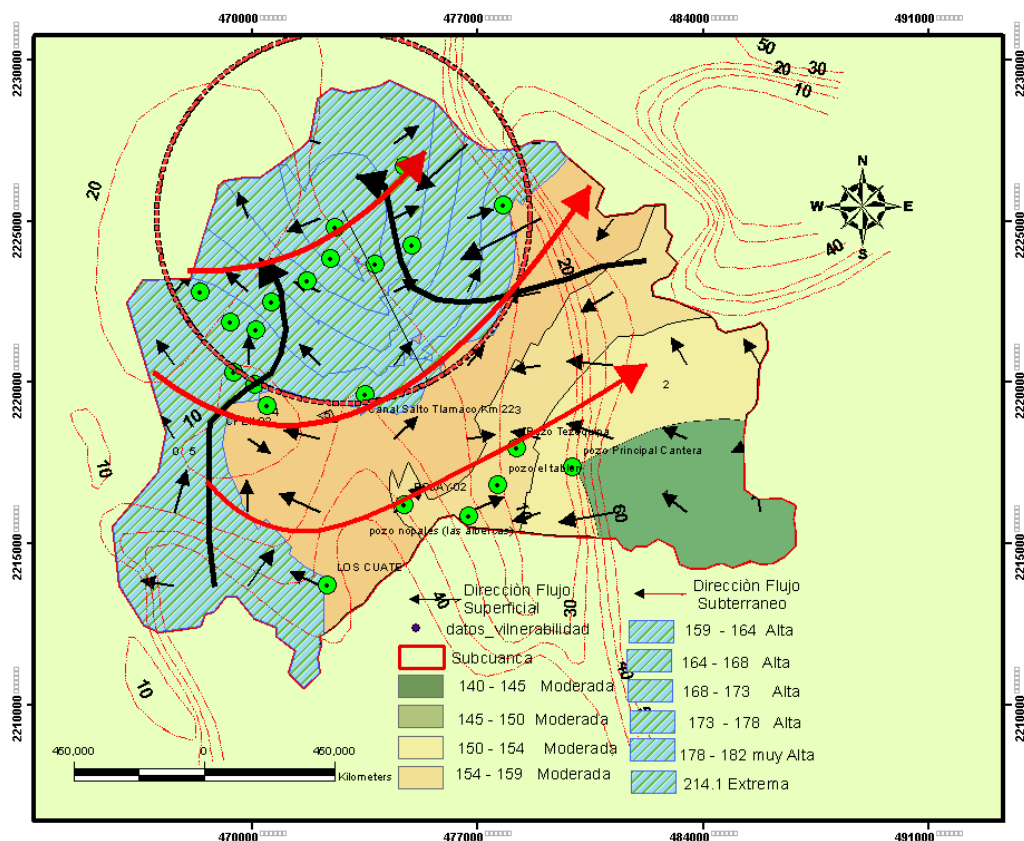


Figura 5.20. Perímetro de Protección del Manantial Cerro Colorado (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

4.14. Análisis geoquímico

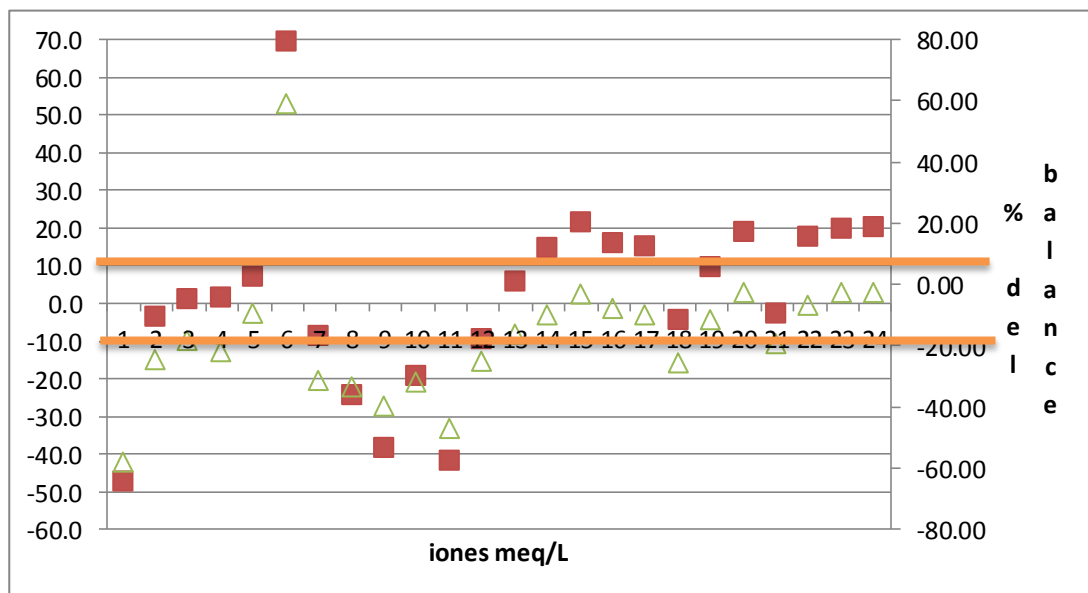
En los análisis de los iones mayores, se determinaron los parámetros químicos descritos en la Tabla 5.25. Los resultados del balance iónico se muestran en la Tabla 5.29 y los porcentajes de cada componente del balance iónico están en la Tabla 5.30. Algunas muestras presentan valores de EBI fuera del rango óptimo de $\pm 10 \%$ (líneas rojas en la Gráfica 5.8). Los valores EBI muy bajos ($< -10 \%$) son en la mayoría de los casos, muestras ácidas en las que no se consideró la presencia de metales, sobre todo Al y Fe. La acidez y la disolución de metales son normalmente causadas por rápida e intensa oxidación de pirritas (FeS_2) y otros sulfuros en los acuíferos tras intrusión de oxidantes, como O_2 , y concomitante aumento del potencial redox en un ambiente previamente reductor de SO_4^{2-} . Los EBI con valores positivos son apenas afectados por la inclusión de metales en el balance iónico, porque esas muestras contienen pocos metales. Una de las causas más frecuentes de un EBI demasiado positivo es la subestimación de HCO_3^- .

Tabla 5.29 Transformación de mg/L a meq/L, sumatoria y balance de iones.

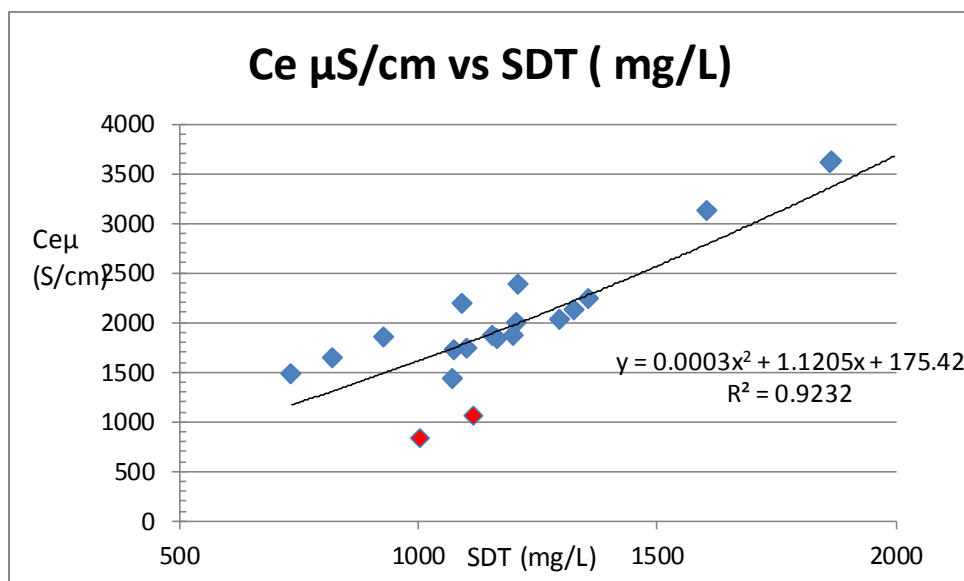
%balance	Σ iones		meq/L								Σ iones	Σ iones	%balance
-47.31	9.31	1.45	1.40	5.82	0.65	9.05	1.60	5.09	19.01	0.34	26.04	34.75	-57.72
-3.37	8.96	1.40	1.32	5.53	0.72	5.54	0.80	6.05	2.38	0.36	9.59	14.77	-24.47
1.17	16.83	1.70	1.07	12.86	1.20	8.95	2.13	5.48	7.87	0.96	16.44	24.43	-18.43
1.55	16.00	1.20	0.74	12.86	1.20	10.23	4.27	2.54	7.80	0.90	15.51	24.83	-21.64
7.20	22.82	2.00	2.47	17.34	1.01	9.21	3.07	5.24	10.12	1.32	19.75	27.64	-9.55
69.73	44.70	0.55	0.41	42.08	1.65	5.21	1.87	2.31	2.14	1.65	7.97	11.53	58.99
-8.37	11.61	1.30	1.07	8.48	0.76	8.65	2.53	5.75	5.21	0.24	13.73	22.14	-31.21
-24.22	20.01	3.93	7.41	7.96	0.71	7.37	2.00	25.42	5.13	0.25	32.80	39.92	-33.23
-38.30	26.52	0.65	1.39	24.14	0.34	4.59	1.47	51.89	3.47	2.64	59.46	61.41	-39.67
-19.01	12.16	1.35	1.23	8.03	1.55	6.62	3.20	7.24	6.51	0.91	17.87	23.58	-31.95
-41.65	18.23	4.49	3.70	9.07	0.96	7.28	2.27	36.44	4.63	0.91	44.24	50.61	-47.04
-9.53	16.59	2.00	2.47	11.58	0.54	9.21	3.07	5.24	10.12	1.66	20.08	27.64	-24.98
5.80	21.32	3.89	5.18	11.66	0.59	11.59	8.43	3.00	6.35	1.21	18.99	29.36	-15.87
14.75	18.63	6.69	2.47	8.96	0.51	9.51	4.07	4.16	4.85	0.76	13.84	22.59	-9.61
21.64	17.36	5.04	3.87	7.66	0.79	7.98	1.33	4.37	4.77	0.71	11.18	18.45	-3.06
16.16	18.49	5.64	3.29	8.48	1.07	9.01	3.47	4.50	4.65	0.73	13.34	21.63	-7.84
15.13	19.76	5.69	4.44	8.96	0.66	10.64	4.60	2.54	6.35	1.08	14.57	24.12	-9.95
-4.15	17.12	4.34	3.13	8.83	0.82	11.21	10.37	2.66	4.68	0.89	18.60	28.92	-25.64
9.57	14.29	4.69	1.56	7.39	0.64	6.75	3.23	5.62	2.34	0.60	11.79	17.95	-11.35
19.04	18.54	5.64	3.13	9.00	0.77	7.64	0.83	4.43	6.52	0.82	12.61	19.42	-2.33
-2.55	19.97	3.59	2.22	13.57	0.59	9.51	9.57	4.02	6.40	1.03	21.02	29.49	-19.24
17.64	22.18	7.69	3.29	10.61	0.59	10.75	3.47	3.23	8.01	0.82	15.53	25.45	-6.88
19.75	8.37	3.09	1.89	2.70	0.69	3.57	0.87	2.83	1.49	0.42	5.61	8.77	-2.29
20.14	10.48	3.34	2.72	3.83	0.59	4.61	0.77	2.58	3.02	0.60	6.96	10.97	-2.32

Tabla 5.30 Porcentaje de cada anión y catión del balance iónico.

