



**PROYECTO GEOLÓGICO.**  
**LOCALIZACIÓN Y ESTUDIO DE**  
**YACIMIENTOS DE ARCILLA EN LA**  
**MIXTECA OAXAQUEÑA.**

**REALIZADO POR:**

**CIRILO JOAQUÍN GUERRERO HERNÁNDEZ.**  
**INGENIERO GEÓLOGO**

**NOVIEMBRE DEL 2002**



# PROYECTO GEOLÓGICO. LOCALIZACIÓN Y ESTUDIO DE YACIMIENTOS DE ARCILLA EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA.

REALIZADO POR

CIRILO JOAQUÍN GUERRERO HERNÁNDEZ,  
INGENIERO GEÓLOGO

**Lic. Griselda Galicia García**

DIRECTORA GENERAL DE CULTURAS POPULARES E  
INDÍGENAS

**Lic. Emanuel Toledo Medina**

DIRECTOR DEL INSTITUTO OAXAQUEÑO DE LAS  
CULTURAS

**Lic. Guillermo Círigo Villagómez**

JEFE DE LA UNIDAD REGIONAL HUAJUAPAN

**Lic. Eva Hernández Tejeda**

Coordinadora del PACMYC en la región mixteca



# PROYECTO GEOLÓGICO. LOCALIZACIÓN Y ESTUDIO DE YACIMIENTOS DE ARCILLA EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA.

CONTENIDO	PAGINA
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	2
EL AREA OAXAQUEÑA COMO AMBITO HUMANO.	3
OBJETIVOS	4
1. LOCALIZACIÓN	5
1.1. VÍAS DE COMUNICACIÓN	5
1.2. RED DE TELECOMUNICACIONES	5
2. METODOLOGÍA	7
3. MARCO GEOLÓGICO	7
3.1. ESTRATIGRAFÍA	8
3.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	16
4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	19
4.1. FISIOGRAFÍA	19
5. HIDROGRAFIA	20
6. CLIMATOLOGÍA	21
6.1. CLIMA Y VEGETACIÓN	21
7. FORMACIONES ARCILLOSAS EN MÉXICO	22
7.1. ARCILLAS QUE AFLORAN EN LA MIXTECA	23
7.2. CAOLÍN	35
7.3. MONTMORILLONITA	36
7.4. CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS ARCILLAS	37
7.5. CARACTERISTICAS DE LAS ALTERACIONES	39
7.6. ORIGEN DE LOS SILICATOS	39
7.7. GÉNESIS DE LAS ARCILLAS	41
7.8. LA NOBLEZA DE LAS ARCILLAS	41
7.9. TIPOS DE ARCILLAS	43
7.10. APLICACIONES DE ARCILLAS	44
8. CONCLUSIONES	52
9. RECOMENDACIONES	52
10. BIBLIOGRAFÍA	53



ANEXOS.

Carta geológica de la región Mixteca Oaxaqueña escala 1:250 000 de 60 x 60 cm.

Figura 1	Plano de localización de la región Mixteca Oaxaqueña
Figura 2	Plano geológico región Mixteca Oaxaqueña.
Figura 3	Columna estratigráfica esquematizada de la región Mixteca Oaxaqueña.
Figura 4	Plano de depósitos arcillosos en México.
Figura 5	Plano donde se observa el depósito de caolín en el área de Mariscala de Juárez, Oaxaca.
Figura 6	Plano donde se observa el depósito de caolín en las áreas de San Miguel Tlapiltepec y Buena Vista, Coixtlahuaca, Oaxaca.
Figura 7.	Plano donde se observa el depósito de bentonita en el área de San Pedro Yodoyuxi, Oaxaca.
Figura 8.	Afloramiento y corte de un banco de caolín 7m de espesor, en el municipio de San Miguel Tlapiltepec, distrito Coixtlahuaca, Oaxaca.
Figura 9	Rocas caolinítica de color blanco ubicado en las inmediaciones de San José Buena Vista, municipio de Santiago Tepetlapa, Coixtlahuaca, Oaxaca.
Figura 10.	Afloramiento de montmorillonita y bentonita, corte de la carretera No. 19 que comunica a Huajuapán de León con Tezoatlán de Segura y Luna, Oaxaca.
Figura 11	Afloramiento de montmorillonita 8m de espesor, ubicado en la barranca "Los Amates" municipio de San Martín Zacatepec, Oaxaca.
Figura 12	Afloramiento de montmorillonita ubicado en las inmediaciones de Santa Catarina Río Delgado, Teposcolula, Oaxaca.
Figura 13.	Afloramiento de montmorillonita ubicado en la barranca Río Manzana en Santiago Chazumba, Oaxaca.
Figura 14.	Afloramiento y explotación de arcilla talcosa en las inmediaciones del municipio de Santiago Ayuquílilla, Oaxaca.
Figura 15.	Afloramiento de arcilla-limosa que sirve como retención del agua pluvial en el municipio de Santiago Ayuquílilla, Oaxaca.
Figura 16	Banco de caolín 6m de espesor, en las inmediaciones de Mariscala de Juárez, Oaxaca.
Figura 17	Afloramiento de montmorillonita y bentonita, corte de la carretera No. 19 que comunica a Huajuapán de León con Tezoatlán de Segura y Luna, Oaxaca.
Figura 18	Afloramiento de montmorillonita 2m de espesor, ubicado en las inmediaciones de San Jerónimo Silacayoapilla, Oaxaca.
Figura 19.	Afloramiento de montmorillonita 5m de espesor, ubicado en la barranca Río Atotonilco municipio de Santiago Ayuquílilla, Oaxaca.
Figura 20.	Afloramiento de montmorillonita 12m de espesor, ubicado en el municipio de Santiago Yucuyachi, Silacayoapan, Oaxaca.
Figura 21	Afloramiento de montmorillonita y caolín 3m de espesor, en las inmediaciones de Santo Domingo Tonalá, Oaxaca.
Figura 22	Banco con 3m de espesor de arcillas para la elaboración de vasijas y recipientes de diferentes formas y tamaños, Tlaxiaco, Oaxaca.



## RESUMEN

Las arcillas son sustancias estructurales del suelo que se utilizan desde hace muchos años como minerales industriales, con multitud de aplicaciones según sus propiedades. Son productos de alto valor añadido en el sector farmacéutico, como excipiente de medicamentos, en la industria petroquímica, como soporte de catalizadores y en otros sectores como aditivos para pinturas, betunes, construcción, cosmética y agricultura.

La región Mixteca Oaxaqueña propuesta para la realización del proyecto se localiza en la porción noroccidental del estado de Oaxaca, entre las coordenadas geográficas 16°45' y 18°22' de Latitud Norte y 96°59' y 98°27' de Longitud Oeste, integrada por 7 Distritos y 155 municipios, cubriendo una superficie de aproximadamente 16,333.10 kilómetros cuadrados. Se puede enfatizar que las arcillas son materias primas para la producción artesanal siendo una riqueza natural que debemos reconocer y participar en condiciones de plantear el desarrollo de la producción artesanal como base sustentable de la identidad cultural, el desarrollo regional y local, el diseño de los productos y la competitividad de las artesanías. En la región Mixteca Oaxaqueña existen las características geológicas que indican las posibilidades de depósitos de yacimientos minerales arcillosos, de hecho, ya existen yacimientos plenamente localizados y algunos explotados que comprueban lo anterior. Los yacimientos minerales arcillosos son materias primas para la industria y representan recursos potenciales de ingresos en posesión de comunidades, pequeños propietarios y ejidatarios. Esto nos hace plantear que la realización de las exploraciones y explotaciones de estos yacimientos, impulsarían el desarrollo regional y estatal, además significa contar con un catálogo de yacimientos arcillosos que pueda utilizarse para promocionar las inversiones en exploración y explotación, lo cual, beneficiaría a las comunidades en donde se localizan dichos yacimientos.

## INTRODUCCIÓN

El eje fundamental para un cambio es la nueva disposición de los propios artesanos siendo estos de gran calidad humana y con habilidades artísticas, que han desarrollado un conocimiento en determinadas técnicas y una cultura material, en conjunto puede enfocarse a la organización de microindustrias asociadas para la producción así como la conservación, mejoramiento, desarrollo de insumos, rescatando a través del negocio familiar la artesanía tradicional y preservar así la riqueza cultural de cada comunidad. Creando fuentes de empleo artesanal en la región, promoviendo la continuidad de la tradición espacialmente; diversificando en nuevos productos las aplicaciones del arte artesanal para otorgar a estos personalidad e identidad de comercialización. Promover el desarrollo y las mejoras técnicas adecuadas y ambientales sustentables para mejorar la productividad, la seguridad e higiene del trabajo, abaratando costos de producción y proteger los recursos naturales reciclables restaurando la naturaleza y la ecología del lugar, aprovechando el conocimiento técnico como un valor estratégico para la competitividad de los productos así como las características de pieza única que posee cada producto artesanal, trabajando en conjunto el diseñador y el artesano para los nuevos productos a desarrollar.



## ANTECEDENTES

Tras la revisión de algunos trabajos a los que se tiene acceso, se puede decir que el interés por la utilización de materiales arcillosos es creciente, aunque el debate sobre cual sería la mejor utilización de cada una de ellas sigue abierto. El tema adquiere una especial relevancia en el momento actual en el que los resultados económicos en las explotaciones se ven condicionados por factores legales, ambientales y ecológicos.

El presente proyecto de investigación obedece a la necesidad de contar con información a cerca de la existencia de yacimientos minerales arcillosos, así como de las zonas que potencialmente pueden contener dichos yacimientos, ya que como es sabido, estos minerales representan una importante fuente de materia prima para muy diversas industrias.

Los yacimientos de minerales arcillosos han sido estudiados por distintas dependencias, tanto públicas como privadas, incluyendo instituciones de educación superior. Sin embargo a la fecha no se conoce un trabajo que exclusivamente trate de los depósitos arcillosos de la Región de la Mixteca Oaxaqueña.

De los trabajos más significativos, destacan los que realiza el Consejo de Recursos Minerales, abarcando principalmente el campo de la exploración regional. Por su parte, las dependencias privadas no dan a conocer sus trabajos exploratorios, sin embargo sus resultados suelen ser visibles en el momento en que se realizan los trabajos de explotación.

En cuanto a Instituciones de Educación Superior, destacan los trabajos de investigación y trabajos de tesis que realizan la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Politécnico Nacional.

Del mismo modo, el INEGI edita cartas topográficas y geológicas que pueden servir como base para la localización y establecimiento de puntos de referencia potencialmente favorables para la ocurrencia de yacimientos arcillosos.

Toda esta información existente, es necesario adaptarla a los objetivos del proyecto, ya que las extensiones estudiadas y las cartas elaboradas son de distintas dimensiones y escalas; aunado a que sus objetivos son muy diversos.

El trabajo artesanal ha sido por muchos años la base de sustento para un gran número de familias mexicanas, desde hace unas seis décadas el apoyo de diversas organizaciones de integración al desarrollo económico; a partir de entonces cobró un auge la creación de organismos oficiales destinados a promover la actividad artesanal en términos de asistencia creativa y de ventas, sin embargo las políticas de fomento artesanal han sido muy diversas su mayor incidencia es el aspecto de comercialización en pequeña escala y a muy bajos precios, descuidando así la asistencia técnica, educativa y la protección de los recursos naturales.

Las comunidades artesanales en nuestro país son heterogéneas en tipologías de productos, formas de organización de trabajo, medios de distribución, y en el consumo; las



condiciones de vida y de trabajo del artesano a pesar de los apoyos recibidos, no se han beneficiados con mejoras sustanciales y la mayoría de las comunidades han mantenido una situación de pobreza y con desventajas para integrarse al desarrollo de la economía nacional, aunado al deterioro de la naturaleza, el medio ambiente y la ecología; surgiendo las interpretaciones, leyendas, sueños y tradiciones en las futuras generaciones. La ecología no es un problema solamente bio-físico para ellos, sino que para todos, es también una problemática de tipo cultural.

## EL ÁREA OAXAQUEÑA COMO AMBITO HUMANO.

La ocupación y asentamiento de los más antiguos grupos humanos tuvo lugar en remotas épocas (varios milenios antes de nuestra era), pues de otra manera sería difícil explicar la diversificación cultural alcanzada en épocas posteriores. Las investigaciones prehistóricas de P. Martínez del Río, L. Aveleyra, Arroyo de Anda, A. Romano Pacheco y M. Maldonado-Koerdell, han aportado algunas luces a este respecto y Helmut de Terra, el descubridor del "Hombre de Tepexpan", siempre esperó que la segunda osamenta humana fósil se encontrara en el estado de Oaxaca, en la Mixteca Alta o en los Valles Centrales. Desde 1913, el naturista Oaxaqueño C. Conzatti, en una publicación de la Estación Agrícola Experimental cercana a la capital de la entidad, señaló la existencia de restos de grandes proboscídeos que posteriormente se han encontrado en otras zonas y que en general están asociados a utillaje en otras áreas de México.

Los grandes focos culturales de las mismas zonas que dejaron construcciones y otras huellas (cerámica y códices) en Monte Albán, Mitla y Yagul y otros puntos han sido estudiados por arqueólogos, etnólogos e historiadores mexicanos y extranjeros. Entre los primeros pueden citarse a N. León, C. Rickards, A. Caso, W. Jiménez Moreno y en los últimos años por I Bernal y entre los segundos a E. Seler, Z Nuttal, E. Schultze-Jena, C. Sauer, G. Eckholm y J. Paddock, en múltiples publicaciones dentro y fuera del país. La diversificación lingüística fue también extraordinaria y aparte de los grupos más importantes (Mixtecos y Zapotecos), perduran aún pequeños núcleos aislados (amuzgos, triques y huaves), para no contar otros marginales en la periferia del área Oaxaqueña.

