



2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Características del sitio de estudio

La Unidad Minerala Negra se encuentra ubicada en la porción nororiental del estado de Querétaro, a 1.5 km al Este de la localidad de Maconí del municipio de Cadereyta. Fisiográficamente se encuentra en la provincia Sierra Madre Oriental en el borde occidental de la misma, llamada Subprovincia del Carso Huasteco. Geomorfológicamente la provincia corresponde al tipo de montañas plegadas en una etapa del ciclo erosivo parecida a la madurez.

Sus coordenadas geográficas son: (UTM) 2304048 N, 445652 E a 1861msnm¹.

Entre noviembre y abril su temperatura media mínima es de 9°C y la temperatura media máxima es de 21°C con precipitación total de 75 a100 mm, con lluvia apreciable mayor a 0.1 mm entre 1 y 29 días (INEGI, 1985 a). Entre mayo y octubre la temperatura media mínima es de 12°C y la temperatura media máxima es de 27°C con precipitación total de 175 a250 mm, con lluvia apreciable mayor a 0.1 mm entre 60 y 89 días. Su Isoterma media anual es de 18°Cy su Isoyeta anual entre 800 y 1,000 mm(INEGI, 1985 b).

El área de la mina La Negra pertenece a la provincia de la Sierra Madre Oriental y de la subprovincia del Carso Huasteco. Esta zona tiene altitudes de más de 2600m, queda limitada al norte por el cañón del río Santa María y al sur por el río Moctezuma que, respectivamente, marcan parte del lindero de la entidad con San Luis Potosí e Hidalgo (INEGI, 2004).

¹ Las coordenadas geográficas fueron tomadas con un sistema de geoposicionamiento (GPS) en el sitio de estudio.



La cuenca del río Moctezuma tiene como principal corriente al río Moctezuma, que se origina en el estado de México, donde se conoce como San Jerónimo, Arroyo Zarco y finalmente en la entidad como río San Juan, que posteriormente al juntarse con el río Tula que viene del estado de Hidalgo, cambia de nombre a río Moctezuma. Aguas abajo, se le une el río Extóraz. La cuenca ocupa 4,400 km² y aporta un desplazamiento promedio de 444 millones de metros cúbicos al año. El arroyo Maconí es de flujo permanente y tiene un gasto medio anual de 1.5 m³/s. La Figura 1 muestra el mapa con la hidrografía de la zona.



Figura 1. Mapa hidrográfico.

Con respecto al agua subterránea, el área pertenece al acuífero Moctezuma, pero no se tiene la descripción del mismo por parte de CONAGUA; sin embargo, el acuífero Tolimán se encuentra aledaño a la zona. En este acuífero, el agua es de buena calidad para uso doméstico. La dirección del



flujo subterránea es de sur a norte, la cual coincide con la red de escurrimientos superficiales (CONAGUA, 2002).

Se encuentra vegetación natural e inducida; matorral submontano y matorral inerme. La vegetación varía con la elevación: en las partes altas predominan las coníferas como el pino, enebro, encino y cedro. En las depresiones donde hay mayor temperatura y menor humedad el terreno es árido y desprovisto de suelo; los órganos, cardenches, ocotillo, lechuguilla, maguey y nopal son la vegetación característica (INEGI, 1985 c). La agricultura es detemporal, con cultivos anuales (INEGI, 1985 c). Los terrenos son aptos para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por ganado caprino (INEGI, 1985 d).

2.2 Proceso de producción de los jales

Los cuerpos mineralizados en el área de La Negra son del tipo hidrotermal en skarn, contenidos en roca muy competente; compuesta por capas muy delgadas de caliza laminar gris oscuro con intercalaciones de bandas de pedernal negro. El área mineralizada se compone de varias chimeneas con inclinación de 60° o mayor que presentan formas irregulares con tendencia oval en planta, de las cuales tienden a desprenderse algunos mantos de alcance local. El método de explotación empleado en la mina es el de tumba por subniveles con barrenación larga descendente, con una producción diaria aproximada de 1,000 toneladas métricas trabajando tres turnos y seis días por semana².