Na+	K+	Ca2+	Mg2+	CO32-	HCO3-	SO42-	Cl-	NO3 -
% Cationes				% Aniones				
15.54	15.02	62.45	6.99	26.04	6.14	19.56	73.00	1.29
15.59	14.69	61.73	7.99	37.51	8.34	63.14	24.79	3.73
10.08	6.36	76.41	7.15	36.63	12.97	33.32	47.87	5.83
7.49	4.63	80.37	7.52	41.18	27.51	16.38	50.29	5.82
8.75	10.82	75.99	4.45	33.33	15.52	26.53	51.24	6.71
1.23	0.92	94.15	3.70	45.20	23.41	29.02	26.83	20.74
11.18	9.22	73.07	6.54	39.08	18.45	41.87	37.95	1.74
19.64	37.01	39.78	3.56	18.47	6.10	77.51	15.64	0.75
2.47	5.24	91.02	1.27	7.47	2.47	87.27	5.83	4.44
11.08	10.15	66.04	12.73	28.08	17.91	40.53	36.46	5.10
24.64	20.32	49.78	5.26	14.38	5.12	82.36	10.46	2.06
12.03	14.88	69.83	3.25	33.33	15.27	26.09	50.39	8.25
18.26	24.31	54.67	2.76	39.46	44.41	15.79	33.43	6.37
35.90	13.25	48.10	2.75	42.08	29.38	30.09	35.06	5.48
29.04	22.28	44.11	4.57	43.25	11.92	39.10	42.63	6.35
30.50	17.80	45.88	5.81	41.67	25.98	33.70	34.88	5.44
28.79	22.49	45.35	3.37	44.09	31.57	17.44	43.57	7.42
25.36	18.27	51.59	4.78	38.76	55.73	14.33	25.17	4.77
32.83	10.94	51.75	4.48	37.62	27.42	47.67	19.85	5.06
30.42	16.87	48.57	4.14	39.33	6.61	35.18	51.69	6.52
17.99	11.12	67.94	2.95	32.23	45.51	19.12	30.46	4.91
34.65	14.84	47.86	2.65	42.24	22.32	20.78	51.59	5.30
36.95	22.60	32.21	8.25	40.76	15.44	50.45	26.64	7.47
31.92	25.92	36.54	5.62	41.97	11.01	37.08	43.34	8.57



Grafica 5.8 Balance ionico entre -10 y +10 %



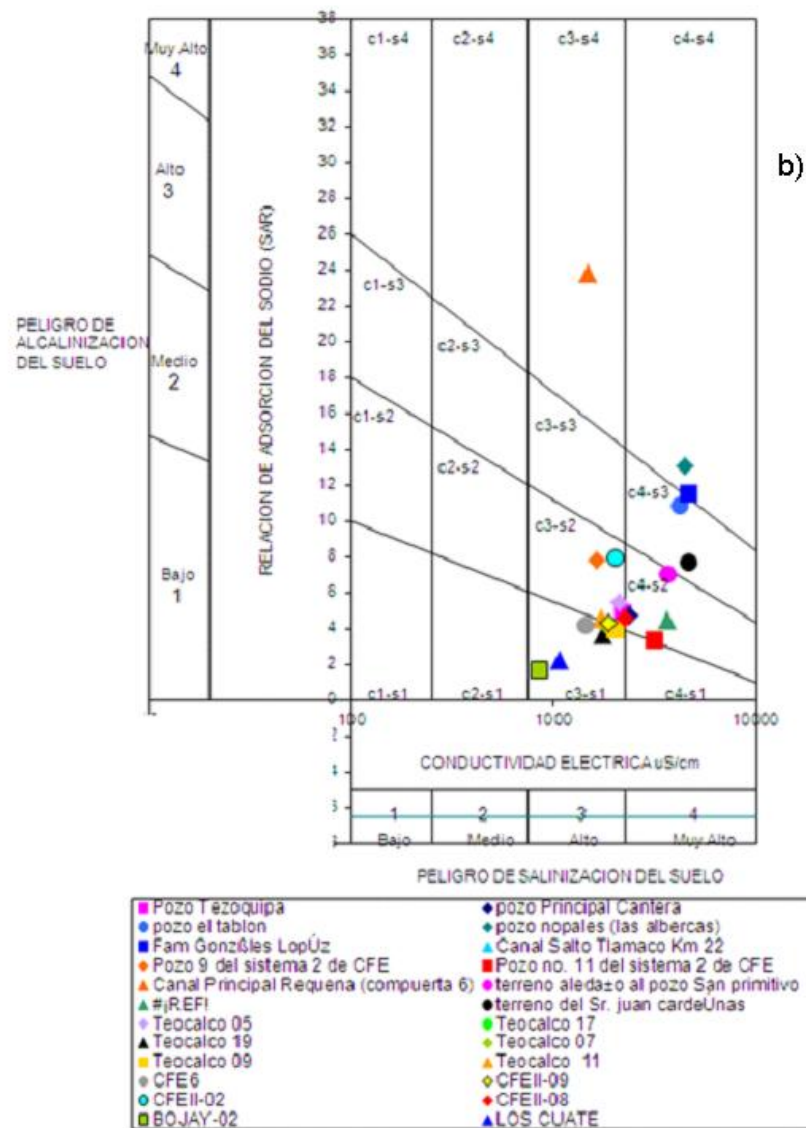
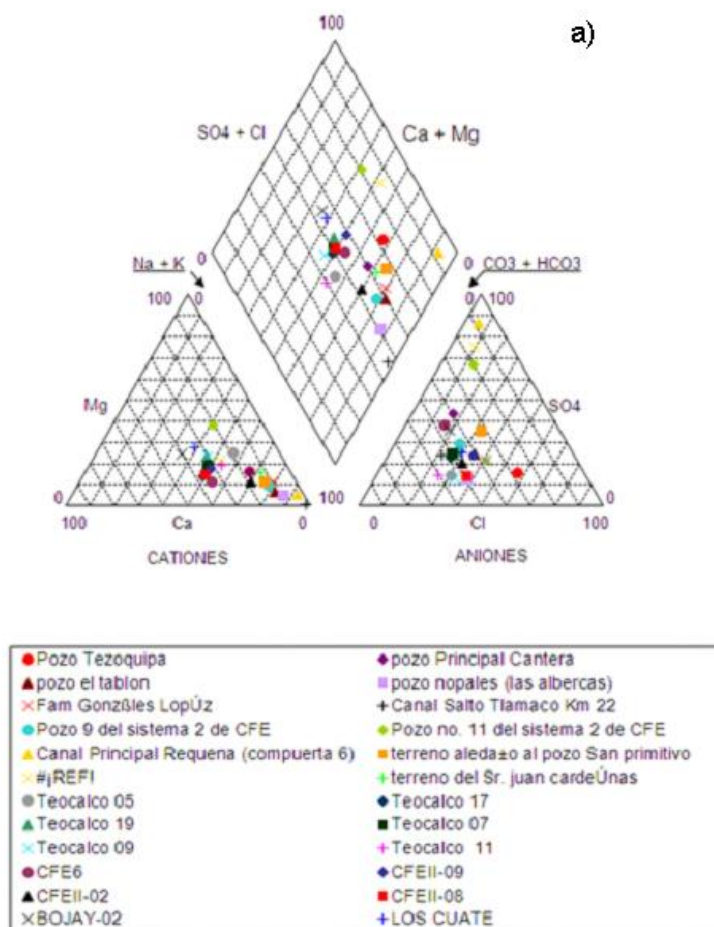
Grafica 5.9. Correlación entre conductividad y concentración de sólidos totales disueltos. Los 2 puntos distantes (rojos) son obviamente mal.

Cuando es muy alta la concentración de sólidos totales disueltos (STD en mg/l), más alta es la concentración de iones que pueden transportar carga y en consecuencia es más alta la conductividad eléctrica (Cond en $\mu\text{S/cm}$) medida in situ. Ambos parámetros se correlacionan estrechamente, por lo cual su análisis conjunto permite determinar si estos son correctos. Los puntos lejos de la línea de correlación (Puntos rojos en la Grafica 5.9), indican un error en el análisis de uno de los parámetros o bien que los iones menores como los metales son significativos.

Con base en los diagramas de Piper (Grafica 5.10a), se pudo determinar cuantitativamente la composición de la muestra, esto permitió definir las familias compuestas del agua predominantes en la zona de estudio. En la trayectoria de las aguas se puede observar la evolución química y así clarificar tendencias y relaciones entre muestras. Entre grupos de aguas se reconocen mezclas alineadas entre los 2 componentes iniciales o se puede reconocer la precipitación o disolución de alguna sal por el desplazamiento de muestras. En los puntos de muestreo en sitios cercanos a la zona de estudio, se obtuvo como resultado de acuerdo al diagrama de Piper mostrado en la Grafica 5.10a, que en la región predominan familias de aguas sulfatadas cloruradas sódicas, aguas magnésicas, cálcicas y sódicas, aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, aguas bicarbonatadas sódicas y aguas sódicas.