En la época colonial, la importancia del área Oaxaqueña demandó una acción política y religiosa muy intensa, con la cooperación de las cuatro órdenes religiosas más importantes (franciscanos, dominicos, agustinos y jesuitas), que también dejaron magníficas construcciones en el noroeste y el centro (Yanhuitlán, Oaxaca y otros puntos) Se levantaron igualmente monumentos civiles y se escribieron valiosas crónicas del proceso de la conquista y colonización, iniciándose de modo intensivo ciertas formas de explotación de recursos naturales (minería, cultivo del azúcar y de la cochinilla, orfebrería y textilera de fuerte tradición pre-hispánica y uso de perlas y corales). El folklore Oaxaqueño tuvo entonces sus raíces, combinando prácticas anteriores y nuevas modalidades religiosas, sociales y económicas (días de mercado, especialización local, peregrinaciones y costumbres).



Después de 1821, la participación Oaxaqueña en los destinos nacionales fue adquiriendo mayor importancia, hasta culminar con las figuras históricas de Benito Juárez y Porfirio Díaz, aunque son importantes otras personalidades civiles y militares. Con base en el viejo Instituto de Ciencias y Artes del estado (ahora Universidad "Benito Juárez"), La Escuela Normal y otras instituciones de enseñanza superior y media, han brillado por generaciones los intelectuales, los profesionistas y los maestros de Oaxaca, aunque en una época fue también semillero cultural el seminario (que protegió grandemente el arzobispo E. Gillow).

En las artes deben mencionarse los nombres de M. Alcalá, autor de célebres composiciones musicales y R. Tamayo, uno de los grandes pintores mexicanos contemporáneos, pero la vena creativa existe a niveles diversos en un alto porcentaje de la población Oaxaqueña.

Considera el antropólogo mexicano Miguel Othón de Mendizabal al estado de Oaxaca como al más diversificado mosaico de situaciones y problemas sociales, en proporción a su extensión territorial y número de habitantes en el país. Ponderaba también las dificultades naturales de sus terrenos (abrupto relieve, diversidad de climas, vegetación y fauna, difíciles comunicaciones) y las discrepancias culturales de sus habitantes (elevados desarrollos en ciertas zonas y pobres o nulos logros en otras, exagerada cohesión de algunos grupos y laxa disposición de otros, multiplicidad lingüística y fragmentación política), factores que han actuado en la génesis de los problemas que confrontan hasta hoy los grupos humanos de la entidad. Esta complejidad natural y cultural es precisamente el mayor atractivo del área Oaxaqueña que requiere urgentemente una sistematización en el estudio de tantos factores y en la aplicación de medidas que estimulen su desarrollo.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es impulsar el desarrollo regional y estatal en base a la promoción de inversiones en la exploración y explotación de yacimientos minerales arcillosos. Específicamente, con este proyecto se pretende ubicar y delimitar las áreas de yacimientos arcillosos existentes en la Región Mixteca Oaxaqueña, así como contar con la información necesaria para la toma de decisiones con respecto a la realización de trabajos de exploración y explotación de dichos yacimientos.

Promover el desarrollo y las mejoras técnicas adecuadas y ambientalmente sustentables, para mejorar la productividad, la seguridad e higiene del trabajo, reducir costos de producción y proteger los recursos naturales.

Creación de fuentes de empleo para dar ocupación a las obras artesanales que fortalezca la promoción en las comunidades y sus organizaciones.

Desarrollar y fomentar la comunicación y difusión de la producción del conocimiento artesanal en el ámbito comercial y cultural enfatizando que la producción artesanal es un valor de la riqueza natural.



Mejorar y eficientar de manera sustentable la explotación de los yacimientos arcillosos mediante técnicas y condiciones artesanales.

Diversificar los productos con nuevas aplicaciones para otorgarle una identidad de explotación y comercialización, así como mejorar la presentación y variedad de los productos, dándoles mayor calidad y competitividad.

## 1. LOCALIZACIÓN

La región de la Mixteca Oaxaqueña se localiza en porción noroccidental del estado de Oaxaca cuyas coordenadas geográficas son 16°45' y 18°22' de latitud norte y 96°59' y 98°27' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, cuenta con una extensión de 16,333.10 kilómetros cuadrados, que representa el 17.13% de la superficie del estado. La región está dividida en 7 Distritos, 155 municipios y 1650 poblaciones, con 416,150 habitantes (INEGI, 1995). Colinda al norte con el estado de Puebla, al poniente con el estado de Guerrero, al oriente con las regiones cañada (Distritos Teotitlán y Cuicatlán) y valles centrales (Distritos Etlá y Zaachila) y al sur con la región Sierra Sur, Distrito Sosola y Putla, (Figura 1).

### 1.1. VÍAS DE COMUNICACIÓN

Las vías de comunicación que existen permiten que haya un buen enlace entre las ciudades de la entidad, así como con los estados circunvecinos. Las principales rutas que cruzan son las carreteras federales No. 190 carretera panamericana que comunica a las Ciudades de México con Oaxaca pasando por los distritos de Huajuapam de León y Nochixtlán y la No. 125 que comunica a la Ciudad de Tehuacan, Puebla, Huajuapam de León, Tlaxiaco y Pinotepa Nacional y la supercarretera No 135 que comunica a las Ciudades de México con Oaxaca pasando por Coixtlahuaca y Nochixtlán. Además de las rutas mencionadas existen carreteras estatales y caminos de terracerías transitables en toda época del año, los cuales establecen comunicación con centros de población localizados fuera de los ejes carreteros principales.

### 1.2. RED DE TELECOMUNICACIONES

Las telecomunicaciones en la región de la Mixteca, se enlazan con la red de microondas del país y extranjeras, para permitir que exista comunicación entre las ciudades, los municipios y las poblaciones en general.





## 2. METODOLOGÍA

Para éste proyecto se establece como hipótesis de trabajo que en la Región de la Mixteca Oaxaqueña existen características geológicas que indican la posibilidad de ocurrencia, en distintas zonas, de yacimientos minerales arcillosos, susceptibles de ser explotados y los trabajos de campo y gabinete se realizaron mediante:

Obtención de la información relacionada con los minerales arcillosos, tomando en cuenta: las imágenes de satélite, las fotografías aéreas, así como la obtención de la cartografía base, la verificación de campo de los diferentes yacimientos arcillosos de interés ecomómico, la interpretación y elaboración del informe técnico.

## 3. MARCO GEOLÓGICO

El marco geológico de la Región Mixteca Oaxaqueña esta conformado por litologías muy variadas y complejas, que provienen de las rocas con edades desde el Precámbrico, Pleistoceno y Reciente (Figura 2), ígneas y metamórficas donde se supone estuvieron emergida durante este tiempo; la presencia de rocas Jurasicas y Cretácicas da lugar a la posible comuniucación del geosinclinal mexicano con el Océano Pacífico, este patrón tectónico aparentemente controló las estructuras mesozoicas que también tienen una orientación general norte-sur entre Acatlán y Tlaxiaco Uribe (1999) menciona que “Dicho patrón es claramente diferente al encontrado en los bordes del Terreno Mixteco como en las regiones del sur de Puebla y Tehuacán, en el estado de Puebla, al oriente de Tlaxiaco, en el estado de Oaxaca y al poniente de Olinalá en el estado de Guerrero (Corona, 1981, Morán, 1987, citados por Uribe, 1999). El Complejo Acatlán es el que representa la era Paleozoica se identifica con las siglas P(E) y está constituida por esquistos de biotita y clorita, filitas, pizarras y además de calizas y lutitas. Los afloramientos se localizan en las inmediaciones de los poblados Villa Chalcatongo, Los Tejocotes, Santo Domingo Tonalá, San Francisco Tlapancingo, Fresnillo de Trujano, San Jerónimo Silacayoapilla, Santa María Acaquizapan, Santiago Chazumba, Cosoltepec y Santo Domingo Tianguistengo. En el Cretácico Inferior las transgresiones marinas cubrieron a las rocas jurásicas con algunos eventos volcánicos intercalados en el registro estratigráfico en mares someros. Durante el resto del Mesozoico las rocas se identificadas con las siglas Ji, Js (lu-ar, cz, cg); Ki (cz, lu, ar, cg), los ambientes sedimentarios de plataformas favorecieron el desarrollo de sedimentos con carbonatos (Morán, et al., 1993). del metamorfismo, cuya deformación desarrolló cinturones plegados de orientación general norte sur que corresponden a lechos rojos, areniscas, mantos de carbón, conglomerados silíceos, calizas, lutitas, conglomerados calcáreos, en una alternancia de regresiones y transgresiones. Las rocas volcánicas están representadas por andesitas, diques andesíticos y aplíticos. Durante el Cenozoico y sobre la secuencia de rocas Mesozoicas descansa concordantemente un paquete de rocas, con un rango de depósito que abarca del Paleoceno hasta el Plioceno, de tipo sedimentarios, marinos y continentales e ígneas y vulcanosedimentarias identificados con las siglas Ti (lm, ar, lu, cz, cg); Ts (A, B, cg, ar, Ti) y Tom (A, Bvi, Ti, Ta), iniciándose con un depósito de tipo flish (alternancia de lutitas y areniscas), conglomerados, areniscas volcánicas, andesitas porfídicas, tobas riolíticas, brecha volcánica y la secuencia vulcanosedimentaria



constituida por litarenita, conglomerados y basaltos. Los sedimentos detríticos gruesos cenozoicos enmascaran también los límites tectónicos y/o litológicos del registro estratigráfico, por ejemplo las rocas de la Formación Huajuapán y el Conglomerado Tamazulapán (Ferrusquía, 1976).y posteriormente en el Terciario todas las tierras fueron levantados.

Finalmente, para el cuaternario corresponden los conglomerados polimicticos, areniscas, suelos residuales derivados de las rocas preexistentes y aluviones identificados con las siglas Q (al, cg). Los suelos residuales son sedimentos arcillosos formados debido al intemperismo y desintegración de las rocas calcáreas y metamórficas; los depósitos de aluviones en cambio son del pleistoceno y reciente los derivados de las rocas preexistentes en el área y están constituidas por fragmentos líticos y minerales que en conjunto representan el último depósito de los valles aluviales.

### 3.1. ESTRATIGRAFÍA.

El área de la Mixteca Oaxaqueña (figura 2. carta geológica y figura 3. columna estratigráfica) que abarca este estudio de investigación tiene un marco geológico conformado por rocas de variada composición y edad. De acuerdo a la estratigrafía descrita por Ernesto López-Ramos (1983), INEGI (1994) y Uribe (1999) las rocas más antiguas pertenecen al Pre-Cámbrico identificadas con las siglas P<sup>E</sup> (Gn), al oriente de Nochixtlan y oriente de Cuicatlán, se encuentran los afloramientos en una secuencia de rocas metamórficas, constituidas por esquistos cloríticos con pequeñas variaciones a esquistos talcosos; pudiéndose agrupar estas rocas dentro del Complejo Metamórfico Oaxaqueño. Esta secuencia se encuentra en contacto por falla con la formación Cuicatlán de edad Terciaria.

El Paleozoico con este nombre se designa a una secuencia de rocas plegadas y afectadas por metamorfismo de grado bajo denominada por Ortega (1978, citado por INEGI, 1994 y Ulises, 1999) e (INEGI, (1984); como el Complejo Acatlán; está constituida por esquistos cloríticos y filíticos, en una secuencia de rocas metasedimentarias de origen marino, presentan foliaciones y tienen un color café a negro lustroso; los afloramientos que existen dentro del área de interés están identificados con las siglas P(E).

Para la Edad Mesozoica se tienen secuencias de rocas sedimentarias continentales y marinas que corresponden a las unidades del Jurásico Inferior formadas por lechos rojos continentales y marinos de las formaciones Rosario, Conglomerado Cualac, Zorrillo, Taberna y Simón que descansan en forma discordante al complejo Acatlán (INEGI, 1994), dentro del área de interés están identificadas con las siglas Ji(lu-ar). Ji(ar-cg). Js(cz-lu). Js(cz). J-K(cz-lu-ar).