El mineral extraído de los rebajes es enviado a una estación primaria ubicada en interior mina, donde el mineral es reducido a menos 4 pulgadas con una quebradora de quijadas y depositado en una tolva subterránea.

² Datos proporcionados por el personal de la planta en mayo de 2008.



Para llevar a cabo la concentración de las especies minerales de interés, el tratamiento metalúrgico comienza con la reducción de tamaño del mineral de menos cuatro pulgadas hasta obtener 100% a menos 3/8 de pulgada en un circuito cerrado de trituración con quebradoras de cono.

Luego de esta reducción de tamaño, el mineral es enviado a una etapa de molienda con molino de bolas en circuito cerrado con clasificador de hidrociclón, de donde se envía al proceso de concentración con un 54% a menos 200 mallas (-74 μ m).

La concentración se lleva a cabo por el proceso de flotación selectiva, obteniéndose así dos concentrados; uno de plomo-cobre-plata y otro de zinc-plata, con 10% y 9% de humedad, respectivamente.

Las colas del circuito de plomo-cobre-plata se convierten en la cabeza del circuito de zinc-plata y las colas de este son enviadas a la presa de jales. Actualmente la mina La Negra tiene cinco presas de jales, tres de ellas están fuera de operación y la presa 5 es la que ahora recibe las colas del proceso (Minera La Negra, 2008).

2.3 Característica de los jales

En un estudio previo realizado por Santos,*et al.*, 2009, se hizo la caracterización de los jales en las presas antiguas de la mina La Negra. En este estudio se reportan las concentraciones totales de metales, las cuales se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1. Concentración total de metales en los jales

Pres a	As[mg/Kg]	Pb[mg/Kg]	Cd[mg/Kg]	Cu[mg/Kg]	Zn[mg/Kg]	Fe[mg/Kg]
Pres a 1	14660	1754	307.5	458.7	*	39890
Pres a 2	1182.5	327.1	45.1	266.85	507.45	22465
Pres a 3	3132.5	337.25	82.2	149.45	447.85	30885

* No fue reportado

La fracción soluble que reporta dicho estudio, se determinó aplicando la prueba de extracción que se establece en la NOM-141-SEMARNAT-2003. Los resultados se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2. Fracción soluble de los jales.

Pres a	As[mg/L]	Pb[mg/L]	Cd[mg/L]	Cu[mg/L]	Zn[mg/L]	Fe[mg/L]
Pres a 1	0.82	0.855	0.489	10.62	44.23	29.67
Pres a 2	0.36	0.264	ND	0.15	0.02	0.292
Pres a 3	0.45	0.16	0.001	ND	ND	0.026

ND: no detectado

Del análisis granulométrico se obtuvo que en las presas 2 y 3 los jales eran finos ya que más del 50 % está por debajo de la malla número 200. En el caso de la presa 1, dado que la muestra fue tomada en el talud, los jales son más gruesos y el 50 % está arriba de la malla número 100 (Santos, *et al.*, 2009).



También se hizo una determinación del potencial de generación de acidez de estos jales mediante la aplicación de la prueba balance ácido-base señalada en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

De las muestras analizadas solo los jales de la presa 1 resultaron generadores de acidez. En estos jales se puede observar la oxidación del residuo sobre el talud de la presa. Las muestras de las presas 2 y 3, así como los jales frescos de la planta de beneficio, no son generadores de acidez de acuerdo con los resultados obtenidos. (González, 2009). Los valores de pH que se registraron en las muestras se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Potencial de generación de acidez en los jales (González, 2009)

Muestra	PN/PA	Generación de Acidez
Jales de la Presa 1	-0.5632	Si
Jales Frescos	1.40	No
Jales de la Presa 2	1.73	No
Jales de la Presa 3	15.20	No

Nota: Análisis de datos realizados con base en los criterios señalados en la NOM-141-SEMARNAT-2003, para determinar el potencial de generación de acidez en jales mineros.