TÍTULO (fecha)

DIAGRAMA DE PIPER



Grafica 5.10 a,b. Diagramas de Piper, Grupos de familias por iones mayores y Condiciones de los tipos de agua y su peligro de salinización o alcalinización.

Cuando los receptores de electrones avanzan más profundo, se desplazan las zonas redox hacia abajo y el potencial redox (Eh) sube a un nivel oxidante de sulfuros ($Eh > 160$ mV), en un ambiente originariamente reductor de SO_4^{2-} . Entonces la sucesión original de los procesos de transformación, controlados por reacciones que utilizan los sulfuros como donadores alternativos de electrones, porque son mucho más reactivos. La oxidación de pirritas (FeS_2) y otros sulfuros en los acuíferos causa la acidificación de aguas y esto a su vez la disolución de hidro-oxidación de metales. En la Grafica 5.10b se observa que el agua principalmente está en una concentración mayoritaria de salinización y media a alta conductividad eléctrica que provoca principalmente la disolución en conjunción con el pH.

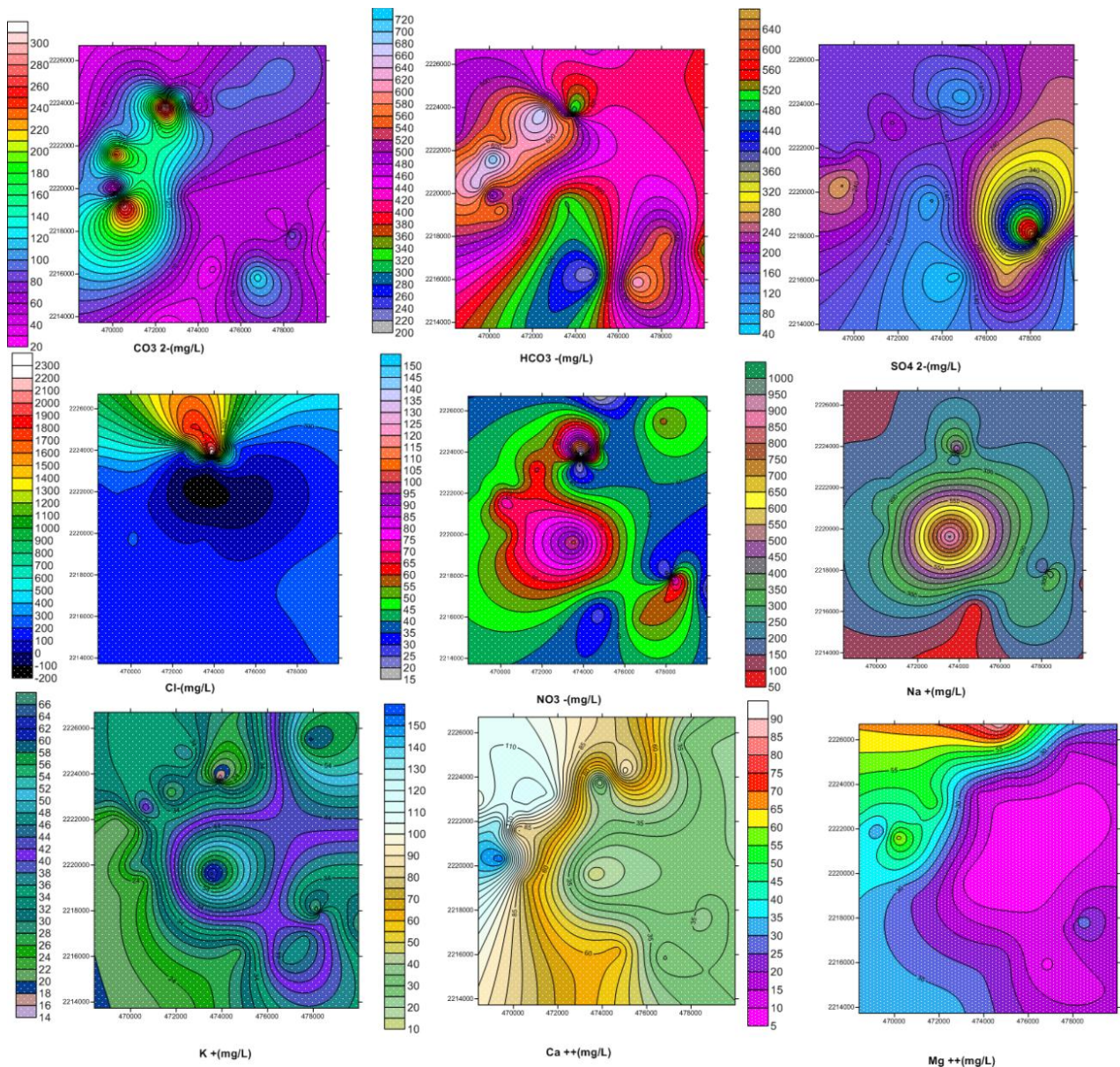


Figura 5.21 Isoconcentraciones de los iones mayores.

En cuanto a la distribución de los aniones y cationes se observa en la Figura 5.21 que CO_3^{2-} tiene una distribución media cercana al Manantial Cerro Colorado, la concentración HCO_3^- es mayor en las cercanías al manantial, SO_4^{2-} este anión es muy Baja la concentración en los alrededores del manantial, el Cl^- es bajo en los alrededores concentrándose puntualmente en el manantial; NO_3^- tiene concentraciones mediana a baja en los alrededores del manantial; Na^+ es muy bajo en la zona de estudio, K^+ es catión se encuentra de mediana a baja en los alrededores del manantial; Ca^{2+} este catión es predominante en la concentraciones ya que se encuentra de regular a alta; de igual manera el Mg^{2+} es predominante de regular a alta. Para simplificar los cálculos de los estados de saturación se supone la existencia de iones complejos los cuales se describen por la expresión de acción de masa y se supone que los coeficientes de actividad de iones simples se describen por medio de ecuaciones que sólo dependen de la temperatura y la fuerza iónica.

Para la utilización del modelo se tuvo que realizar un balance iónico para conocer si los resultados de los análisis fisicoquímicos efectuados presentaban un error máximo del $\pm 10\%$, ya que el modelo puede presentar problemas si el error del balance es mayor. Dicho modelo se utilizó para conocer la variación de la composición química de las aguas residuales que sirven para uso agrícola así como del agua subterránea; también por medio de este se determinaron las concentraciones de las especies acuosas y facies minerales que pueden formarse en el acuífero (Tabla 5.31) al simular cambios de temperatura en el agua se determinó la influencia de la temperatura en los índices de saturación de las fases minerales Tabla 5.32; algunos de los minerales que se forman se muestran en la Figura 5.22.

Tabla 5. 31 Distribución de especies y actividad iónica.

Species		Molality	Activity	Molality	Activity	Gamma	Species		Molality	Activity	Molality	Activity	Gamma
							K	7.00E-03					
							K+		5.94E-03	3.75E-03	-2.226	-2.425	-0.199
OH-		5.14E-05	3.18E-05	-4.289	-4.498	-0.209	KSO4-		1.06E-03	7.86E-04	-2.976	-3.104	-0.128
H+		2.57E-10	1.95E-10	-9.59	-9.71	-0.12	KOH		5.72E-08	6.60E-08	-7.242	-7.18	0.062
H2O		5.55E+01	9.89E-01	1.744	-0.005	0	Mg	2.40E-02					
C(4)	1.09E+00	1					MgSO4		1.07E-02	1.24E-02	-1.97	-1.908	0.062
CaCO3		4.12E-02	4.75E-02	-1.385	-1.323	0.062	Mg+2		6.35E-03	1.86E-03	-2.198	-2.731	-0.533
HCO3-		3.12E-02	2.13E-02	-1.505	-1.671	-0.166	MgCO3		6.31E-03	7.28E-03	-2.2	-2.138	0.062
CO3-2		2.08E-02	4.50E-03	-1.683	-2.347	-0.664	MgHCO3+		6.09E-04	4.53E-04	-3.215	-3.344	-0.128
MgCO3		6.31E-03	7.28E-03	-2.2	-2.138	0.062	MgOH+		2.65E-05	1.97E-05	-4.577	-4.705	-0.128
NaCO3-		5.63E-03	4.19E-03	-2.249	-2.378	-0.128	Na	1.17E-01					
CaHCO3+		2.51E-03	1.72E-03	-2.6	-2.766	-0.166	Na+		9.60E-02	6.81E-02	-1.018	-1.167	-0.149
NaHCO3		7.08E-04	8.17E-04	-3.15	-3.088	0.062	NaSO4-		1.46E-02	1.09E-02	-1.834	-1.963	-0.128
MgHCO3+		6.09E-04	4.53E-04	-3.215	-3.344	-0.128	NaCO3-		5.63E-03	4.19E-03	-2.249	-2.378	-0.128
CO2		8.91E-06	1.03E-05	-5.05	-4.988	0.062	NaHCO3		7.08E-04	8.17E-04	-3.15	-3.088	0.062
Ca	1.09E-01						NaOH		1.98E-06	2.28E-06	-5.703	-5.641	0.062
CaCO3		4.12E-02	4.75E-02	-1.385	-1.323	0.062	O(0)	9.13E-03					
CaSO4		3.79E-02	4.38E-02	-1.421	-1.359	0.062	O2		4.57E-34	5.27E-34	-33.34	-33.278	0.062
Ca+2		2.73E-02	7.00E-03	-1.563	-2.155	-0.592	S(6)	2.38E+00					
CaHCO3+		2.51E-03	1.72E-03	-2.6	-2.766	-0.166	SO4-2		1.74E-01	3.32E-02	-0.76	-1.479	-0.719
CaOH+		7.92E-06	5.89E-06	-5.101	-5.23	-0.128	CaSO4		3.79E-02	4.38E-02	-1.421	-1.359	0.062
CaHSO4+		6.26E-11	4.66E-11	-10.204	-10.332	-0.128	NaSO4-		1.46E-02	1.09E-02	-1.834	-1.963	-0.128
Cl	1.71E-01						MgSO4		1.07E-02	1.24E-02	-1.97	-1.908	0.062
Cl-		1.71E-01	1.08E-01	-0.767	-0.966	-0.199	KSO4-		1.06E-03	7.86E-04	-2.976	-3.104	-0.128
H(0)	4.96E-03						HSO4-		7.44E-10	5.53E-10	-9.129	-9.257	-0.128
H2		2.48E-31	2.86E-31	-30.606	-30.544	0.062	CaHSO4+		6.26E-11	4.66E-11	-10.204	-10.332	-0.128

Por medio de la hidrogeoquímica se puede conocer de manera cuantitativa el funcionamiento de los acuíferos y permite conocer la calidad de los mismos. La composición química del agua está relacionada con el funcionamiento general del acuífero, ya que la concentración de los elementos depende del tipo de material que atraviesa, la porosidad y permeabilidad del mismo, tiempo de residencia y longitud de recorrido, conocer el índice de saturación específico de ciertos minerales o especies acuosas, es de gran ayuda para determinar las condiciones mineralógicas del agua así como su procedencia.