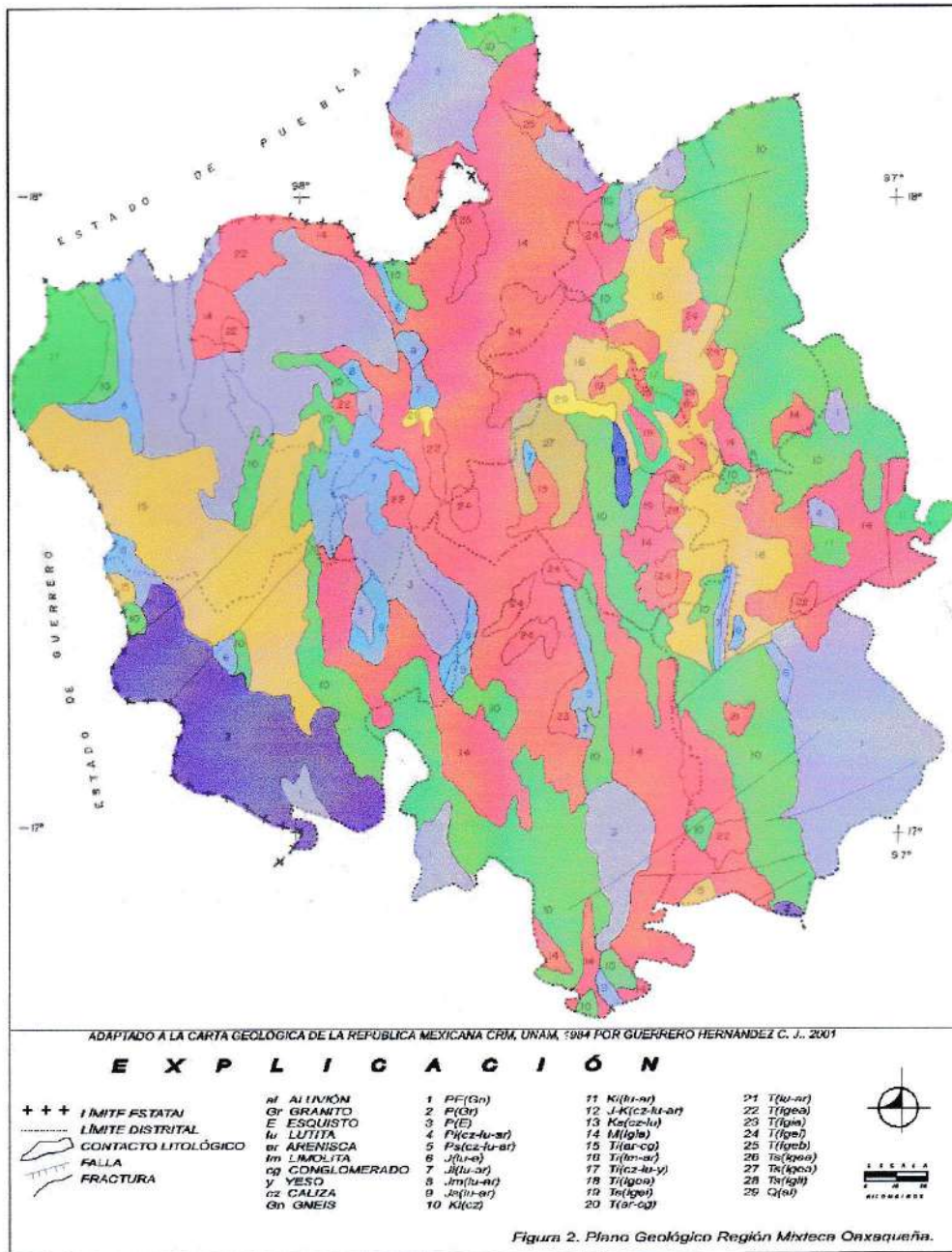


Figura 2. Plano geológico Región Mixteca Oaxaqueña.





Estos se encuentran yaciendo en discordancia sobre las rocas metamórficas, consisten de areniscas fosilíferas, conglomerados, margas, calizas y arcillas que contienen carbón con nódulos ferruginosos, en capas plegadas de espesores variables, con la presencia de fósiles (amonitas). Para la era Cretácico corresponden a calizas, conglomerados y lutitas identificadas con las siglas Ki(cz) K(cg) y Ki(ca-lu), el contacto inferior de estas rocas es discordante con el Complejo Acatlán. Para esta secuencia de rocas sedimentarias se consideran de ambiente marino somero, físicamente las capas se encuentra plegadas, fracturadas y las capas con espesores de hasta 1.2 metros.

De la era Cenozoica se tienen rocas de origen sedimentarios, ígneas y volcanosedimentarias, iniciándose con un depósito de fliish (alternancia de lutitas y areniscas), conglomerados, areniscas volcánicas, andesitas porfídicas, tobas riolíticas, tobas andesíticas, brechas volcánicas y la secuencia volcanosedimentaria constituida por litarenita, conglomerados, tobas intermedias y basaltos (INEGI, 1994). Del Terciario Inferior, las rocas sedimentarias son depósitos fluviolacustres que incluyen unidades de areniscas y calizas pertenecientes a la Formaciones Huajuapán y Yanhitlán Ti(ar-cg), que sobreyace en forma discordante a unidades más antiguas, al igual que los detritos de origen lacustre compuestos por una alternancia de limolitas, areniscas y un cuerpo conglomerático, perteneciente a la Formación Yanhuitlán por lo que las rocas volcánicas son una secuencia lávica y piroclástica de composición intermedia y básica. Como eventos plutónicos del terciario se tiene la unidad cinética.

La Formación Huajuapán y una unidad de materiales volcánicos que se ha denominado informalmente como rocas volcánicas ácidas e intermedias. Esta última sobreyace concordantemente a la primera. La deposición de estos materiales estuvo limitada a una cuenca estrecha y larga en dirección NNE-SSW. De acuerdo a los fenómenos observados en lo que respecta a distribución predominio de clastos en sedimentos de un tipo sobre otros, así como por simple observación de la distribución topográfica y por supuesto del arreglo de los planos de estratificación se llega a la conclusión de que al menos las partes inferiores de los depósitos Terciarios se acumularon en dos zonas diferentes situadas aproximadamente en las porciones oriente y poniente de una línea que divide transversalmente a la altura del poblado de Guamúchil.

Finalmente, para el Cuaternario corresponden conglomerados polimícticos, areniscas, suelos residuales y aluvión. Los suelos residuales son sedimentos arcillosos formados debido al intemperismo y desintegración de las rocas calcáreas y metamórficas. Los aluviales en cambio son depósitos recientes derivados de las rocas preexistentes en el área y están constituidas por fragmentos líticos y minerales que en conjunto representan el último depósito de los valles fluviales.

Las arcillas asociadas a las rocas antes mencionadas, son producto de alteración química y física, las cuales consisten de mezclas de partículas de diferentes propiedades tanto físicas, químicas y mineralógicas. Los depósitos de arcillas pueden cubrir grandes extensiones superficiales o bien ocurrir en zonas reducidas e incluso intercaladas con otros materiales.



**Litología.-** Se hace una descripción de las unidades que conforman la zona de estudio, partiendo de la roca basal, la más antigua, hasta las más recientes, tomando como base la información existente y enriqueciéndola con las observaciones que se realizaron en campo; su distribución se puede observar en la Carta geológica.

**Esquistos clorítico.** Siglas P<sup>E</sup>(Gn). se encuentran los afloramientos en una secuencia de rocas metamórficas, constituidas por esquistos cloríticos con pequeñas variaciones a esquistos talcosos; pudiéndose agrupar estas rocas dentro del Complejo Metamórfico Oaxaqueño. Esta secuencia se encuentra en contacto por falla con la formación Cuicatlán de edad Terciaria

**Esquistos Siglas P(E).** Es una unidad se asigna al Paleozoico inferior (INEGI, 1994) y se constituye principalmente por esquistos de facies, esquistos verdes de muscovita y clorita de muscovita, clorita y cuarzo, además de micas de muscovita, clorita, biotita y cuarzo. Forma parte del basamento de la región denominado Complejo Acatlúa, así como también calizas paleozoicas de las formaciones: Tindú, Santiago, Ixtaltepec y Yododeñe con características litológicas similares, de textura grainstones, colores grises, a oscuro y rojizos, en estratos delgados a medianos, intercalados con calizas, lutitas y areniscas, de espesores muy variados, plegadas y muy fracturados, morfológicamente forma cerros escarpados con pendientes abruptos sobre todo en las fareturas y fallas.

**Lutita-arenisca Siglas Ji(lu-ar).** Se considera que la unidad esta conformada por cinco formaciones, una del Jurásico Inferior (Formación Rosario del Grupo Consuelo) y cuatro del Jurásico Medio (Conglomerado Cualac del Grupo Consuelo; Formación Zorrillo del Grupo Tecocoyunca; la Formación Taberna; y la Formación Simón), esta unidad aflora en la cuenca de Tlaxiaco hasta las inmediaciones de Huajuapán, extendiéndose hacia el oeste en Olinalá estado de Guerrero. La estructura es compacta con una selección en el tamaño del grano que es de moderada a pobre, presentando con fuertes variaciones dentro de una misma capa. La granulometría predominante es la de arena gruesa que oscila entre los 0.5 a 2 milímetros y con frecuencia grava arenosa de 0.05 a 10 milímetros, en menor proporción ocurren estratos con tamaño de grano fino a muy fino o menores a 0.05 milímetros, los granos clásticos, identificados megascópicamente, son de cuarzo, fragmentos de rocas volcánicas extrusivas, feldespatos, de calcita, cementados con carbonatos de calcio y sílice; se observan contornos subredondeados y subangulares. La estratificación es muy variable, los estratos se engruesan, se acuñan y desaparecen lateralmente, dentro de los estratos se observan en ocasiones estructuras de diastratificación y surcos de arrastres en la base, en estas formaciones se encuentran los mantos de carbón, los fósiles, también se observan algunos plegamientos y un intenso fracturamiento. Los espesores van de los 60 hasta 90 centímetros con coloraciones que varían de gris, amarillento y rojizo debido a la presencia de minerales ferromagnesianos. El ambiente de depósito que se infiere para esta formación es de un sistema fluvial con desarrollo de canales e intercalaciones de abanicos aluviales. Su expresión morfológica se basa en una topografía de escarpes y de lomeríos suave y alargados con pendientes abruptas y suaves de cumbres tendidas asociados con valles.

**Caliza, Caliza-Lutita Siglas Ki(cz) y Ki(ca-lu).** Esta unidad comprende las formaciones: Teposcolula, Tuxpanguillo y Orizaba, cuya edad es Cretácica (INEGI, 1994) y se encuentra sobreyaciendo a la unidad anterior. Esta constituida por rocas calizas de colores gris claro a



gris oscuro rojizo e incluso hasta negro, con nódulos de pedernal y óxidos de hierro, de textura mudstone, en estratos cuyos espesores varían de 0.4 hasta 1.20 metros, plegadas y fracturadas, con la presencia de miliólidos, estromatolitos, cuarzo, calcita y pedernal, en algunos sitios se observa muy marcada la zona de cársticidad e incluso hasta forman cavernas y grutas, estos se aprecian en los distritos de Juxtlahuaca, Huajuapán y Teposcolula. Morfológicamente forma cerros con pendientes abruptas sobre todo en las fallas y fracturas asociados con zonas cársticas. Uribe (1999) citando a Caballero (1989) la ubica dentro de la unidad Solano; la característica principal de estas calizas son de estratificación en estructuras interpretadas como anticlinales y sinclinales.

Conglomerado Siglas Ti(cg). Se considera que esta unidad es parte del Conglomerado Tamazulapán (INEGI, 1994, Uribe, 1999) y esta correlacionada con la Formación Balsas. Sobreyace en forma discordante a las calizas del Cretácico Inferior. Son rocas clásticas formadas por guijarros, trozos de roca calizas, volcánicas extrusivas y cuarzo, mal clasificados, subangulosos a redondados mayores de 2 milímetros de diámetro, los colores varían de gris oscuro, negro y rojizo e intemperizan en oscuro, la matriz subordinada de arena y limo está formada por cuarzo, feldespato, mica y productos de alteración como sericita, caolinita y clorita, cementados con sílice o calcita. Los guijarros de este conglomerado polimíctico oscilan de un tamaño fino a medio, poseen gran esferosidad, la matriz de arena que en algunos sitios se ha introducido en los intersticios de la grava después del depósito aglomerada por la calcita y la sílice, son derivados típicos de graveras marinas formadas sobre playas de transgresiones y regresiones. Están asociadas a cuarcitas sedimentarias y forman lentes que pueden tener gran extensión pero que son relativamente delgadas e incluso desaparecen localmente como los que se observan al sur-suroeste del área de interés, el espesor de este conglomerado es muy variado alcanzando hasta unos 80 metros.

Arenisca-Conglomerado Siglas Ti(ar-cg). Unidad depositada en un medio fluviolacustre en alternancia. Descansa en forma discordante a las calizas de Cretácico Inferior y a Formación Huajuapán de edad Terciaria (INEGI, 1994). Consiste en una serie de areniscas, cenizas volcánicas, arcillas arenosas y capas de conglomerados y brecha que ocurren interestratificadas. La litología es muy variada, se distinguen diversos paquetes discontinuos de diferente granulometría, grado de cementación y resistencia a la erosión; en algunos sitios predominan fracciones areno-conglomeráticas bien cementadas, de colores rojizos, con clastos de areniscas, caliza y cuarzo con cantidades menores de pedernal, calcedonia de geometría subredondeadas y redondeadas; los granos están moderadamente seleccionados, bien cementados, de estratificación gruesa mayor de 2 milímetros de diámetro, en alternancia con capas de limo-arenosas tobáceas de colores amarillento, rojizo, rosa y verdoso, con esporádicas vetas de 2 centímetros de espesor de yeso. La estratificación de los afloramientos es subhorizontal con una ligera inclinación hacia el noroeste de entre 3 y 12 grados, su espesor es muy variable hasta de 200 metros, como los que se observan en las inmediaciones de la barranca las Campanas y la Agencia Municipal de Agua Dulce.

Rocas volcánicas básicas e intermedias, siglas: Tom(A), Tom(A-Bvi), Ts(A) y Ts(B-Bvb). Se les encuentra en discordancia angular a gran parte de la secuencia sedimentaria terciaria y en partes a la cretácica (INEGI, 1994. López-Ramos, 1983). Dentro de este paquete de



rocas se ha incluido todas las rocas volcánicas de composición andesítica, basáltica, brechas y tobas, cuyas áreas de afloramiento en algunos sitios son de extensión muy pequeñas.

Lavas de composición andesítica y basálticas se encontraron en las partes superiores de esta unidad. Los afloramientos localizados al norte y poniente del área muestran las estructuras fluidales en la que destacan cristales de oligoclasa, vidrio, olivino, cuarzo, biotita, clorita; los colores varían de gris claro, amarillento, rosa (con bandeamiento de color un poco más oscuro) a verdoso; el estado en que esta es relativamente caolinizado, en una matriz vítrea de composición ácida, con presencia de clástos psamíticos bien seleccionados, intercalados y la estratificación de las tobas indican una acumulación en un medio acuático, el drenaje en las partes altas de esta unidad está bien marcado, no se observa ningún espaciamiento regular ni aparentemente posee control estructural.