La composición mineralógica de los jales de la mina encontrados por González, 2009 se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición mineralógica de los jales.



Muestra	Mineral
Presa 1	Yeso, Hematita, Calcopirita, Cuarzo, Goetita, Pirrotita, Azufre
Presa 2	Calcita, Cuarzo, Yeso, Hematita, Montmorillonita, Ortoclasa
Presa 3	Calcita, Yeso, Cuarzo, Ortoclasa, Pirita, Jarosita, Muscovita, Montmorillonita

2.4 Capacidad de las plantas para acumular metales

Desde hace muchos años se ha estudiado que las plantas tienen la capacidad de acumular metales o algunos otros contaminantes en su estructura. Al parecer los agrónomos fueron los primeros en identificar este fenómeno. Con el paso de los años ha sido posible identificar que las plantas realmente han desarrollado esta capacidad, además de otros mecanismos para adaptarse a la presencia de los contaminantes. Esta característica constituye la base de la fitorremediación, que consiste en diversas tecnologías desarrolladas para remediar suelos contaminados con el uso de plantas.

2.4.1 Fitorremediación

La “fitorremediación”, también llamada “biorremediación”, “fitoextracción”, “remediación verde”, etc. (Chaney R., *et al.*, 2000); es una técnica desarrollada para tratar sitios contaminados con metales, metaloides, petroderivados, y más; que implica el uso de plantas con capacidad fisiológica y bioquímica para remover, transferir, estabilizar y/o degradar los contaminantes. (Padmavathiamma,*et al.*, 2007)



La fitorremediación puede ser aplicada tanto a contaminantes orgánicos como a los no orgánicos presentes en sustratos sólidos (suelos), en sustratos líquidos (agua) e incluso en el aire (Salt,*et al.*, 1998; Adler,*et al.*, 1994). La fitorremediación se divide en varios tipos de procesos que son: fitoextracción, fitodegradación, rizofiltración, fitoestabilización y fitovolatilización (Salt,*et al.*, 1998; González, *et al.*, 2005; EPA Estados Unidos,2000).

Fitodegradación: Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos; al introducir los contaminantes al proceso metabólico de la planta y mezclarse con enzimas producidas por la planta (EPA Estados Unidos, 2001).Se usa para tratar sitios contaminados con compuestos orgánicos, (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno),atrazina, solventes clorados, DDT, herbicidas, fenoles y nitrilos (EPA Estados Unidos, 2000).

Fitoextracción: Las plantas absorben el contaminante por medio de la raíz y lo traslocan a las partes cosechables de la planta (principalmente la parte aérea) (EPA Estados Unidos, 2001).Se usa en el tratamiento de sitios contaminados con metales como Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn,⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁹Pu y ²³⁸,²³⁴U, entre otros (EPA Estados Unidos, 2000).

Fitoestabilización: En este proceso las plantas logran reducir la movilidad de los metales y evitar su migración al absorberlos por medio de la raíz y acumularlos en la misma o precipitarlos en la zona circundante a la raíz (EPA, Estados Unidos, 2001). Se usa para sitios contaminados con metales y metaloides como As, Cd, Cu, Pb y Zn (EPA Estados Unidos, 2000).

Fitovolatilización: Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración (EPA Estados Unidos, 2001). Se usa para mercurio, selenio y solventes clorados (EPA Estados Unidos, 2000).

Rizofiltración: Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y



degradar compuestos orgánicos (EPA, Estados Unidos, 2001). Se usa en sitios contaminados por Cd, Co, Cr, Ni, Hg, Pb, Se, Zn isótopos radioactivos y compuestos fenólicos (EPA, Estados Unidos, 2000).