El comportamiento hidrogeoquímico de los acuíferos se puede alterar cuando la recarga presenta compuestos orgánicos, desechos industriales, sales minerales etc. En algunas captaciones se aprecia un alto contenido en bicarbonatos que se asocia a un contenido en CO₂ elevado. Las aguas de este tipo presentan una fuerte mineralización. A partir de las formaciones de mineralógica esta pueden ser diluciones o precipitaciones que determinan los minerales que controlan la composición química del agua tabla 5.32.

Tabla 5.32 facies minerales.

facies minerales				
Phase	SI	log	IAP	log
Anhydrite	0.34	-4.01	-4.35	CaSO ₄
Aragonite	1.16	-7.15	-8.31	CaCO ₃
Calcite	1.31	-7.15	-8.46	CaCO ₃
CO ₂ (g)	-1.06	-2.47	-1.41	CO ₂
Dolomite	2.46	-14.52	-16.98	CaMg(CO ₃) ₂
Gypsum	0.56	-4.02	-4.58	CaSO ₄ ·2H ₂ O
H ₂ (g)	-22.6	-25.73	-3.13	H ₂
H ₂ O(g)	-1.64	-0.01	1.63	H ₂ O
Halite	-3.04	-1.47	1.57	NaCl
O ₂ (g)	-39.56	-42.42	-2.86	O ₂

Durante la modelación geoquímica se encontró que las especies acuosas que pueden formarse tanto en las aguas residuales como en el agua subterránea son las mismas, difieren únicamente en la concentración, ya que se presenta una mayor concentración en el agua subterránea que en las aguas residuales, las especies que pueden formarse son de tipo bicarbonatado (cálcico - magnésicas) y especies sulfatadas (sódico-magnésicas), las concentraciones de estas especies son mayores en aguas subterráneas que en las aguas residuales de los canales (tablas 5.31 y 5.32).

4.15. Validación de los planos de vulnerabilidad con la geoquímica.

Esta etapa consistió en la comparación del mapa de vulnerabilidad con la zonificación hidrogeoquímica de componentes, tales como carbonatos, sulfatos y sólidos totales disueltos dentro de la zona de estudio. Para ilustrar la buena correlación entre los modelos de vulnerabilidad, el modelo geológico y la distribución de algunos componentes químicos, se realizó una sección geológica de vulnerabilidad y química; así como una sobre posición por capas de la distribución espacial de estos elementos. Las tendencias para cloruros, sólidos totales y sulfatos, reflejan, como era de esperarse, las zonas más vulnerables definidas por DRASTIC.

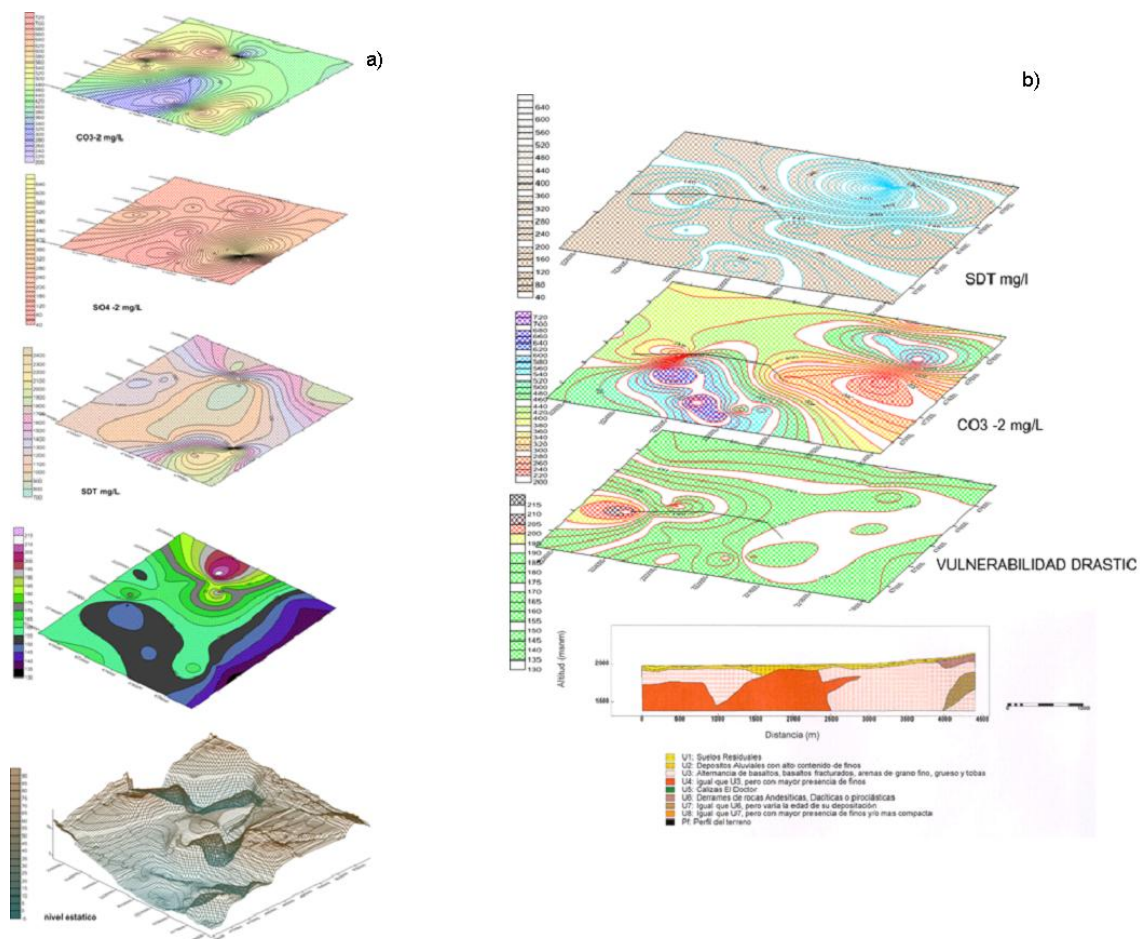


Figura 5.22 a), b) Comportamiento hidrodinámico y distribución iones en relación con la vulnerabilidad y Comparación entre las secciones geológicas de vulnerabilidad e hidrogeoquímicas en la zona de estudio (Elaborado para esta tesis por Becerril, 2013).

En la zona, se observan dos superficies piezométricas; la de mayor carga se ubica cerca al Manantial Cerro Colorado y presenta valores altos de carbonatos y sólidos disueltos totales. La zona sur de la zona estudio tiene concentraciones más bajas (Figura 5.22 a).

La vulnerabilidad evaluada se basa en el método DRASTIC; sin embargo, en el proceso se realizaron algunas modificaciones tales como la utilización de funciones de transformación, para los parámetros de profundidad del nivel estático, recarga neta, gradiente topográfico y conductividad hidráulica. Las escalas de puntuación para los parámetros transformados con funciones utilizados son continuas. Se estableció así la relación con la geoquímica de la zona y el corte litológico, siendo regular los resultados en relación con las condiciones obtenidas (Figura 5.22 b).

5. DISCUSION DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el balance superficial se observó que la variable de escurrimiento aguas arriba (Ar) con un valor de 481Mm³/año, fue la de mayor en el cambio de almacenamiento (271.69Mm³/año).

En cuanto al balance subterráneo se diferenciaron dos horizontes acuíferos, uno superficial y otro profundo. Como resultado del balance de aguas subterráneas, se encontró que la principal entrada de agua al acuífero del valle del Mezquital corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México, a través de canales y retornos de riego. Para este balance solo se consideró el acuífero superficial, ya que, es el de mayor influencia al Manantial Cerro Colorado. El flujo principal es de suroeste a noreste, con niveles estáticos que van de los 10 m hasta 40 m principalmente, y dando un cambio en el almacenamiento para la fracción de acuífero que comprende el Manantial Cerro Colorado de -20.29 Mm³/año, con una zona de mayor flujo horizontal, ya que es la transición entre los acuíferos y los manantiales existentes en el área de estudio.

De la diferencia entre el cambio de almacenamiento superficial y el subterráneo se obtuvo una disponibilidad de 251.4 Mm³/año, parte de este volumen de agua se manifiesta como suelos anegados en algunos puntos del área de estudio.

Con respecto a los parámetros de la vulnerabilidad, la profundidad del nivel estático se ajustó para tener una mejor representación de las condiciones locales; las zonas más someras tienen índices DRASTIC entre 34 y 50 hacia el sureste de la cuenca, mientras que las más profundas ubicadas al noroeste de la cuenca, tienen índices de 18 a 26 donde se observa una disminución en la sensibilidad del parámetro. Para la recarga neta, los índices van de 32 a 40, disminuyendo hacia el norte de la cuenca. Con respecto al medio acuífero, se encontró que las areniscas, basaltos y lutitas masivas fueron influyeron significativamente; los valores de los índices están entre 12 y 29, la vulnerabilidad debido a este parámetro se incrementa hacia el centro de la cuenca. La distribución espacial del tipo de suelo dio como resultado valores bajos del índice DRASTIC entre 12 y 16. El gradiente topográfico se ajustó a las condiciones de pendiente, la cual varía entre 1.5 y 8.8%; al no ser tan abrupta, se obtuvieron valores de índice que van de 3 a 9, muy bajos para influir en la vulnerabilidad de la cuenca. El impacto de la zona vadosa se marcó por la interdigitación de materiales considerados en la zona no saturada como: calizas estratificadas, areniscas y arenas gravas con limos, que dieron índices de 30 a 45, influyendo en la vulnerabilidad de la cuenca. Finalmente la conductividad hidráulica consideradas fueron de 7×10^{-5} a 9.5×10^{-4} m/s, arrojando índices del orden de 15 a 46. Con base en lo anterior, se el índice de vulnerabilidad DRASTIC, en la zona cercana al manantial se clasificó entre alta y extrema (164-214) y hacia el centro-sureste de la cuenca como moderada. El índice de contaminación potencial IC-DRASTIC, que arroja una alta susceptibilidad a la contaminación del orden de 40 a 70%. Los resultados tanto el índice de vulnerabilidad como el del contaminación potencial, indican que existe una alta vulnerabilidad de contaminarse el acuífero. Con base en lo anterior, se determinó un radio de 5 km como perímetro de protección, el cual incluye un área de 11.32 km².