Las tobas se encuentran comúnmente en bancos gruesos de espesores mayores de un metro, pero se encuentran capas de 10 a 30 centímetros con un contenido regular de arenas, los colores son claros, rojizos y blancos, entre los componentes visibles se notan además del caolín, líticos de las rocas subyacentes, cuarzo, calcedonia y plagioclasa. Es común observar en las tobas estructura vesicular o huecos debido a remoción de materiales como es la arcilla de color verde (bentonita) que se había formado por alteración de fragmentos grandes, pequeños cristales de biotita fueron observados en varias muestras, las rocas de esta unidad son bastante resistentes a la erosión de tal forma que destacan entre las que las rodean, se observan pseudoestratificados arenosas y arcillosas.

Los basaltos presentan características muy similares a lo largo de todos los afloramientos en que se les encuentra, se trata de una roca gris oscura en la que ocasionalmente destacan algunos pequeños cristales de hasta 0.3 milímetros de color blanco en una matriz totalmente afanítica de color gris, frecuentemente la roca es de textura completamente afanítica y compacta, en algunas partes cercano al Río Mixteco se localizan en forma de colas de color oscuro en ocasiones se encuentra relleno de huecos en la roca debido a fracturamiento o a vesicularidad, muchas de las superficies de fracturas presentan películas con oxidación incipiente, en algunos sitios la superficie de intemperismo ha desarrollado una pátina de color negro brillante y de aspecto algo metálico, por observaciones directas de campo y de acuerdo con su área de afloramiento con su tendencia estructural y con los desniveles topográficos, se consideró tentativamente para esta formación un espesor máximo de 250 metros en las inmediaciones de Zapotitlán Palmas y los basaltos columnares en Tezoatlán de Segura y Luna. .

Aluvión, siglas: Q(al) y Q(re). Son depósitos de relleno recientes de origen aluvial, consisten de fragmentos líticos y minerales, con tamaños correspondientes a las arcillas, limos, arenas, gravas poligmítica y guijas derivados de la denudación de las rocas preexistentes en el área, sin que presenten consolidación. Estos depósitos se encuentran en los valles de Tlaxiaco, Juxtlahuaca, Teposcolula, Silacayoapan, Mariscala de Juárez, Santiago Chazumba, Santo Domingo Tonalá, Teotongo-Tamazulapan, del Río Tejuapan, del Río San Juan, del Río Chilapa, Huajuapam, la Junta, Huajolotitlán, Camotlán, Cuyotepeji y Santiago Miltepec, siendo particularmente abundantes los cantos rodados, las calizas y los volcánicos. Uribe (1999) clasifica al aluvión en dos unidades que no han tenido descripción específica previa, por lo que le asigna informalmente los nombres de Grava Camotlán y



Arena Xochitlapilco. Esta unidad sobreyace a las unidades de Ti(ar-cg) y Tom(B-Bvi). Se estima que el espesor alcanza alrededor de los 5 metros. Uribe le atribuye una edad pleistocénica

TRAVERTINO. En Tamazulapan y sus alrededores se encuentran depósitos de esta roca que es conocida popularmente en la región con el nombre de “piedra de agua”. Estos depósitos están asociados con manantiales como el de Atonaltzin que se encuentra cerca del cruce del camino a Tamazulapan-Teotongo y el Río de Tejupan en donde se observa que el travertino ha sido precipitado de las aguas del manantial. El espesor aproximado de los depósitos es de unos 30 m.

CALICHE. Extensas y gruesas capas de caliche se encuentran sobre todo cubriendo parcialmente a la Formación Chilapa, a las rocas volcánicas asociadas a ella a los sedimentos de la Formación Yanhuítlan, Hacia el norte de Tejupan se observa un gran afloramiento de caliche de un espesor de hasta 2 m que cubre a una loma grande y relativamente baja, impidiendo observar que hay debajo. El origen del caliche es problemático aunque hay autores que consideran que se debe a la exudación capilar del  $\text{CaCO}_3$  presente en la zona freática y otros que consideran que se deba a intemperización y disolución de los guijarros calcáreos que alguna vez ocuparon el área donde ahora observamos el caliche. Probablemente ambos procesos intervengan en la génesis del caliche. Los productos del intemperismo mecánico y químico in-situ que han sufrido las rocas y que han permanecido ahí, constituyen el suelo, su naturaleza depende fundamentalmente de las rocas preexistentes en cada localidad.

ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS. Rocas Intrusivas, siglas: Igbi, Igi y dique. En la región de la Mixteca Oaxaqueña se observan varios afloramientos de rocas ígneas intrusivas que formaron diques y diquestratos(sill), de composición variable de ácidas a básicas que cortan a las diferentes unidades del Paleozoico, sin pasar por la cubierta Mesozoica. La composición de estos cuerpos permite dividirlos en dioritas o diabasas, pórfidos riódacíticos y monzonita cuarcífera. En general se considera que estas unidades son pórfidos sienéticos y apófisis de textura fanerítica, de color gris claro a oscuro, con tonalidades de grisáceas y verdosas por intemperismo. Se encuentran intrusionando a rocas paleozoicas y mesozoicas (INEGI, 1994) aflorando en forma de promontorios. Las unidades de Igbi e Igi se han cartografiado en los alrededores de San Miguel Ixítlán, donde el espesor visible es de casi 700 metros (cerro el Espinazo); en Ahuehuetitlán de González, espesor de 400 metros (cerro la Peña); en Santa María Camotlán, con espesor menor a 100 metros, cerca de la cañada el Jazmín. Los diques afloran en las cercanías de Ahuehuetitlán de González, Santa María Camotlán, San Francisco el Grande, Santiago Ayuquillilla, Santiago Tamazola, su extensión resulta variable al igual que su anchura. También se encontraron evidencias de mineralización en los sitios que estas unidades afloran. En numerosas localidades del área afloran rocas ígneas intrusivas posteriores al depósito de los sedimentos Terciarios. Estos se han distribuido tentativamente al Terciario tardío, aunque pudiera haberse emplazado también durante el inicio del Cuaternario. Su morfología indica una erosión bastante prolongada. En sus contactos con los sedimentos de las Formaciones Yanhuítlan y Sosola en donde se nota alteración química y deformaciones de los sedimentos. La mayor parte de las rocas ígneas de la región constituyen intrusivos concordantes, con estructuras de mantos y lacolitos. Estas últimas forman pequeños domos



en la superficie, alrededor de los cuales los estratos Terciarios se levantan con fuertes inclinaciones. Los intrusivos están particularmente bien representados en la sierra que separa el valle del Río Nochixtlán del valle de Tamazulapan, donde afloran estructuras complejas. En esta localidad están posiblemente asociadas con un núcleo ígneo más antiguo contemporáneamente al depósito de los sedimentos Terciarios. Se han podido distinguir por lo menos dos períodos de intrusión penecontemporáneos; Sin embargo, no se han separado en el mapa por razones de escalas. Algunos mantos intrusivos son anteriores a los cuerpos lacolíticos ya que en la Formación Sosola que contienen fragmentos derivados de los primeros están intrusionada por cuerpos lacolíticos. La composición de las rocas intrusivas es generalmente andesítica, sin embargo pueden variar hasta dacíticas. Este magmatismo intrusivo se conoce hasta el área de Huajuapán de León donde muestra su máxima expresión. En el afloramiento de Tiñú y aprovechando la línea de debilidad formada por la falla oriental de la fosa tectónica fue intrusionada una roca de color oscuro verdoso muy alterada de posible composición diorítica o diabásica. En el área de Santiago Ixtaltepec, una roca de similar composición forma un diquestrato que aparece cerca de la base de la Formación Ixtaltepec, debido al poco espesor de los diques básicos. En el arroyo de atoyac un diquestrato de una roca clara intrusionó las capas lutíticas de la Formación Santiago, observándose al microscopio está roca es microcristalina, muy alterada, con abundante cuarzo, andesina, oligoclasa, ortoclasa muy alterada o remanentes de biotita y abundante calcita. Los cristales se encuentran rodeados por un mineral de alteración de color café y amarillento, posiblemente stilpnomelano. Por su composición esta roca puede ser una monzonita cuarcífera o adamelita. En toda la porción occidental de Santiago Ixtaltepec se encuentran numerosos diques porfídicos que cortan a las rocas del Paleozoico superior. Estos cuerpos se encuentran bien expuestos en las barrancas de los arroyos y sobre las veredas que parten de Yododeñe y van a los alrededores de Santiago Ixtaltepec, arroyo totoyac y tierra caliente, varias muestras de estos diques contienen abundantes fenocristales de cuarzo de hasta 5 mm. y fenocristales de feldespato de 2 mm. que flota en una pasta de color gris a rojizo, Observada al microscopio la matriz es microcristalina en la que aparecen abundantes fenocristales de cuarzo, oligoclasa, andesina, sanidini y en menor proporción escamas de biotita. Los feldespatos muestran una mediana alteración deutérica consistente en escamas de sericita, halos de oligoclasa en el sanidino y polvo de hierro alrededor de los cristales de biotita. Por el conjunto de sus elementos mineralógicos esta roca se clasificó como un pórfido riódacítico.

### 3.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Al describir las unidades sobre los rasgos estructurales más sobresalientes, las características de dichas estructuras y se presentan ideas en cuanto a la génesis, edad y relaciones de las mismas. El área se encuentra dentro de la provincia morfotectónica Sierra Madre del Sur (Guzmán y De Cserna, 1963. P 115).

**ESTRUCTURA DE LAS ROCAS CRETÁICAS PLIEGUES.** Las rocas cretácicas forman anticlinales complejos, orientados en dirección norte-sur separados por un sinclinal estrecho. Los anticlinales están constituidos por calizas de la Formación Teposcolula, estas estructuras no son simétricas sino que la occidental es mucho mayor y más compleja que la oriental. El anticlinal occidental tiene una forma signoidea abierta cuya forma



recuerda a una corbata de moño siendo la parte central más estrecha que los extremos. Los ejes de los pliegues accesorios están más cerca entre sí en la región central y se separa hacia los extremos. El eje del anticlinal en la mitad norte tiene una dirección NNW, mientras que la mitad sur su dirección es SSE. El anticlinal buza en ambas direcciones, sin embargo, cerca del extremo sur se observa un cambio en la dirección de buzamiento siendo nuevamente hacia el norte generándose una estructura de silla de montar, sugiriendo que el plegamiento está complejo. El anticlinal oriental en realidad está formado por dos anticlinales menores separados incompletamente por un sinclinal ocupados por sedimentos de la Formación Yanhuitlán y aluviones. Ambos anticlinales buzan hacia el sur. El sinclinal está constituido por la marga Yucunama, esta estructura tiene forma de arco (cóncavo hacia el oriente) y buza hacia el NNW. El eje del sinclinal también está desplazado hacia el oriente. Este macizo central del Cretácico se continúa hacia el sur hasta las inmediaciones de Tlaxiaco.

FALLAS. Examinando el plano estructural se observa que las rocas de edad Cretácicas son las que presentan menor número de fallas y que tienen una orientación general de NE60°SW y NW50°-60°SE, cortándose en ángulos de 60° y 120° respectivamente. También se observa que las estructuras de las rocas Cretácicas terminan abruptamente sugiriendo desde luego la presencia de fallas o zonas de fallamiento sepultadas de dimensiones regionales, que determinaron el levantamiento de las rocas Cretácicas, formando un alto estructural y topográfico. La traza aproximada de estas fallas o zonas de fallas sepultadas corresponden aproximadamente a la carretera federal No. 190 por el segmento Tamazulapan, Yucudaac, Tlaxiaco y el Río San Juan en el tramo NE-SW, para la zona oriental y el camino Tamazulapan Barrio de Guadalupe para la zona occidental, Por lo que respecta al tramo E-W del Río San Juan que mediante un cañón profundo separa a las rocas Cretácicas probablemente corresponda a una fractura o a una falla de desplazamiento vertical de pequeña magnitud.

ESTRUCTURAS Y LA TECTONICA REGIONAL. En las unidades es evidente que tanto el plegamiento como el fallamiento son post-Marga Yucunama pre-Conglomerado Tamazulapan (Cárdenas, 1966. P 140) considera que la Orogenia Laramide es responsable del levantamiento del continente y del plegamiento y fallamiento de las rocas premesozoicas. Por lo que respecta a los esfuerzos que generaron este plegamiento, tenían el componente principal orientado en dirección E-W, ya que los pliegues tienen un rumbo general N-S donde se interpreta que los pliegues de las calizas en la Formación Morelos se originaron por una compresión subcortical, traducida en la superficie por fuerzas opuestas que actuaron en direcciones E-NW-W-SE probablemente algo semejante ocurrió aquí (De Cserna, 1967. P166 considera que el plegamiento de bloques continentales a lo largo de la falla límite continental Jalisco-Nicoya, constituye una explicación razonable del panorama tectónico de México y Centroamérica y estima que el sentido de desplazamiento fue SSW-NNE.

ESTRUCTURAS DE LAS ROCAS TERCIARIAS **FORMACION YANHUITLAN**. La posición estructural de esta formación regionalmente considerada es casi horizontal aunque localmente se observan echados de 10| a 50°; que no obedecen a un diseño regional sino que están al azar. En unos cuantos casos por ejemplo el afloramiento que se encuentra entre los kilómetros 56° y 57° de la carretera federal No. 190, se observa un sinclinal muy abierto



cuyo eje tiene un rumbo general de N70|W. La naturaleza misma de esta formación no favorece el desarrollo de pliegues. Se tiene la presencia de un complejo sistema de fallas y fracturas cuya orientación preferencial es de NW35°SE y de NE50°SW, cortándose en ángulo casi recto. La mayor parte de las fallas tienen desplazamientos verticales del orden de los 5 a 10 m. y probablemente son debidas a fenómenos de asentamiento. Por tanto las direcciones de las rocas del área son promedios de mediciones y tienen un carácter tentativo. Se observa una falla regional en este sistema que es la del Río Negro que cruza a la carretera federal No. 190 cerca del kilómetro 67. Esta falla es muy espectacular presentando bloques con las capas dispuestas verticalmente siendo una falla normal, el bloque caído es el occidental, el rumbo aproximado es de N-SSE, casi paralelo al eje de los anticlinales del macizo central. el desplazamiento vertical es del orden de los 100 m. Anteriormente se había mencionado la estrecha relación que existe entre esta falla y los cuerpos intrusivos adyacentes, Suponiendo que exista una relación causal es probable que puedan explicarse así La emisión de material magmático resultante del emplazamiento de los cuerpos intrusivos, produjo falta de apoyo para las rocas sobreyacentes, lo cual finalmente determinó el colapso de las mismas. Una explicación alternativa es que el emplazamiento del cuerpo intrusivo principal produjo levantamiento creciente de la roca encajonante hasta causar el fracturamiento y fallamiento de la misma.