Esta técnica ha sido empleada para la remediación de suelos porque posee muchas ventajas con respecto a los métodos convencionales de tratamientos de lugares contaminados; en primer lugar es una tecnología económica, de bajo costo y de aplicación sencilla, en segundo lugar posee un impacto regenerativo en lugares en donde se aplica y en tercer lugar su capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal (González, *et al.*, 2005).

El uso de plantas para remediación de suelos contaminados con metales es relativamente nuevo. Aunque se conoce desde hace siglos que algunas plantas retienen metales, el estudio del fenómeno se enfocó a la búsqueda de yacimientos minerales por medio de bio-indicadores, es decir, a estudiar las plantas que estaban asociadas a yacimientos minerales (por ejemplo yacimientos de azufre). Antes de aplicarse para la remediación de suelos, se tenía conocimiento de plantas que podían acumular Se, Si, Zn, Cd, y Co (Rufus L., *et al.*, 2000).

Posteriormente con técnicas más modernas para estudiar la concentración de metales se reportan varias especies hiper-acumuladoras por diferentes investigadores. Carrillo R., *et al.*, 2005, reporta que la especie *Poligonum aviculare* concentró 9,236mg/kg de Zn y la *Jatropha dioica* acumuló 6,249 mg/kg del mismo elemento. Sin embargo, actualmente no hay una regla estandarizada para definir si una planta es o no hiper-acumuladora. Estudios de diversos autores han permitido establecer cuatro reglas básicas que pueden ser utilizadas satisfactoriamente para determinar criterios de hiperacumulación (Nazmul Haque, *et al.*, 2007).

1. Los niveles de concentración de metales pesados encontrados en las hojas de las plantas, para Pb y Cu >1000 mg/kg, Zn >10, 000 mg/kg As >1000mg/kg Ni y Co >1000 mg/kg, Cr >1000 mg/kg y Mo>1500 mg/kg, Cd > 100 mg/kg.



2. Las concentraciones de algunos metales pesados en hojas es 10 a 500 veces más que en plantas normales.
3. La concentración de metales en las hojas es invariablemente más grande que en la raíz.
4. Un coeficiente de enriquecimiento >1 .

2.4.2 Plantas acumuladoras de metales en presas de jales

En estudios realizados por diferentes investigadores alrededor del mundo se reportan especies de plantas que se han adaptado a suelos contaminados con metales y han desarrollado mecanismos para acumular dichos elementos. En particular, se han hecho estudios en suelos cercanos a depósitos de residuos mineros y se ha encontrado que algunas especies son capaces de acumular o fijar en el suelo los metales contenidos en dichos residuos.

Peichun Chang, 2005, estudio doce especies vegetales en los jales de una mina de oro en Corea del Sur, para determinar las concentraciones de As, Cd, Cu, Pb y Zn. La especie *Platago asiata* reportó las mayores concentraciones de arsénico con una concentración de 28mg/kg.

En jales de una mina en Tailandia (Visoottiviseth, 2002), se estudiaron 36 especies para determinar su capacidad de acumulación de arsénico, solo cuatro fueron consideradas como aptas para la fitorremediación.

En China, se compararon las concentraciones de plomo, zinc y cobre en cuatro especies de la familia Sesbania (*S. cannabina*, *S. grandiflora*, *S. rostrata*, y *S. sesban*) (Gilbert y. S. Chan, 2003). También Li M. S., *et al.*, 2007 estudió 36 especies de 22 familias al sur de China y encontró concentraciones significativas de Fe y Mn, algunas especies como la *Phytolacca acinosa* con más de 3,000 mg/kg de Mn.



En Estados Unidos de America Nazmul Haque, *et al.*, 2007 estudió las plantas *Baccharis sarothroides* Gray y se consideraron como posibles hiperacumuladoras de Cu, Pb, Cr, Zn, As, y Ni. También J. Pichtel 2000, estudió diferentes especies en presencia de Pb, Cd y Ba; donde encontró que la especie *Taraxacum officinale* tuvo la máxima concentración de Cd.