Los datos geoquímicos obtenidos, permitieron validar los resultados obtenidos con DRASTIC, ya que existe una asociación entre una vulnerabilidad elevada y las altas concentraciones de iones característicos.

6. CONCLUSIONES:

- En el balance superficial se obtuvo un cambio en el volumen de almacenamiento de $217.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y en el balance subterráneo de $-20.29 \text{ Mm}^3/\text{año}$ lo que representa una disponibilidad $251.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$, es decir, en el área hay un volumen excedente de agua, razón por la cual existen afloramientos de manantiales y zonas anegadas.
- La vulnerabilidad natural del agua subterránea, de acuerdo con la metodología DRASTIC, es de alta a extrema (160-214), en las cercanías al Manantial Cerro Colorado y moderada hacia el sur de la subcuenca (140-159). Los factores que proporcionaron el mayor peso fueron: medio acuífero, la conductividad hidráulica, gradiente topográfico e impacto a la zona vadosa.
- En cuanto al índice de contaminación potencial (IC-DRASTIC), se obtuvo los valores de susceptibilidad a la contaminación se encuentran principalmente entre 40 y 70%, esta situación indica que cualquier contaminante cuyo medio de transporte sea el agua, será tendrá fácil acceso hacia el acuífero.
- La geoquímica permitió validar los resultados de la vulnerabilidad de la zona; con los modelos phreeqci-2 las fases minerales y los compuesto predominantes por los iones, se determinó que hay diluciones y precipitaciones de los carbonatos, oxidación de sulfatos en las rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias (precipitación por reducción) y separación de magnesio; lo que permite la dilución de dolomías, calizas y ataque a silicatos, lo cual indica que hay fracturamientos por dilución.
- El área de protección resultante conforme a al índice de vulnerabilidad de alta a extrema (160-214), es de una radio de 5 km y a una área de 11.32 km^2 que equivalen a 4.86 % del área total.

7. RECOMENDACIONES.

- Considerar un monitoreo constante de los datos hidrológicos y geoquímicos para mejorar las estimaciones utilizadas en los modelos hidroggeoquímicos.
- Ampliar el presente estudio con modelos numéricos para mejorar la predicción de sucesos de intrusión de contaminantes en el acuífero del Manantial Cerro Colorado, con base en los flujos predominantes en el subsuelo.
- Mejorar la eficiencia de uso del agua residual en las actividades agrícolas, para disminuir magnitud del agua residual que se infiltra en el suelo y así contribuir a conservar la calidad del agua del Manantial Cerro Colorado.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Agüero J., Pujol R., 2004, Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.
- Agustín Udías y Julio Mezcuca, 2004, Fundamentos de Geofísica, Madrid 142-167 pp.
- Aller L.; T Bennet; J. H. Lher and R. J. Petty. 1987. DRASTIC. A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting U.S. EPA Report 600/2-87-035 Ada, Oklahoma.
- Aparicio M.,J., J. Lafragua C., A. Gutiérrez L., R.Mejía Z. y E. Aguilar G. 2006. Evaluación de los recursos hídricos, IMTA, PP.9-59.
- Aparicio, F.J., 1997, Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa, 303 pp.
- Appelo, C. y D. Postma 1993, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema, 536 pp.
- Ariel Consultores, 1999, Los recursos hidráulicos del Estado de Hidalgo y diagnóstico sobre su aprovechamiento: Estudio para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Hidalgo, 119 pp.
- Armienta Hernández , M.A., Rodríguez Castillo, R. Ceniceros N., Juárez F. y Cruz O., 1996; Distribution, Origin and Fate Soils in Guanajuato México. Enviromental Pollution, Vol. 9, No. 3, 391-397pp.
- Auge M., 2006, "Aguas Subterráneas Deterioro de Calidad y Reserva" Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias Geológicas cátedra de Hidrogeología, Buenos Aires, pp 11-38.
- BGS y CONAGUA, 1998, British Geological Survey and National Water Commission of Mexico.. Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Final Report November 1998. BGS Technical Report WC/98/42, Keyworth, Nottingham
- Boulding, R.J. 1995, Soil Vadose Zone and Groundwater Contamination, Assessment, Prevention and Remediation Lewis Publishers, 948 pp.
- Campos Aranda, 1998, Hidrología Aplicada, México, pp 65-106
- CEASG, 2000, Estructuración de Mapas Temáticos de índices de Vulnerabilidad de las Subcuencas de los Ríos Turbio y Guanajuato. Reporte Técnico, 150pp, México,. Estudio realizado a contrato por la Universidad Iberoamericana, Campus León.
- CFE (1997) y CONAGUA (2002), estudio de transmisividad y conductividad, valle del mezquital hidalgo.
- Chow, V.T.; D.R. Maidment y L.W. Mays, 1993, Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, 580 pp.

- Cifuentes, E., U. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett y A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud Pública en México* 36 (1): 1-7.
- Civita M. y De Maió, 1997 SINTACS Un Sistema Parametrico per la Valutazione e la Cartografia della Vulnerabilità Degli Acquiferi A Winquamento, Metodología & Mutomatizzazione e Pitagora Editrice Bologna pp191.
- Civita, M., 1994, La carte della vulnerabilità degli acquiferi all inquinamento: teoría e práctica.
- CONAGUA 2002 Información proporcionada por la Jefatura de los Distritos de Riego del Valle del Mezquital. Comisión Nacional del Agua, Mixquiahuala, Hidalgo, México.
- CONAGUA. 1997a. Información proporcionada por la Gerencia Estatal en Hidalgo de Distritos y Unidades de Riego; Mixquiahuala, Hidalgo.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2002, Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo, Reporte interno, 25 pp.
- CONAGUA, 2007, Climatología reportado por el Servicio Meteorológico Nacional, por estación para el estado de Hidalgo.
- Conesa, F., 1993, Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental Ediciones Mundi. Prensa, pp.276.
- Cruickshank C. et al., 2000, Uso de un Sistema de información Geográfica en la Evaluación Geohidrológica de un Acuífero.
- Custodio E., 1995; Vulnerabilidad de los Acuíferos a la Polución; Seminario Internacional de aguas subterráneas, Santiago de Chile.
- Custodio J. E., (1986). Recarga Artificial de Acuíferos. España, Servicio Geológico y Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Boletín Núm.45, 134 p.
- Custodio, E. Llamas, MR 1983 Hidrología Subterránea tomo i-II Edición Omega-España.
- Daniel V. y Cristóbal C. 2006, Determinación de la Conductividad Hidráulica en la Zona No Saturada con el Permeámetro de Guelph., Universidad de Chile, MECESUP UCH 0303.
- Daziano C. 1984 Comportamiento y geoquímica de Vulcanitas cretácicas de Córdova San Luis Argentina.
- Delfino F., et al 1996. Determinación de la conductividad Hidráulica en pantanos artificiales experimentales de flujo subterráneo Universidad de Guanajuato, Instituto de Ciencias Agrícolas. Exhacienda El Copal, Irapuato, Gto., México.

- Diario Oficial de la Federación 1994, NOM 127 SSA1 1994, , Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W., 1998, *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley, 502 pp.
- Drever, J.I., 1997, *The geochemistry of Natural Waters*. Prentice Hall, 3ª ed. 436 pp.
- Driscoll, F. G., 1986, *Groundwater and Wells*. Johnson Sreens, 1089 pp.
- Fetter, C. W., 1998, *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall, 2ª edición, 500 pp.
- Foster S. y Hirata R., 1991. Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 81p.
- Fries C. Jr., 1962, Bosquejo geológico de las partes central y occidental del Estado de Hidalgo y áreas contiguas de México in *Internal Geol Cong 20th México 1956 Excursión C 9 México DF Univ. Nac. Autónoma México Inst. Geología* p 17 53 illus.
- Futura 1990. Trabajos de piezometría en el valle de Mezquital, Estado de Hidalgo, Comisión Nacional del Agua, SGAA-89-55.
- García-Cabrejo, O. & Moreno-Sánchez, G. 2006, Anomalía Geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales pp 167.
- Geocalli, S.A., 1981, Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo. Estudio elaborado para la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 87 pp.
- Gimeno M.J. y Peña, J. 1994, Principios básicos de la modelización geoquímica directa e inversa. *Est. Geol.*, 50, 359-367.
- Gogu y Dessargues, 2000, GIS-based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan, *Rev. mex. cienc. Geol.* v.23 n.3 México.
- Hall, P., 1996, *Water Well and Aquifer Test Analysys*. Water Resources Pub., 412 pp.
- Hidrotec S.A., 1970, "Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo." Elaborado para la CONAGUA, México.
- Hidrotec, S.A., 1969, Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo. Estudio elaborado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 178 pp.
- Hirata, R. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas. Estudos de casos no estado de São Paulo. (Tese de doutoramento, IGUSP, inédita)
- Hirata, R. y Reboucas, A., 1999 La Protección de los Recursos Hídricos Subterráneos, Una Visión Integrada Basada en Perímetros de Protección y Vulnerabilidad de Aeríferos, *Boletín Geológico Minero*. Vol. 110-4 Año1999 (423-436).