**COMPLEJO PIROEPICLASTICO.** Las rocas de esta formación muestran una posición estructural casi horizontal, Presentan un menor número de fallas y fracturas que la Formación Yanhuatlán, lo cual no es sorprendente toda vez que esta última está menos endurecida que la primera. También se aprecian dos direcciones preferenciales en el sistema, ambas semejantes a las que se observan en la Formación Yanhuatlán que es de NE50°SW siendo la más frecuente.

**FORMACIÓN CHILAPA** Regionalmente se considera la posición estructural de la Formación Chilapa que es aproximadamente horizontal, sin embargo localmente muestra cambios notables causados por fallamiento o más comúnmente pliegues por deslizamiento. En estas rocas se aprecia un número relativamente menor de falla y fracturas que en la Formación Yanhuatlán y mayor que en la del complejo Piroepiclástico Llano de Lobos . La orientación es de N-S, E-W, NE60°SW y NW30°SE, sugiriendo la existencia de dos sistemas conjugados superpuestos. Es muy notorio cómo el sistema de drenaje concuerda notablemente con el sistema de fallas y fracturas. Las fallas observadas son normales , casi verticales y tienen desplazamientos de hasta 30 m. comúnmente.

**ESTRUCTURA EN LAS ROCAS VOLCANICAS E INTRUSIVAS.** Estructura de las rocas volcánicas. Tanto en la andesita Yucudaac como en la andesita San Marcos se ha desarrollado un sistema de diaclasas o fracturas cuya dirección preferencial es NE30°-50°SW que aproximadamente coincide con el sistema de fracturamiento de la Formación Yanhuatlán. El número de fallamiento es pequeño, observándose mayor número en las rocas andesíticas. En estas rocas, algunas de las fallas tienen una dirección N-S, la cual es la misma que una de las direcciones preferenciales de la Formación Chilapa. Bien puede ser que tuvieron alguna relación.



**LAS DIABASAS SUCHIXTLAHUACA.** Presenta un desarrollo pobre de diaclasas, se observa en algunos lugares la presencia de diaclasas verticales, sin duda relacionadas al enfriamiento del cuerpo intrusivo.

## 4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.

El abrupto relieve de la entidad Mixteca Oaxaqueña atestigua una larga y compleja historia geológica, indicada desde el Pre-cámbrico y continuando en múltiples etapas hasta el presente. Pueden comprobarse tales etapas mediante el estudio de numerosas secciones cuyo conjunto, forman la columna geológica probablemente más compleja en todo el territorio Mexicano. Sin embargo, todavía existen zonas de la entidad Oaxaqueña que carecen de estudios geológicos y por tal razón, ciertos detalles estructurales y dinámicos no son aún bien conocidos.

### 4.1 FISIOGRAFÍA

La entidad queda comprendido en la porción norte por el Eje Neovolcánico en la Subprovincia Sur de Puebla, caracterizado por sierras altas y complejas: dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur en las subprovincias: cordillera Costera del Sur, Sierras Orientales, Sierras Centrales de Oaxaca, Mixteca Alta y Costera del Sur; caracterizadas por: Sierra Volcánica de laderas tendidas, Sierra de cumbres tendidas, Sierra Baja, lomeríos asociados con llanuras, Valle de laderas tendidas, Sierra alta y compleja, Valles asociado con lomeríos, Cañones, Sierras asociada con cañadas bajas y complejas, Lomeríos asociados con cañadas, Mesetas asociados con lomeríos de aluviones antiguos y Valles asociados con lomeríos de laderas tendidas. (INEGI, 1981). Las elevaciones oscilan entre los 900 hasta los 3350 metros sobre el nivel del mar.

La Sierra Madre Oriental al NE del área de la Mixteca Oaxaqueña, compuesta esencialmente por rocas calcáreas del Mesozoico, plegadas y fracturadas en el Terciario y Cuaternario, sus cotas apenas sobrepasan los 2000 metros sobre el nivel del mar, con fuertes declives hacia la llanura costera de Veracruz, cortados por el profundo cañón del Río Santo Domingo, al W de la Sierra Madre Oriental.

La Sierra Madre del Sur, Subprovincias Sierras Centrales de Oaxaca y Mixteca Alta. La primer subprovincia se localiza hacia el este y abarca el 16% del área de estudio; colinda al oeste, norte y este con la Subprovincia Sur de Puebla, al sur con la Mixteca Alta y al sureste con las Sierras Orientales; tiene una orientación noroeste-sureste (INEGI, 2002a y b); la segunda cubre el 64% de la zona; limita con las subprovincias: Sur de Puebla, en el norte y Sierras Centrales de Oaxaca, en el este. Presenta un núcleo constituido por una sierra baja compleja de aluviones continentales antiguos y rocas metamórficas (gneis). Alcanza altitudes superiores a los 2 400 metros y se encuentra rodeada al este, oeste y norte por lomeríos escarpados. La litología que la conforma es compleja, incluye materiales metamórficos (gneis), ígneos intrusivos ácidos y sedimentarios continentales antiguos. Al occidente tiene una franja, orientada norte-sur, de llanura con lomeríos; y al norte, un valle de laderas tendidas; además, hay otros sistemas de topofomas: lomeríos con cañadas y lomeríos con llanuras (INEGI, 2002a y b). Esta última provincia se considera la más



compleja y menos conocida del país, y debe muchos de sus rasgos particulares a su relación con la placa de cocos. Esta relación es la que seguramente ha determinado que alguno de los principales ejes estructurales de la provincia -depresión del Balsas cordilleras costeras, línea de costa, tengan estricta orientación este-oeste, condición que tiene importantes antecedentes en la provincia del Eje Neovolcánico, y que contrasta con la predominante orientación estructural noroeste-sureste del norte del país. La provincia tiene una litología muy compleja en la que las rocas intrusivas cristalinas, especialmente los granitos y las metamórficas, tienen más importancia que en la mayoría de las provincias del norte. En la provincia, un sistema fluvial importante es el río Balsas, uno de los siete mayores del país.

**La Mixteca**, complejo y vasto saliente en el noroeste del área Oaxaqueña, con rocas variadas y columna geológica que se extiende desde el Pre-cámbrico hasta el Pleistoceno. El cañón de Tomillín, estudiado por E. Ordóñez, separa a la Mixteca Alta de la Sierra Madre Oriental, pero no es fácil definir los límites de la primera en las otras direcciones. Geohidrológicamente es importante señalar que el cerro Verde, entre Tamazulapan y Yanhuitlán, es un vértice de división de aguas que van del Río Atoyac y al Río Mixteco (afuentes del Balsas). con toposformas de sierras complejas.

El Eje Neovolcánico, Subprovincia Sur de Puebla, se localiza hacia el noroeste, abarcando un 20% del área de estudio, colindando con la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Golfo Sur, entre los límites de los Estados de Oaxaca y Puebla. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años) hasta el presente (INEGI, 2002a y b). En toda la parte sur de la provincia desde Michoacán hasta Puebla se originan afluentes del Balsas.

## 5. HIDROGRAFÍA.

Las unidades que afloran en la región de la Mixteca Oaxaqueña datan del Pre-Cámbrico al Pleistoceno. Las complejas condiciones geológicas controlan el drenaje de la región, la litología es tan variada que propicia un gran número de patrones de drenajes diferentes a nivel local de los que destacan el dendrítico y el paralelo integrado. Los regímenes de las corrientes son tanto perennes como intermitentes y se encuentran integrados a las redes hidrográficas pertenecientes a las vertientes del golfo y del pacífico.

**CUENCA DEL RIO PAPALOAPAN.** Esta cuenca ocupa una parte del, cuadrángulo Nororiental y drena al Golfo de México. El arroyo de Suchixtlahuaca y el de Otlá son las principales corrientes, ambos tienen una dirección de N-S.

**CUENCA DEL RIO VERDE.** Esta cuenca tiene una extensión pequeña, ocupa la porción Suroriental y drena al Océano Pacífico. El Río Negro y el Río Yanhuitlán-Nochixtlán constituyen las corrientes principales, tienen una dirección NWW-SSW, misma que coincide con una de las direcciones del sistema de fallamiento y fracturamiento de la Formación Yanhuitlán, el cual parece ser el factor que controla la red de drenaje de esta cuenca.



**CUENCA DEL RIO BALSAS** Esta cuenca ocupa la mayor superficie y drena también al Océano Pacífico. Se encuentran tres subcuencas, drenadas a su vez por otros tantos ríos. El Río Tejuapán, El Oro, en dirección E-W, drena las porciones de la cuenca. El Río San Juan, de dirección NNE-SSW y E-W drena la porción Oriental de la cuenca, El Río de Chilapa, de dirección NNW-SSE, drena la porción Occidental de la cuenca. Hacia la margen Occidental del Macizo Central, se desarrolló una subcuenca endorreica lacustre, originándose en sus alrededores los pueblos de San Isidro y San Andrés Lagunas.

El parteaguas continental que separa a las vertientes del Golfo y del Pacífico tiene una dirección NW-SE, separando a la cuenca del Río Papaloapán de las otras dos. El parteaguas hidrográfico que separa a las cuencas del Río Balsas y del Río Verde tiene una dirección N-S principalmente. La red de drenaje está formada por ríos y arroyos de flujo intermitente, cuya existencia se confina a la época de lluvias. Durante el resto del año los ríos más grandes conservan un poco de agua corriente o estancada en diversas partes del canal principal, mismas que se emplean como abrevaderos por los habitantes de la región.

## 6. CLIMATOLOGÍA.

El accidentado relieve de la zona, así como las variaciones altimétricas condicionan la localización de los climas dominantes con lluvias en verano, que permiten distinguir tres sectores: al oeste templado subhúmedo con variación de altura y degradación hacia el extremo occidental en la Sierra Madre del Sur y las serranías de la Mixteca donde se distinguen temperaturas medias en torno a 18°C. y 6°C. (Santa María Asunción Tlaxiaco). Las precipitaciones oscilan entre los 900 y 700 milímetros.

La precipitación media anual, según el sistema de Thornthwaite (1948), tiene un registro mínimo de 500 mm. en el centro y norte del área y un máximo en la zona noreste con 1000 mm. La evaporación potencial media anual en la zona (presa Yosocuta) es de 2294 mm.

La región de la Mixteca Oaxaqueña es afectada por fuertes lluvias asociadas por los huracanes, localizados en el golfo de Tehuantepec y en las costas de Campeche.

El clima de la región es templado lluvioso, con lluvias en verano e invierno seco; clima (Cwbg) según la clasificación de Köppen. La precipitación pluvial anual es del orden de 700 a 900 mm. La temperatura media anual es del orden de 10°C a 16°C. Los vientos dominantes proceden del Norte (NNW), ocurre el fenómeno de las heladas. La vegetación que corresponde a este clima es de tipo pradera (Vivo 1946 y Tamayo, 1949). Este esquema climatológico regional presenta considerables variaciones locales controladas fundamentalmente por el relieve y la litología del sitio.

### 6.1. CLIMA Y VEGETACIÓN.

Por su posición geográfica la región Mixteca Oaxaqueña presenta los climas: semiseco muy cálido y cálido con una temperatura media anual de 26° centígrados; semiseco templado



con temperatura media anual de 17° centígrados, templado subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura media anual de 16° centígrados, semicálido subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura media de 20° centígrados y cálido subhúmedo con lluvia en verano y una temperatura media de 27° centígrados. La vegetación característica es de selva baja y media caducifolia espinosa, compuesta por cuajilote, pochote y algunos pinos, coníferas, encinos y matorrales (INEGI, 1981).

## 7. FORMACIONES ARCILLOSAS EN MÉXICO

Los trabajos de investigación realizados por Enciso (1968) y De Pablo (1990) indican que el territorio nacional estuvo sujeto a una gran actividad volcánica durante los periodos Oligoceno-Mioceno, lo cual provocó la formación de enormes depósitos de rocas vidriosas que a su vez fueron alteradas y dieron origen a la mayor parte de las arcillas que encontramos en México. Estas son, por lo regular, del tipo montmorillonita y sus formaciones más abundantes se localizan al norte del país, en el Estado de Durango, siendo las de Cuencamé, Velardeña, Pedriceña, Rodeo y Nazas las más conocidas y las que actualmente se encuentran en explotación.

También existen depósitos importantes en Puebla, en los límites de Tlaxcala y Puebla, en Chupaderos, Zacatecas, en Oaxaca, en Neutla, Guanajuato, en Huayacocotla, Veracruz y en numerosas formaciones menores localizadas en las antiguas zonas lacustres como el valle de México (Figura 4).



Figura 4. Depósitos arcillosos en México.