En España una sola especie, *Betula pendula* fue analizada para conocer su concentración de Pb y Zn. Se encontró una correlación lineal entre la concentración de elementos en el suelo y en la planta (E. Marguá, *et al.*, 2007). También Héctor M. Conesa, *et al.*, 2007, estudio dos especies de plantas endémicas que crecieron sobre los desechos de una mina al sur de España, obteniendo como resultado que la especie *Hyparrhenia hirta* acumuló cerca de 150 mg/kg de Pb en raíz y tallo, mientras que la especie *Zygodium fabago* acumuló 750 mg/kg de Zn en la raíz.

En México también ya se han hecho algunos estudios de plantas que crecen en zonas mineras. Carrillo R., *et al.*, 2005, estudió plantas que crecieron sobre jales de Au, Ag y Zn, que contenían metales como Cd, Ni, Pb, Mn, Cu y Zn, en diferentes sitios en el estado de Zacatecas, identificó dos especies interesantes; por un lado la especie *Polygonum aviculare*, que acumuló Zn (9,236 mg/kg) en concentraciones cercanas para ser considerada como hiperacumuladora, por otro lado la especie *Jatropha dioica* también registró una alta concentración de Zn (6,249 mg/kg). En el estado de Chihuahua, Soraya, *et al.* 2006 analizó As y Zn en ocho especies dominantes en diez puntos diferentes alrededor de una presa de jales; las especies con mayores concentraciones fueron: *Acacia farnesiana*, *Juniperus deppeana*, *Baccharis glutinosa*, *Prosopis juliflora* y *Cynodon dactylon*. Rodríguez, *et al.* 2006, realizó un estudio en laboratorio para identificar concentraciones de Pb en seis especies de plantas comunes de la ciudad de Monterrey, que crecían en macetones con sustrato contaminado artificialmente con 0, 500 y 1000 mg/kg, con resultados lejanos a los descritos para considerarlas hiperacumuladoras.



2.5 Uso de plantas en el cierre de presas de jales

El cierre de las presas de jales a nivel mundial tiene como propósito evitar la dispersión de estos residuos y limitar la movilidad de los metales contenidos en ellos (Sengupta M., 1993, Lottermoser B., 2007, Environment Australia, 1997). Para lograr este propósito, se han aplicado diversas alternativas como la saturación del depósito de residuos con agua para evitar su oxidación y dispersión; otra opción ha sido el recubrimiento de los residuos con materiales sintéticos (geomembranas) lo cual representa un costo elevado, y otra opción es el recubrimiento con materiales naturales para evitar la dispersión.

Cuando se utilizan geomembranas o materiales naturales para el recubrimiento, es necesaria la reforestación o inducción de vegetación en la superficie, con el propósito de reestablecer las condiciones naturales del sitio. Esta medida es de gran importancia ya que la adecuada selección de las especies vegetales para recubrir los residuos, puede repercutir en la inmovilización de los contaminantes metálicos contenidos. Para este fin cobra importancia la identificación de especies con capacidad de acumular o fijar en el suelo los metales contenidos en los residuos.

La normatividad mexicana que existe para regular la operación de las presas de jales NOM-141-SEMARNAT-2003, establece diversos criterios para el cierre final de estos depósitos. Entre estos criterios encontramos el recubrimiento con suelo que permita la fijación de especies vegetales, el uso de especies vegetales nativas para la reforestación que no promuevan la acidificación del sustrato y el ajuste de los taludes de la cortina para dar estabilidad estática y dinámica a la misma. Todas estas acciones con la finalidad de que no se emitan partículas sólidas a la atmósfera, no se formen escurrimientos que afecten a cuerpos de agua y que no falle la presa.