- Jiménez B., 2003, Chapter 3 in Health Risks in Aquifer Recharge with Recycle Water in State of the Art Report Health Risk in Aquifer Recharge Using Reclaimed Water., pp 54-172 R. Aertgeerts and A. Angelakis Editors. WHO Regional Office for Europe.
- Jiménez, B. and Chávez, A. 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. Water Science and Technology Vol 50 No 2 pp 269-276
- Jiménez-Cisneros, B., Ch. Siebe y E. Cifuentes. 2004. El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula. En: Jiménez-Cisneros, B.E. y L. Marín (eds.): El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F.
- Kasenow, M., 2001, Applied Ground-Water Hydrology and Well Hydraulics. Water Res. Pub. 2ª ed., 835 pp
- Kehew, A.E., 2001, Applied Chemical Hydrogeology. Prentice Hall, 368 pp.
- Lerner, D. 1992. Borehole catchments and time of travel zones in aquifers with recharge. Wat. Res. Res.
- Lodwik W.A., Monson W. And SvobodaL, 1990 Attribute Error and Senüitivity Analysis of Maps Operationin Geographical Information Systems-Suitability Analysis, Int. Jour. Geog Infó Syst Vol 4, pp. 413-428.
- Lydolph, P.E., 1985. The Climate of the Earth. Rowman and Allanheld Publishers, Totowa, New Jersey.
- Marín Luis. E., Prieto Santa Anna Elizabeth et. Al., 2004, Aplicación de la modelación geoquímica a la ingeniería hidráulica.
- Méndez G T, Guajardo V R and Flores D L 1992. Contenido de metales pesados, B, A.B.S., grasas y aceites en las aguas residuales de riego del D.D.R. 03 Mixquiahuala, Edo. de Hgo. Memorias del Primer Congreso Mexicano de Mineralogía.
- Napolitano P. y Fabbri A, G., 1996, Single Parameter Sensibility Analysis fot Aquifer Vulnerability Assessment Using DRASTIC and SINTACS in KovaK and Nachtnebel H.P. (eds) Proc, HydrolGis Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Watyet Resources Management, IAHS Publ, 235 pp.559-566.
- National Academy Council (1993), Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo, Elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo. Pp 4
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua Para Uso y Consumo Humano- Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua Para su Potabilización"

- Olmo A., 2000, "Analysis of the performance of a model for estimating thermal atmospheric radiation under cloudy conditions", American Solar Energy Society (EE.UU.), ISBN: 0-89553-163-1.
- Orellana, E. (1972).- Prospección Eléctrica en Corriente Continua. Paraninfo, 523 pp.
- Parasnis, D. S., 1997. Principles of Applied Geophysics (5th edition), Chapman and Hall.
- Payne G. R. D., 1995., Groundwater Recharge and Wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery. US, Lewis Publishers, 376 p.
- Price, M.(2003).- *Agua Subterránea*. Limusa, 341 pp.
- Ramos Leal, T. A., 2000, Validación de Mapas de Vulnerabilidad Tláloc-AMH, Asociación Mexicana de Hidráulica, VE, No. 19, Julio-Septiembre 11-13pp.
- Ramos, 2007, Factores que efectúan la Vulnerabilidad de Sistemas Acuíferos de Salamanca Gto., pp 23-75.
- REPDA CONAGUA 2007, Estado de Hidalgo, títulos y volúmenes de agua nacional y bienes inherentes por uso de agua, publicado por CONAGUA Y SEMARNAT.
- Rodríguez, y Ramos Leal, 1997, Inventario de Sitios Contaminados en la Zona Metropolitana de la Cuenca de México, ZMCM Criterios de Selección de Áreas Piloto, Memorias en el Marco del Programa de Cooperación Técnica México-Japón, Seminario Internacional Sobre Restauración de Sitios Contaminados México, pp,101-105.
- Romero H. 1997 "EL VALLE DEL MEZQUITAL, MÉXICO", Estudio de Caso.
- Sánchez, F.J. 1985, Prospección Geofísica Sondeo eléctrico verticales, España, pp 1-12.
- Sánchez, F.J.; M.A. de Andrés, y I. Tardáguila , 1987, Prospección hidrogeológica en rocas ígneas y metamórficas mediante Sondeos Eléctricos Verticales. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, XI: 557-566.
- SARH 1991. Estudio Técnico Valle del Mezquital, Hidalgo, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Scarrow J.H. et al. 2002, "CUADERNO DE PRÁCTICAS DE GEOQUÍMICA", Universidad de Granada Departamento de Mineralogía y Petrología.
- SEMARNAP, 1996, Programa Hidráulico 1995-2000. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México.
- Siebe, Ch. 1995. Heavy metal availability to plants in soils irrigated with wastewater from México City. Wat. Sci. Tech. 32 (12): 29- 34.
- Silva García, J. T., Ramos Leal, Rodríguez Castillo, Mondragón G., 2000 Vulnerabilidad Acuífera y Parametrización Geoelectrica del Subsuelo de la Empresa Cobre de México, S, A de CV, Informe Técnico, CIEDIR-MICH, IGEOF-UNAM.

- Thorsa, 1991 Ingenieros Consultores y Constructores S.A. de C.V. "Informe: Estudio de actualización geohidrológica para el Valle de Tula – Mezquital – Actopan, estado de Hidalgo", elaborado para la CONAGUA, México
- Tinajero, G.J.A., 1985, Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea. Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.
- Vázquez E., 2002, MINI-MANUAL DE EASY-QUIM.4, representaciones de PIPER y SCHOELLER, diagramas de STIFF y exportar a un mapa de Surfer. hoja de Excel.
- Viba, J, y Zaporec, A., 1994, Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, International Association of Hydrogeologists Vol, 16, 1.31 pp,
- Viessman, W. Jr. and Lewis, G.L., 1996, Introduction to Hydrology. Harper Collins, New York.
- Wilson Albert, R, 1991, Environmental Risk Identification and Management, Lewis Publisher Inc, 65pp.

ANEXO 1. CONCEPTOS BÁSICOS

Este anexo contiene información básica que complementa el marco teórico y la metodología.

El Ciclo Hidrológico

Se denomina ciclo hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea (Aparicio, 1997). Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento (Figura 1.1). El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (Chow, *et al.*, 1993).

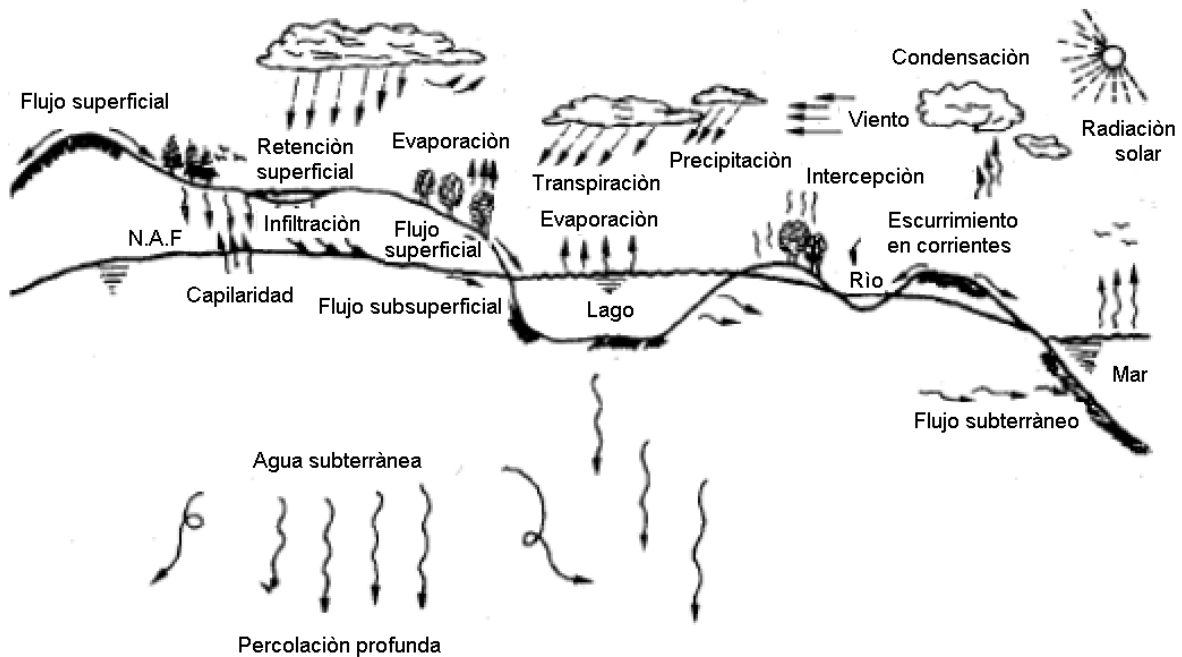


Figura 1.1. Componentes del ciclo hidrológico (Aparicio, 1997).

Cuenca

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde, si fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas (Figura 1.2.). En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (Aparicio, 1997).

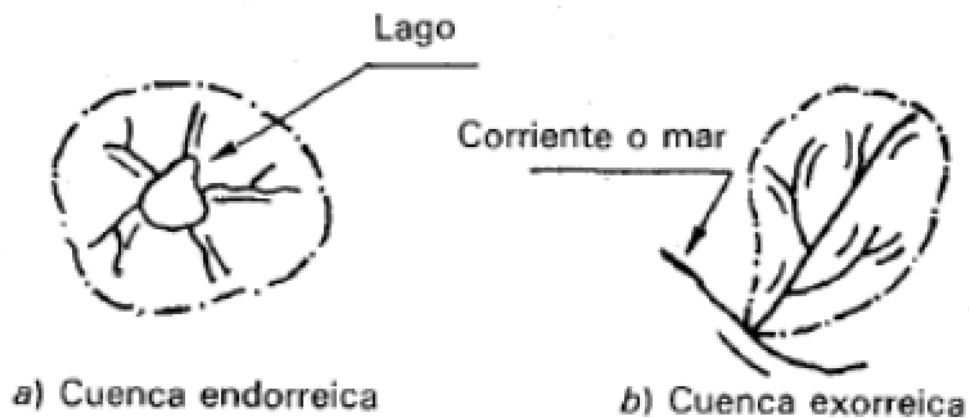


Figura 1.2. Tipos de cuencas (Aparicio, 1997).