Sin duda la zona localizada en Durango es la más extensa y se sabe ahora, gracias a los trabajos de Enciso y De Pablo que esas arcillas fueron originadas por la alteración de las rocas piroplásticas depositadas previamente en el valle por medio de una nube ardiente. La subsecuente alteración de tales rocas ígneas y la deposición del material alterado en suelo seco dio origen al mineral arcilloso más rico en potasio, como el de la zona de Vizcarra, mientras que el mineral depositado en la zona lacustre (de origen marino aparentemente) se alteró y produjo las arcillas color verde y rosa típicas de la región de Cuencamé. Estas formaciones se encuentran a una altura de 1340 metros sobre el nivel del mar, en el valle de Cuencamé-La Lagunilla, que se extiende hasta Pedriceña y por el oeste hasta Rodeo y Nazas, donde la altura disminuye a 1128 m. Esta zona contiene los depósitos más importantes de México, que representan un gran potencial económico. En su mayor parte la calidad de la arcilla es superior, del tipo montmorillonita expandible, y ocurre en concentraciones variables según la zona, es decir 85% en la región de Pedriceña, 50 a 70% en Nazas, un 50% en Las Cuevas y una porción variable en Cuencamé. En esta última se encuentran frentes de color blanco y rosa con espesores entre 2 y 6 m, mientras que la arcilla que se encuentra en contacto con el polvo alterado tiene sólo un espesor de 50 cm y su color es verde, cambiando luego a rosa y presentando frentes de hasta 4 y 8 m de espesor.

## 7.1. ARCILLAS EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA.

Las arcillas son sedimentos de cristales muy fino (<2m), constituidos principalmente por filosilicatos hidratados de aluminio eventualmente con impurezas de otros minerales, como por ejemplo de cuarzo o limonita. Las arcillas son plásticas cuando son mojadas reteniendo su forma cuando se secan. Se les clasifica de acuerdo con los minerales de los filosilicatos predominantes que les confieren las propiedades muy importantes para su uso industrial. Los minerales filosilicatos de las arcillas se dividen en esmectitas o montmorillonitas, caolinitas e ilitas. Las arcillas son las rocas blandas que se hacen plásticas al contacto con el agua, siendo frágiles en seco, y con gran capacidad de absorción.

La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho.

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados [¡1 micra es la diezmilésima parte de un centímetro! o sea la dimensión aproximada de los microbios comunes].

Encontramos pues una serie de conceptos que van más allá de la noción de "tierrita" que teníamos originalmente. Por ejemplo, los sedimentos referidos en la definición anterior son aquellos minerales naturales que se han depositado en los lechos de lagos y mares por la acción de arrastre de los ríos. El material granuloso puede ser tan fino que podríamos poner un gránulo en la pata de una mosca ¡sin que se entere de que lo lleva! Con la ayuda de un microscopio óptico podríamos amplificar la imagen de uno de estos granos hasta llegar a unas dos mil veces, pudiendo observar así el objeto de cuatro micras con el tamaño de un grano de arroz. No obstante, la rugosidad y la estructura interna del grano no son



observables a esos niveles de amplificación. Necesitaríamos de un instrumento más poderoso: el microscopio electrónico, con el que es posible alcanzar una amplificación de unos quince mil aumentos. Así, el grano que veíamos antes como un grano de arroz ahora se nos convierte en una hojuela con los bordes curvados hacia arriba. Esta hojuela se asemeja a las placas de barro en un suelo secado, contraído y agrietado por el Sol. ¿No es así? Ahora bien, ¿qué pasa si observamos la hojuela con mayor amplificación? Veremos que, a medida que aumenta el tamaño de la hojuela, nos vamos concentrando más y más en una pequeña porción del material, donde observamos el borde de la hojuela a 200 000 aumentos, es decir que ahora un centímetro equivale a ¡la veinteava parte de una micra, o sea a cinco millonésimas partes de un centímetro!, así, vemos que, a esta escala, el borde de la hojuela parece formado por una serie de láminas apiladas una encima de la otra, dispuestas como si fueran las hojas de un libro, o de un pastel ¡mil hojas!, ¿no es así?

Aún más, si ponemos en contacto a la arcilla con el agua, veríamos cómo las hojuelas se separan unas de otras, abriéndose, y si las secamos extrayendo el agua absorbida entonces observaríamos el efecto de contracción del espacio entre las láminas, ¡como si fuera un acordeón químico!

Se menciona en las definiciones precedentes que la arcilla es un silicoaluminato hidratado, es decir que desde el punto de vista químico está compuesta de silicio (**Si**), aluminio (**Al**), oxígeno (**O**) e hidrógeno (**H**). Por ello, nada más natural que comenzar nuestro tema echando una mirada a esa familia de minerales, los silicatos, que forman el árbol genealógico de las arcillas.

Las arcillas asociadas a las rocas antes mencionadas, son productos de alteración química y física, las cuales consisten de mezclas de partículas de diferentes propiedades tanto físicas, químicas y mineralógicas. Es decir las arcillas son materiales naturales, terrosos de grano fino compuestos por silicato hidratados, sílice, alumina y agua; conteniendo también cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierras alcalinas. Los depósitos de arcillas pueden cubrir grandes extensiones superficiales o bien ocurrir en zonas reducidas e incluso intercaladas con otros materiales. Las arcillas se clasifican en caolín o arcilla china, plástica o ball-clay, esquistosa o refractaria, bentonita, tierra-fuller y arcillas comunes. Sus usos dependen principalmente de la composición y propiedades químicas; así como de sus características y propiedades físicas.

Las arcillas han sido usadas por miles de años, no así el conocimiento de la estructura molecular y atómica, junto con herramientas para medir y obtener las propiedades químicas y físicas, que han determinado una infinidad de usos, tanto artesanales como industriales. Esto implica que la localización de yacimientos arcillosos promueve la instalación de empresas y fomenta la utilización de mano de obra. Por esta razón es de suma importancia conocer y obtener información de los yacimientos de arcillas de la Mixteca Oaxaqueña, que determine su localización, características generales, uso potencial y tonelaje. Se muestran algunas localidades donde se observan los yacimientos de arcillas como el caolin la montmorillonita y la bentonita en la región Mixteca Oaxaqueña, localidades que en algún tiempo fueros explotadas y otras se encuentran insi-tu.

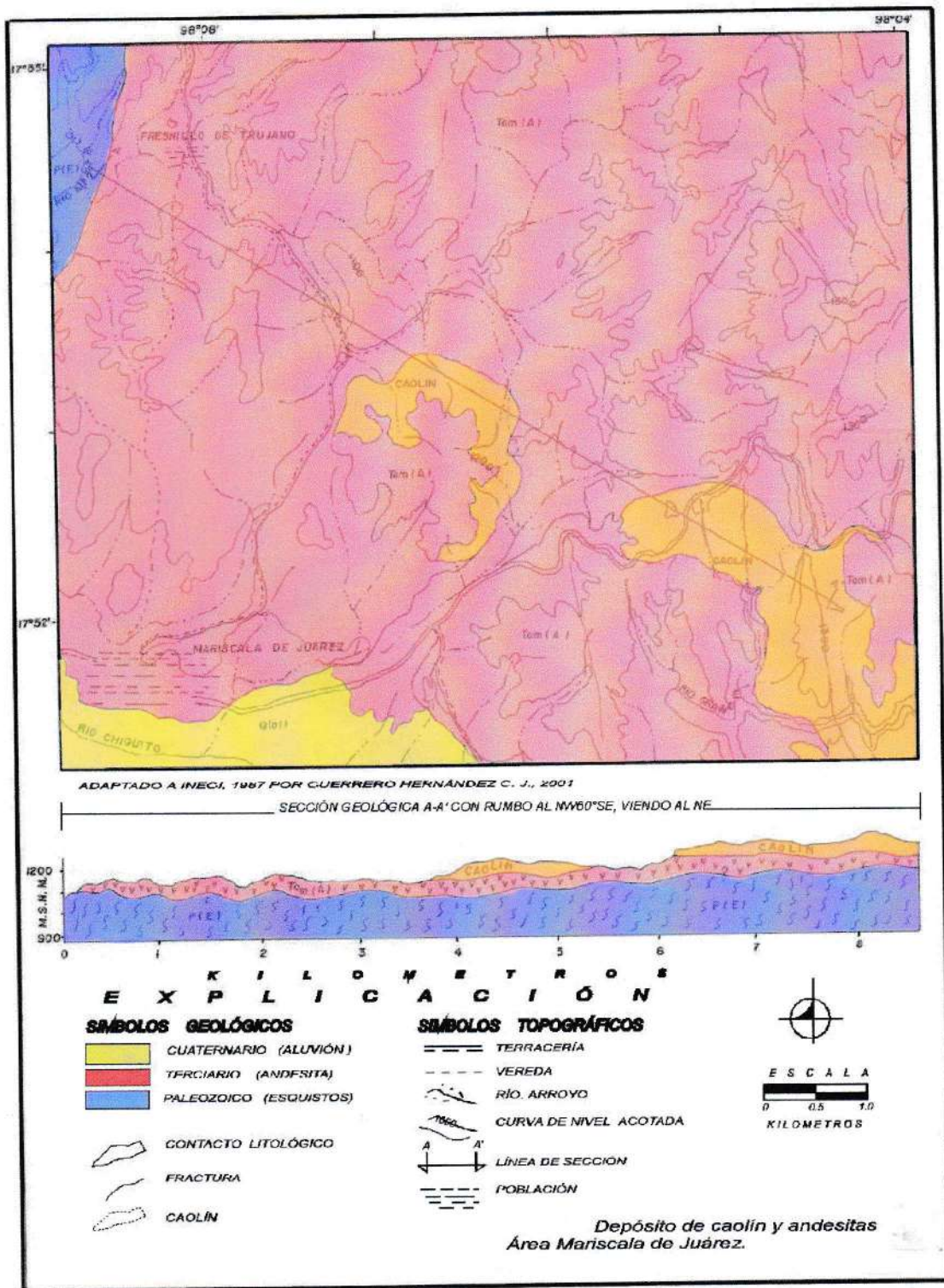


Figura 5. Plano donde se observan los depósitos de caolín en el área de Mariscal de Juárez. Oaxaca.

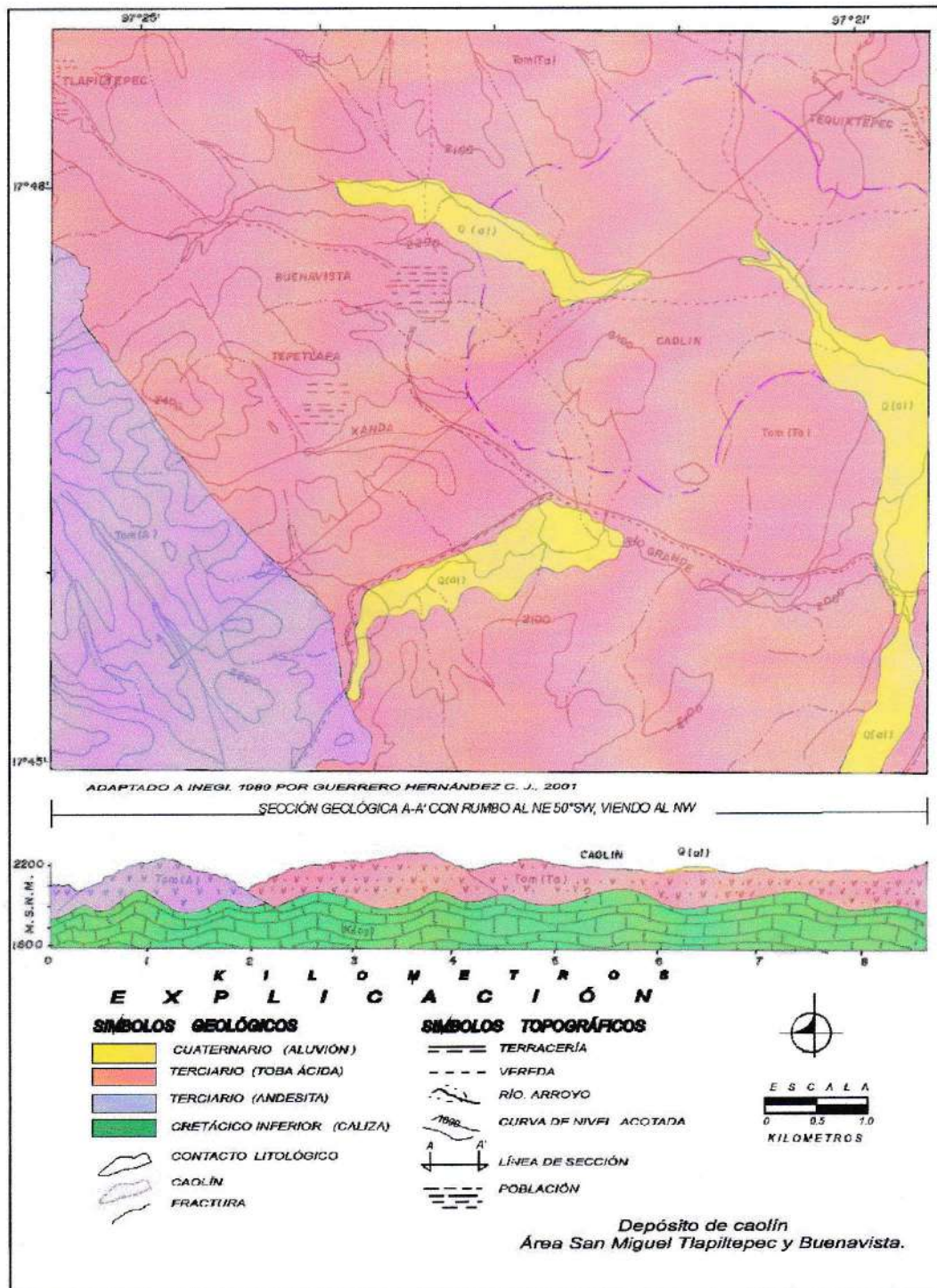


Figura 6. Plano donde se observa el depósito de caolín en las áreas San Miguel Tlapiltepec y Buena Vista, Coixtlahuaca, Oaxaca.

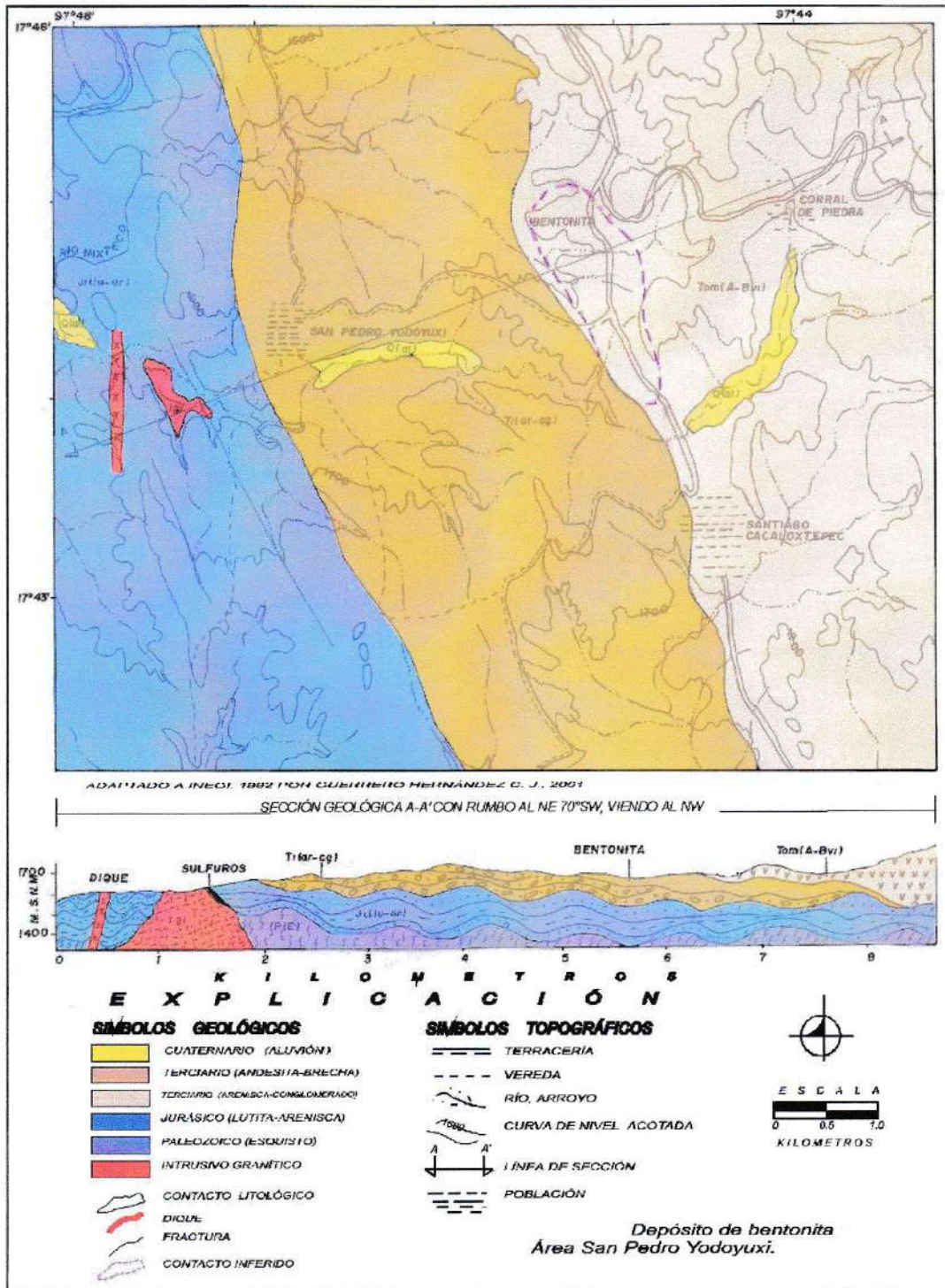


Figura 7. Plano donde se observa el depósito de bentonita en el área de San Pedro Yodoyuxi, Oaxaca.

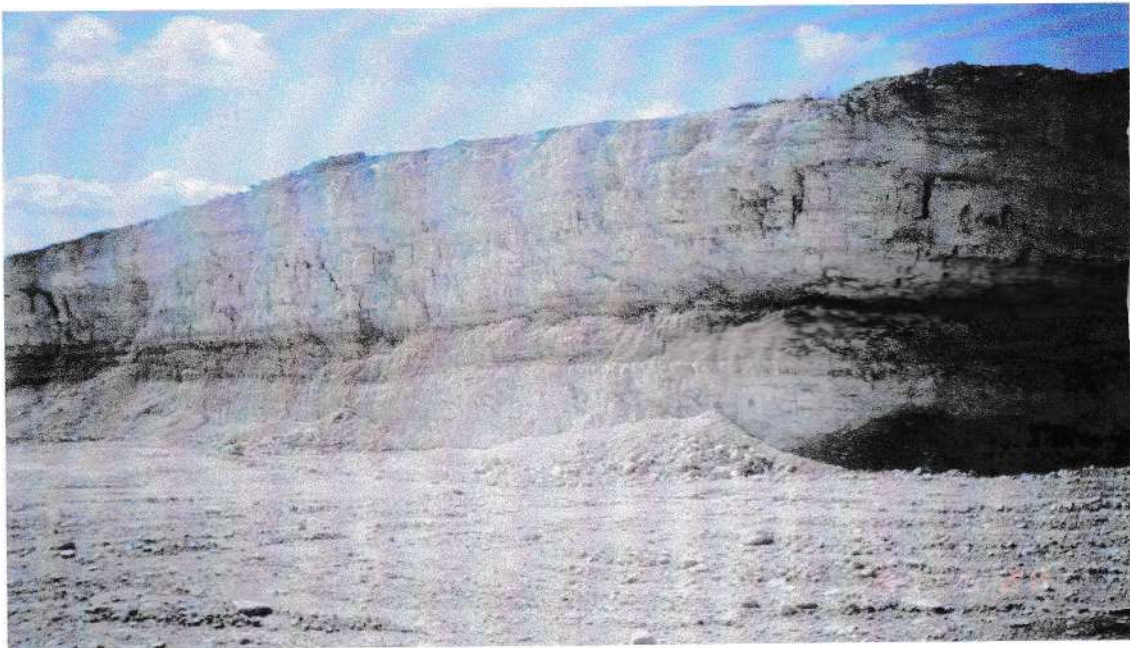


Figura 8: Afloramiento y corte de un banco de caolín y montmorillonita 7m de espesor, en el municipio de San Miguel Tlapiltepec, distrito Coixtlahuaca, Oaxaca.

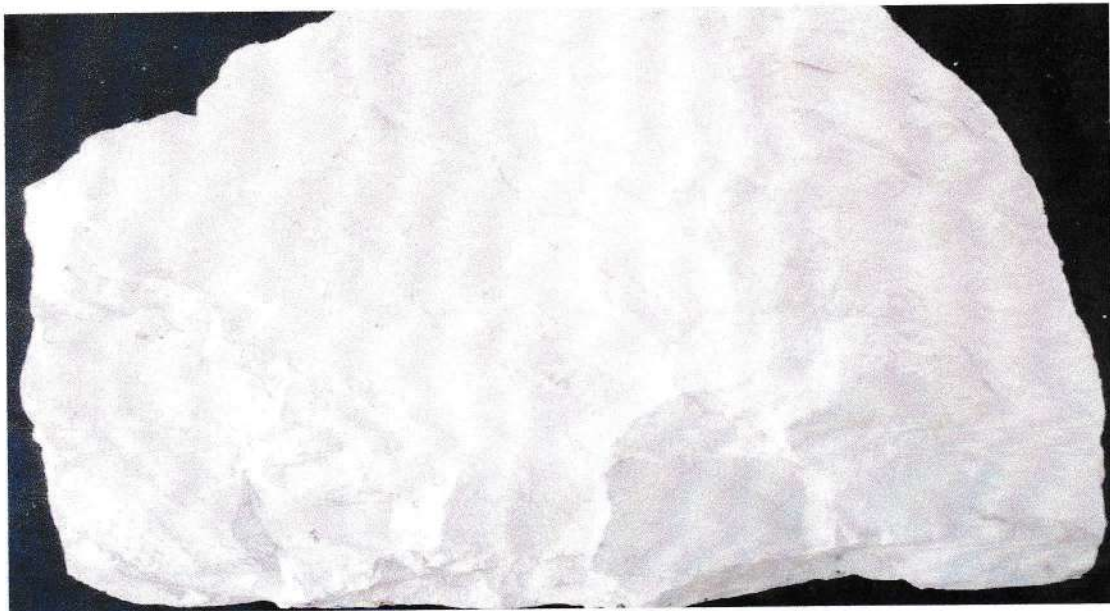


Figura 9. Roca caolinítica de color blanco ubicado en las inmediaciones de San José Buena Vista, municipio Santiago Tepetlapa, Coixtlahuaca, Oaxaca.



Figura 10. Afloramiento de montmorillonita y bentonita corte de la carretera estatal No. 19 que comunica a Huajuapán de León-Tezoatlán de Segura y Luna, Oaxaca.

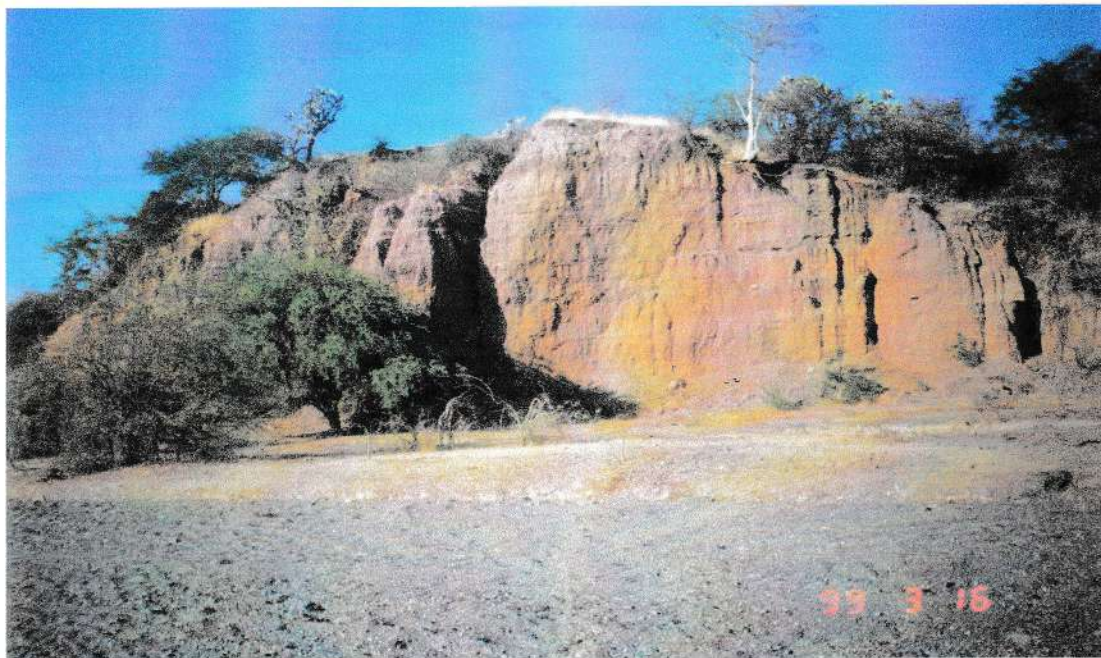


Figura 11. Afloramiento de montmorillonita 8m de espesor, ubicado en la barranca “Los Amates” municipio de San Martín Zacatepec, distrito de Huajuapán, Oaxaca.



Figura 12. Afloramiento de montmorillonita ubicado en las inmediaciones de Santa Carina Río Delgado, Teposcolula, Oaxaca.



Figura 13. Afloramiento de montmorillonita 3m de espesor, ubicado en la barranca Río Manzanas, en Santiago Chazumba distrito de Huajuapán, Oaxaca.

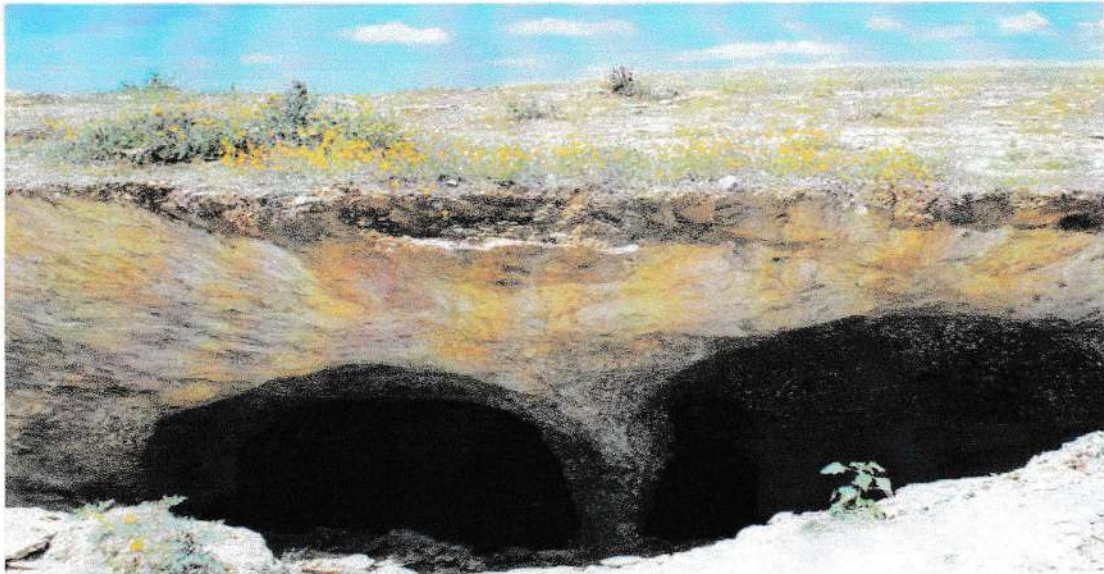


Figura 14. Afloramiento y explotación rudimentaria de arcilla talcosa en las inmediaciones del municipio de Santiago Ayuquílilla, distrito de Huajuapán, Oaxaca.