Esguerrimiento

Se define como el agua proveniente de la precipitación pluvial que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Dependiendo del tipo de esguerrimiento que se presente se puede clasificar como: esguerrimiento superficial, esguerrimiento subsuperficial y esguerrimiento subterráneo (Custodio y Llamas, 1983).

Infiltración

Infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en los estratos del suelo y se mueve hacia el manto freático. El agua primero satisface la deficiencia de humedad en el suelo y, después, cualquier exceso pasa a formar parte del agua subterránea (Aparicio, 1997).

Agua subterránea

La hidrología subterránea o Geohidrología describe la ocurrencia, la distribución y el movimiento por debajo de la superficie terrestre del agua. La palabra hidrogeología se usa muy frecuentemente para denominar esta ciencia, aunque el vocablo debería utilizarse particularmente cuando se estudia con más profundidad el aspecto geológico (Tinajero, 1985). El agua que se infiltra en el terreno y queda por debajo de la superficie del mismo, sufrirá un proceso que va a permitir que al ocupar los intersticios o poros del terreno y de las rocas, quede situada a distintas profundidades, ocupando dos zonas: la zona no saturada o vadosa y la zona de saturación. En la zona vadosa, los intersticios están ocupados parcialmente por agua y por aire, y el agua en exceso drena verticalmente (percola) por la acción de la gravedad hasta alcanzar la zona de saturación. En la zona de saturación todos los intersticios están ocupados por agua sometida, además, a presión hidrostática. El agua contenida en la zona no saturada a veces el aire es desplazado por otros gases, se designa como agua suspendida o vadosa y el agua de la zona de saturación es el agua subterránea propiamente dicha (Custodio y Llamas, 1983).

Los estratos o formaciones geológicas que ocupan la zona de saturación y que son capaces de almacenar y transmitir agua para subvenir las necesidades del hombre, reciben el nombre de acuíferos, embalses o cuencas subterráneas. De acuerdo con Viessman y Lewis (1996), un acuífero se distinguen tres partes elementales: el área de acceso del agua, zona de infiltración o zona de recarga, la zona de almacenamiento y transmisión del agua y la zona de descarga (manantiales, arroyos, ríos, lagos, mar).

Un acuífero libre permanece en la superficie freática a presión atmosférica, el estrato atravesado estará sustentado sobre una superficie más o menos continua e impermeable, en cambio, si el estrato portador y transmisor se encuentra encerrado entre dos capas impermeables, tratándose en este caso de un acuífero cautivo o confinado a presión o en carga. La zona saturada puede estar contenida estructuralmente en sedimentos o en fracturas interconectadas de roca compacta. Estos acuíferos son los casos más comunes en la naturaleza (Custodio y Llamas, 1983).

Zonas de saturación y de aeración.

El agua que penetra hacia el interior por efecto de la gravedad ocupa parte de los espacios porosos de las rocas o sedimentos, mientras que otra parte es ocupada por el aire retenido que no pudo escapar. De manera que todos los espacios porosos o cualquier otro espacio libre son compartidos por el agua o el aire, por lo que esta zona se la denomina zona de saturación. Pero a partir de cierta profundidad variable, aunque generalmente no muy grande, todos los espacios libres y porosos se encuentran ocupados por agua en su totalidad, denominándose a esta zona de saturación (Custodio y Llamas, 1983).

Atenuación de los contaminantes

Durante la trayectoria en el flujo subterráneo, las sustancias disueltas potencialmente contaminantes, están sometidas a una serie de procesos que tienden a atenuar sus efectos (autodepuración del agua subterránea). Estos procesos de atenuación pueden ser de distinta naturaleza, actuar de manera preferente en una u otra parte del acuífero y ser de eficacia selectiva en relación con determinado tipo de contaminante (Fetter, 1998). Los principales procesos que pueden tener lugar son:

Procesos físicos

Dispersión. Provoca la dilución de contaminantes. La capacidad de dispersión de un medio depende de su grado de heterogeneidad, velocidad del agua subterránea. En general, es inversamente proporcional a la porosidad.

Filtración. Elimina virtualmente todos los sólidos en suspensión. No es efectiva frente a la mayoría de las especies químicas inorgánicas, pero es muy efectiva en medios arcillosos.

La circulación de gases. Favorece la descomposición de sustancias orgánicas. La limitación de esta circulación puede provocar condiciones anaerobias. Volatilización y fuga en estado de gas pueden afectar a nitratos y sulfatos (Appelo y Postma, 1993).

Procesos geoquímicos

Formación de complejos y fuerza iónica. Los complejos y pares iónicos se forman en su mayoría por combinación de iones polivalentes. La fuerza iónica es una medida del total de iones disueltos, tanto una como otra hacen aumentar la cantidad de especies disueltas que estarían limitadas por oxidación, precipitación o adsorción (Domenico y 1998).

Neutralización reacciones ácido-base. La mayoría de los constituyentes de las aguas subterráneas son más solubles y, por tanto, más móviles cuando el pH es bajo. En la mayoría de los casos este efecto no es importante si el pH de efluentes etc. Oscila entre 6 y 9, pero es muy importante cuando se trata de residuos muy ácidos o muy básicos.

Oxidación - reducción. Muchos elementos pueden presentar varios estados de oxidación estando su movilidad estrechamente ligada a dicho estado. En suelos no saturados y zonas de recarga de acuíferos suelen predominar condiciones oxidantes o parcialmente reductoras, mientras que en la zona saturada suelen predominar las reductoras, especialmente si existe materia orgánica.

Precipitación - disolución. Teóricamente, casi cualquier constituyente que se encuentre en solución puede precipitar. El calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos, especialmente, pueden estar sometidos a estos procesos. Constituyentes traza como arsénico, boro, cadmio, cianuro, hierro, plomo, mercurio, entre otros, presentan una notable capacidad de precipitación en ciertas condiciones.

Adsorción - desorción. El proceso de intercambio iónico puede provocar la retención de cationes y aniones en la superficie de las arcillas. La cantidad de cationes metálicos adsorbidos aumenta con el pH. Los elementos adsorbidos pueden volver a la solución (desorción) cuando un agua con menor concentración de estos elementos entra en contacto con el material adsorbente. Este proceso es probablemente uno de los más efectivos en la atenuación de la contaminación. Con excepción de los cloruros y, en menor proporción, nitratos y sulfatos, la mayoría de los contaminantes, en condiciones favorables, pueden ser adsorbidos y eliminados del agua subterránea (Appelo y Postma, 1993).

Procesos bioquímicos

Degradación biológica y asimilación. Muchas sustancias orgánicas pueden ser extraídas del agua por actividad biológica: sulfatos, nitratos, arsénico y mercurio pueden ser fijados biológicamente. El molibdeno es fuertemente asimilado y fijado por las plantas. Síntesis celular. El nitrógeno, carbono, azufre y fósforo, así como otra constituyente traza son necesarios para el crecimiento de los organismos y pueden, por consiguiente, ser retirados en su movimiento desde los emplazamientos de residuos (Custodio y Llamas, 1983).

Procesos en la zona no saturada

Las entradas de agua son debidas a las lluvias, al riego, recarga artificial y lixiviados de vertidos, cuyas características físico-químicas es necesario conocer. Los procesos que en mayor medida afectan a esta zona son la evapotranspiración que conlleva la concentración de las sales disueltas y la absorción radicular selectiva, cuya fase líquida forma parte de la evapotranspiración pero que puede jugar un importante papel en la pérdida de algunos iones (nitratos fundamentalmente). El contenido en materia orgánica y la fijación atmosférica de gases (N_2 , CO_2 , O_2) actúan notablemente sobre algunas reacciones, típicamente las de degradación de compuestos orgánicos, oxidación-reducción, precipitación-disolución y cambio iónico (Price, 2003).

La volatilización puede afectar al amonio y a ciertas sustancias orgánicas (plaguicidas). Realmente, en esta zona también tienen lugar la mayoría de los procesos que se indican en la zona intermedia o zona no saturada propiamente dicha, e incluso con mayor intensidad, como puede ser el caso de la adsorción de metales pesados o de nitrificación del amonio.

Los procesos de adsorción, incluido el cambio iónico, afectan fundamentalmente a cationes. Son típicos los intercambios entre calcio, sodio o amonio así como la adsorción de potasio o metales pesados, aunque también pueden afectar a aniones (fosfatos). Los procesos de disolución - precipitación dependen básicamente de la solubilidad de los compuestos y de su equilibrio respecto a la saturación. Estos procesos, que afectan fundamentalmente a carbonatos también pueden afectar a otras sales (fosfatos). En algunos casos, las sales precipitadas pueden ser nuevamente puestas en disolución cuando se modifica la fuerza iónica, como ocurre con el carbonato de cadmio en presencia de agua de cierta salinidad.

Las reacciones de oxidación en ambiente aerobio, capaz de aportar oxígeno, son especialmente intensas en los compuestos del nitrógeno (nitrificación del amonio y nitrito) y en los sulfuros, que son transformados a sulfatos. Por el contrario, las reacciones de reducción, en ambiente anaerobio y con presencia de materia orgánica, conducen a la formación de amonio (desnitrificación) y sulfuros (reducción de sulfatos).

La biodegradación que afecta a las sustancias orgánicas tiene lugar en los primeros centímetros del suelo donde tanto la presencia de oxígeno como la actividad biológica es muy elevada. Esta biodegradación provoca una rápida disminución de la carga contaminante orgánica existente en el agua, que se constata por descensos en los valores de los parámetros que la caracterizan, como son la DBO_5 , DQO y materia orgánica (Hall, 1996).

Finalmente, las sustancias solubles y que no han sido retenidas por los distintos procesos mencionados alcanzan el acuífero con el agua de recarga.

Mediciones geofísicas

Los estudios geofísicos que involucran la inyección de corriente a partir de electrodos ubicados en la superficie del terreno se conocen generalmente como métodos de corriente directa o DC; aunque en realidad en la práctica la polaridad de la corriente se invierte a intervalos regulares, los más comunes son de 1 a 4 segundos, (Kasenow, M. 2001). Los métodos eléctricos de corriente directa permiten el reconocimiento del subsuelo a partir del estudio de la resistividad eléctrica de las formaciones que lo constituyen. Tanto en la forma de sondeos como de calicatas, estas técnicas son muy utilizadas en la exploración hidrológica gracias a la relación que tiene la resistividad eléctrica con la porosidad de la roca y la mineralización del agua y, por otra parte, con el contenido de arcilla en la roca (Agustín y Mezcuá, 2004). Sin embargo, las condiciones idóneas para la realización del método DC son:

- a) Las diversas formaciones litológicas deben estar caracterizadas por resistividades netamente diferentes.
- b) Las diversas formaciones litológicas deben ser aproximadamente horizontales ($<15^\circ$ aproximadamente).
- c) Las corrientes eléctricas suministradas al terreno desde la superficie deben ser capaces de penetrar a las profundidades de los objetivos a estudiar.
- d) Las deformaciones del campo eléctrico debidas a las heterogeneidades del subsuelo deben ser medibles desde la superficie.

Hay cuatro factores principales que influyen directamente sobre la resistividad del subsuelo:

- La porosidad de la roca: a mayor porosidad, ya sea intrínseca o de fractura, menor resistividad.
- La conductividad del agua: a mayor conductividad del agua (mas salada), menor resistividad de la roca que la contiene.
- Contenido de arcilla del terreno: a mayor contenido arcilloso, menor resistividad.
- La temperatura del agua: a mayor temperatura del agua menor resistividad de la roca que la contiene.

La forma de medición tomando en cuenta lo anterior en los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), cuando la distancia entre los electrodos se aumenta la profundidad de la corriente que penetra al subsuelo se incrementa también. En el caso del arreglo dipolo-dipolo, el incremento de la profundidad de penetración se obtiene a partir del aumento de la separación entre los dos dipolos y no por el incremento de la longitud de los dipolos, El punto de medición se toma como el punto medio del arreglo de electrodos.

Para sondeos a profundidad, la medición de resistencia ($\delta V/I$) se realiza a la separación más corta de electrodos y progresivamente a mayores separaciones electródicas. Para cada separación de electrodos se calcula un valor de resistividad aparente (ρ_a) usando la resistencia medida y el factor geométrico apropiado para la configuración de electrodos y la separación que está siendo utilizada. Los valores de resistividad aparente se grafican en una en una “curva de campo” (Figura 1.3). Los ejes X y Y de la gráfica representan los valores logarítmicos de la separación media de los electrodos ($AB/2$) y la resistividad aparente (ρ_a) respectivamente (Sánchez, 1985).

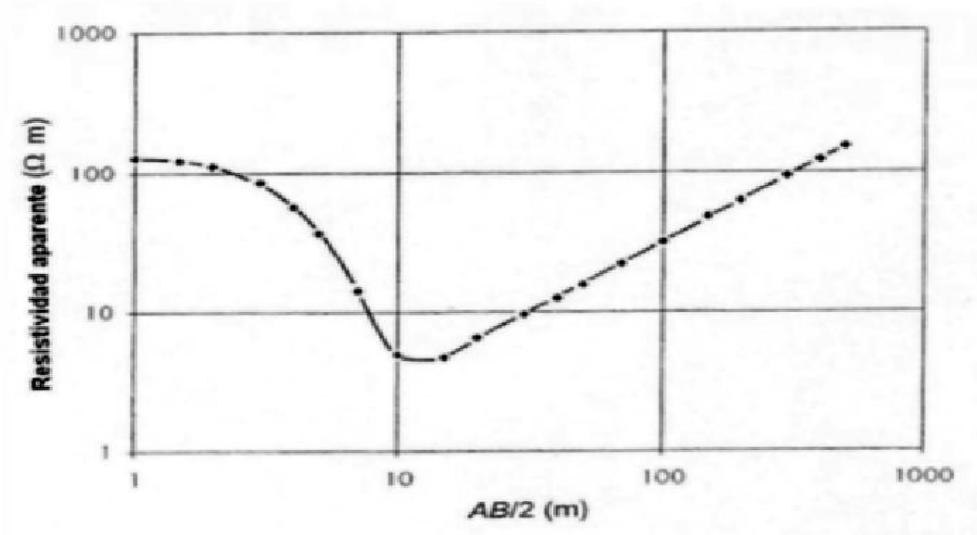


Figura 1.3. Sondeo eléctrico vertical (SEV) que muestra la resistividad aparente en función del espaciamiento medio del dipolo de corriente (Sánchez, 1985).

En caso del arreglo Schlumberger (Figura 1.4) los electrodos de potencial (P1P2) se colocan a una separación fija (b) que no debe ser mayor a un quinto del espacio medio de los electrodos de corriente (a). Los electrodos de corriente son progresivamente colocados a mayores distancias. Cuando el voltaje entre P1 y P2 cae a valores muy bajos debido a la caída progresiva del potencial por el incremento en la separación de los electrodos de corriente, la separación de los electrodos de potencial tiene que ser aumentada (espaciamiento b_2). En tanto que las mediciones continúan la separación de los electrodos de potencial tiene que ser incrementada en caso de que sea necesario hasta que el SEV se concluya (Sánchez *et al.*, 1987).

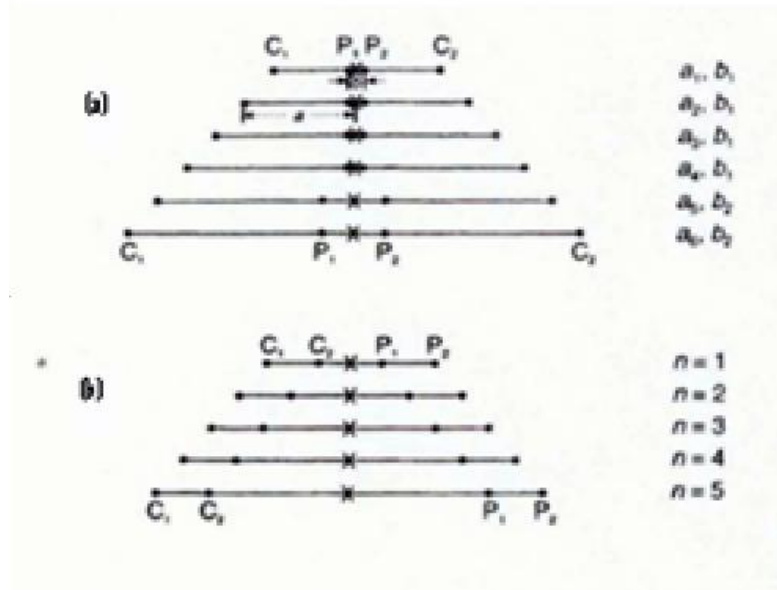


Figura 1.4. Arreglos expandidos con posiciones de electrodos sucesivas para arreglos de: (a) Schlumberger, (b) dipolo-dipolo (Sánchez, 1985).

Resistencia eléctrica

Este término se refiere a la resistencia que oponen los materiales al flujo del paso de los electrones por la constitución electrónica de los enlaces de la materia. (Sánchez, 1985).

Resistividad aparente

El método llamado de resistividades es, sin duda, en todas sus modalidades el más importante de todos los métodos eléctricos. El 70% de los estudios de geofísica realizados para estudios hidrogeológicos utilizaron los métodos eléctricos. Definiéndose como la resistencia que oponen las formaciones de los diferentes materiales al paso de electrones (Parasnis, 1997).

El concepto de resistividad aparente se puede describir de la siguiente forma: considérese un sistema electródico **AMNB** en la superficie de un subsuelo homogéneo y de resistividad ϕ . Se induce una intensidad de corriente por el electrodo **A** que crea un campo eléctrico. La diferencia de potencial se mide entre los electrodos **M** y **N** que se encuentran conectados a un voltímetro, la corriente sigue su curso hasta salir por el electrodo **B** que se supone lo suficientemente alejado como para no interferir en las observaciones, y se cierra el circuito. Entonces si **AM**=**r** y **MN**=**a**, se obtiene la siguiente ecuación (1.1).

$$\Delta V = U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a} \right] = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{a}{r(r+a)} \quad (1.1)$$

Despejando la ρ :

$$\rho = 2\pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad (1.2)$$

Si se conocen las magnitudes que aparecen en el segundo miembro, se puede calcular fácilmente la resistividad (Sánchez, 1985).

Dispositivos electródicos

Un dispositivo electródico es una varilla por la cual se hace incidencia de una corriente en conjunto con los cables según la distancia requerida para registrar la sensibilidad del cambio de resistividad de los materiales de formación del subsuelo (Olmo, 2000). Un dispositivo electródico consta, en general, de cuatro electrodos: **A**, **B**, **M**, **N** (Figura 1.5). Los electrodos A y B son aquéllos por donde entra y sale la corriente. Los otros dos, **M** y **N**, son los electrodos que miden la diferencia de potencial creada por **A** y **B**. Estos últimos deben de estar conectados por medio de cables a un generador eléctrico provisto de un amperímetro. Los electrodos **M** y **N** están conectados a un instrumento capaz de medir el potencial entre ellos. De este modo se tienen dos circuitos independientes: el primero, conocido como circuito de corriente y el segundo llamado circuito de potencia figura 1.5 (Sánchez, 1985).

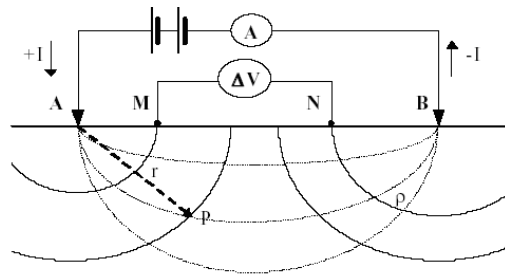


Figura 1.5. Dispositivo tetraelectródico para determinar la resistividad del subsuelo (Orellana, 1972)

En el dispositivo tipo Schlumberger (Figura 1.6), es una composición simétrica de los electrodos **AMNB** dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos **M** y **N** es más pequeña que la de los electrodos en los extremos **A** y **B**.

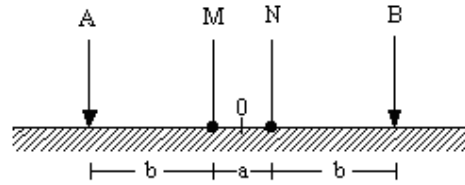


Figura 1.6 .Arreglo en forma de dispositivo tipo Schlumberger(Orellana, 1972).