Figura 15. Afloramiento de arcillas-limosa que sirve como retención del agua pluvial en el municipio de Santiago Ayuquílilla, distrito de Huajuapán, Oaxaca.

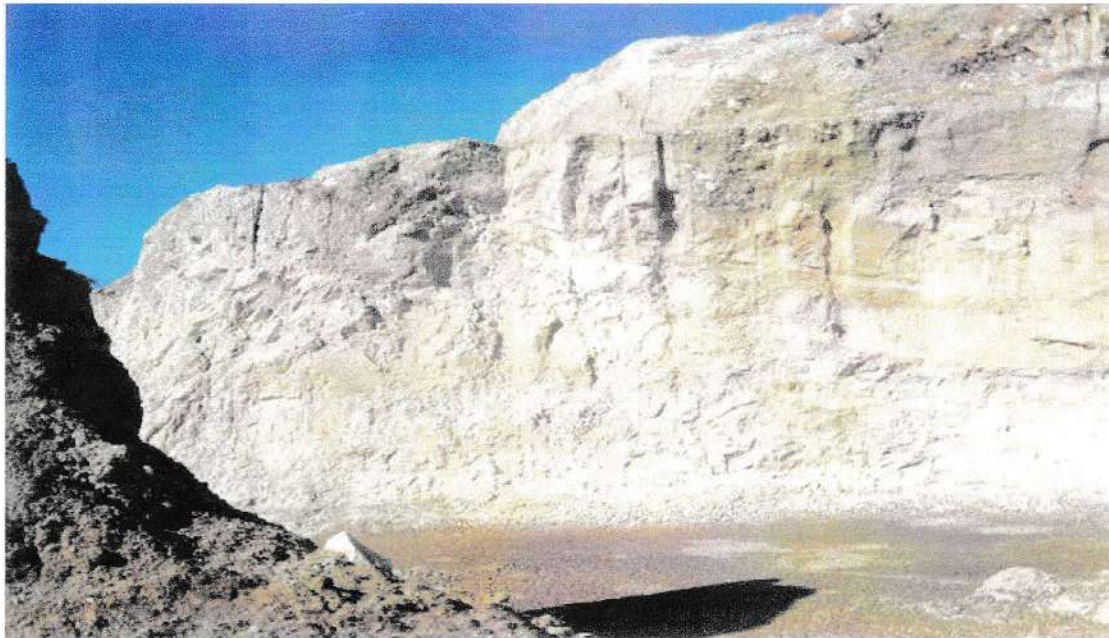


Figura 16. Banco de caolín con 6 metros de espesor en las inmediaciones de Mariscal de Juárez, Oaxaca.



Figura 17. Afloramiento de montmorillonita y bentonita corte de la carretera estatal No. 19 que comunica a Huajuapán de León-Tezoatlán de Segura y Luna, Oaxaca.



Figura 18. Afloramiento de montmorillonita 2m de espesor, ubicado en las inmediaciones de San Jerónimo Silacayoapilla, Huajuapam, Oaxaca.



Figura 19. Afloramiento de montmorillonita con 5 metros de espesor, ubicado en la barranca Río Atotonilco en el municipio de Santiago Ayuquílilla, Huajuapam, Oaxaca.



Figura 20. Afloramiento de montmorillonita con 12 metros de espesor, ubicado en el municipio de Santiago Yucuyachi, distrito Silacayoapan, Oaxaca.



Figura 21. Afloramiento de montmorillonita y caolín 3m de espesor, en las inmediaciones de Santo Domingo Tonalá, Oaxaca.



Figura 22. Banco con 3m de espesor de arcillas para la elaboración de vasijas y recipientes de diferentes formas y tamaños distrito de Tlaxiaco, Oaxaca.

## 7.2. CAOLÍN

**Clase:** Filosilicato (arcilla).

**Composición:**  $Al_4(OH)Si_4O_{10}$

**Propiedades Físicas:** Dureza 2, densidad  $2.6\text{gr/cm}^3$ , agregados terrosos y arcillosos, cuyo color depende de las impurezas presentes y varían entre el gris amarillento, beige y el castaño, blanda, muy ligera, en masa es opaca, mezclada con agua se hace plástica y moldeable, soluble en ácido sulfúrico concentrado en caliente, infusible, pierde agua entre  $390$  y  $450^\circ$  centígrados y cuando seca es muy dura y permanente.

**Ambiente de Formación:** Origen supergénico se forma por alteración, incluso hidrotermal de los felfespatos de otros minerales aluminíferos. La caolinita es el principal constituyente del caolín o de arcillas, como uno de los productos de la descomposición de las rocas, se halla en suelos y al ser transportado por las aguas se deposita, mezclado con cuarzo y otros minerales en forma de capas arcillosas y como bancos arcillosos sedimentarios de origen lacustre.



**Localidades:** son depositados en valles asociados con lomeríos de laderas tendidas los mayores depósitos se localizan en la zona de Tlapiltepec (Figura 6), Tepelmeme Villa de Morelos, Villa Tamazulapan del Progreso, Tejuapan de la Unión, Villa Chilapa de Díaz, San Antonio las Mesas y Mariscala de Juárez (figura 5).

**Aplicaciones:** las arcillas es una de las sustancias naturales de mayor importancia industrial, con ella se fabrican muchos y variados artículos, como ladrillos, alfarería, tuberías, porcelana, es aplicado como material de carga en la industria de la goma y del papel, caucho y refractarios.

**Especies similares:** la dieckita, nacrita, anauxita, halloysita, pero son constituyentes menos importantes de los depósitos de arcillas.

**Potencial geológico en miles de toneladas estimadas en este trabajo:** Tlapiltepec 624, Tepelmeme Villa de Morelos 750, Villa Tamazulapan del Progreso 250, Tejuapan de la Unión 125, Villa Chilapa de Díaz 170, San Antonio las Mesas 80 y Mariscala de Juárez 100.

### 7.3. MONTMORILLONITA

**Clase:** Filosilicato. Composición Química:  $\text{Al}_2\text{Mg}(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_4$ ;  $\text{Al}_2\text{O} = 39.5\%$ ,  $\text{SiO}_2=46.5\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}=14\%$ .

**Propiedades Físicas:** dureza 2, densidad  $2.6\text{gr}/\text{cm}^3$ , jamás se presenta en cristales, en general aparece en forma de masas microcristalinas terrosas, pulverulentas y escamosas, color blanco o gris; blandísima, muy ligera, fácilmente disgregable y untuosa al tacto, opaca a causa del pequeño tamaño de las partículas. Como propiedades características de las demás arcillas son el aumento de volumen por absorción de agua o de otros líquidos y la posibilidad de intercambio iónico.

**Ambiente de Formación:** se forma en ambiente sedimentario de clima tropical, por alteración de los feldespatos en rocas pobres en sílice, en ambiente hidrotermal a costa de vidrios volcánicos y tobas. En el área de interés, los depósitos están semicompactos y pseudoestratificado.

**Localidades:** observados en lomeríos suaves asociados con valles que se encuentra en forma de grandes masas en áreas ejidales del municipio San Mateo Tlapiltepec, distrito



Coixtlahuaca; en áreas ejidales El Frayle municipio Mariscala de Juárez; en el ejido de Guadalupe de Nogales municipio San Francisco Tlapancingo, distrito Silacayoapan; áreas ejidales del municipio Villa de Chilapa de Díaz y en áreas ejidales del municipio de Villa de Tamazulapan del Progreso, distrito Teposcolula, San Pedro Yodoyuxi (Figura 7), municipio Huajuapán de León.

**Aplicaciones:** fundamentalmente encuentra utilidad en la industria de la porcelana y como material de carga en la industria de la goma y del papel, caucho, absorbente, para purificar y decolorar líquidos, como base para cosméticos, medicina y en perforaciones de pozos petrolíferos. La montmorillonita es el mineral de la arcilla dominante en la bentonita que es una ceniza volcánica alterada que tiene la propiedad poco común de aumentar de volumen varias veces cuando es sumergida en agua.

**Potencial geológico en miles de toneladas estimadas en este trabajo:** San Mateo Tlapiltepec 60, Mariscala de Juárez 135, Guadalupe de Nogales 4, Villa de Chilapa de Díaz 8 Villa de Tamazulapan del Progreso 15, San Psdro Yoduyuxi 130

## 7.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ARCILLAS.

Son producto de alteración química y física que consisten de mezclas de partículas de diferentes propiedades tanto físicas como químicas y mineralógicas.

Son materiales naturales, terrosos de grano fino compuestos por silicatos hidratados, sílice, alúmina y agua, conteniendo cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierras alcalinas. La disgregación o desintegración se facilita por la existencia de las diaclasas debido por enfriamiento de las rocas eruptivas. Las partículas son microscópicas.

Son las más abundantes en la superficie terrestre. Formando una capa que se distribuye a lo largo y ancho del planeta y sin ella no sería posible la vida en nuestro planeta.

Son designados sedimentarios cementadas y no cementadas porque han sido transportadas usualmente por el agua y depositadas en otro lugar, los yacimientos son de grandes extensiones y de considerables espesores, de composición uniforme y están muy difundidos en las formaciones paleozoicas y mesozoicas.

Los designados residuales se encuentran en el mismo lugar en que fueron formados originalmente por rocas cristalinas, silíceas ricas en feldespatos y pobres en minerales de hierro, éstos tienen una distribución restringida y son del pleistoceno.

La formación de las arcillas es el resultado de los procesos de meteorización; la vegetación proporciona el anhídrido carbónico necesario y los compuestos orgánicos sirven para



eliminar las materias colorantes y producir arcillas, éstas hacen pasar el hierro del estado férrico insoluble al estado ferroso soluble, permitiendo su eliminación en solución con lo cual se blanquea la arcilla.

La formación de arcilla a partir de minerales silicatados es esencialmente una descomposición de silicatos con formación de silicatos hidratados de aluminio y de la eliminación de la sílice soluble y de los álcalis en solución.

El ciclo de las arcillas, son transportadas en suspensión y la deposición de los mismos se efectúa por procesos mecánicos.

Por diversas razones, las arcillas funcionan de la misma manera. Difieren, como ya se ha indicado, en su mineralogía aunque, por supuesto, difieren en otras propiedades, tamaño de grano, capacidad de intercambio iónico, plasticidad, permeabilidad, compactibilidad, volúmenes en seco y en estado húmedo.

**Tamaño del grano.** La característica física más importante de las arcillas es la finura de su grano. Los dos tipos de rocas (harina de roca y arcillas de minerales arcillosos) son de grano extremadamente fino. El orden de tamaño de las partículas arcillosas varía desde 0.005 mm hasta dimensiones coloidales, teniendo muchas partículas arcillosas un diámetro inferior a 0.0002 mm. La determinación exacta del tamaño de grano en las arcillas, no es fácil debido a la tendencia de éstas a agruparse o flocular. El orden de colocación que generalmente decrece con el tamaño del grano, es: harina de roca > caolinita > illita > montmorillonita.

**Consolidación.** Debido a que las aperturas entre las partículas de arcilla y el contenido de agua, relativamente alto, están propensas a la compactación o consolidación al soportar cargas. La consolidación de los suelos involucra pérdidas de espacio poroso, con la correspondiente pérdida del gas o del agua contenidos en los poros. Hasta cierto punto, la consolidación incluye también un reacomodo de las partículas que componen el suelo. La arcilla puede contener de cinco a siete veces su peso en agua, con una relación de porosidad que llega hasta 14.0.

**Contracción.** La mayor parte de los suelos de arcilla natural tienden a encogerse cuando se secan, debido a la reducción de espacio poroso. La contracción puede originarse por pérdida de agua alrededor de los granos o por pérdida de agua de la estructura de los minerales arcillosos y es mayor en las arcillas que contienen montmorillonita que en los otros tipos de suelos arcillosos.

**Intumescencia.** Si los suelos arcillosos absorben agua, aumentan de volumen, fenómeno contrario al de contracción, independientemente de que la estructura del suelo es tan alterada por éste, que no alcanza a recuperar su volumen inicial. Algunas arcillas montmorilloníticas, como por ejemplo, la *bentonita*, que es una ceniza volcánica alterada, puede aumentar de volumen 1600% o más después de una prolongada empapada, en tanto que las arcillas caoliníticas aumentan cuando mucho un 10%.



**Plasticidad.** La plasticidad es la propiedad que tienen las arcillas de deformarse sin elasticidad, sin cambio de volumen y sin ruptura visible. En las arcillas la plasticidad está condicionada hasta cierto punto a su contenido de agua, el modo por el cual el agua es detenida y la forma y tamaño de las partículas.

**Permeabilidad.** Las arcillas tienen baja permeabilidad. Las aperturas intergranulares son demasiado pequeñas para permitir una circulación rápida. Posiblemente la mayor cantidad de agua que penetra en la masa arcillosa llegue a través de grietas de contracción y desecación.

**Sensibilidad.** Las partículas arcillosas poseen cargas eléctricas parecidas, por lo que originan mutua repulsión, siendo arrastradas a lo largo de las corrientes o dispersadas en un cuerpo de agua.

## 7.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS ALTERACIONES

**Caolinización.** La caolinización es un proceso que se produce por alteración de los silicatos de aluminio, particularmente de los feldspatos, debido a la acción de soluciones ascendentes a través de zonas de debilidad (fallas y fracturas), interconectadas con la cámara magmática. Esta alteración se observa en rocas de composición ácida, principalmente tobas y brechas volcánicas. Dicha caolinización se observó en una superficie de más 15 km<sup>2</sup> en la porción oriente de la región.

**Silificación.** La silificación es la segunda guía importante de la mineralización; esta alteración se debe a los procesos hidrotermales que dieron origen a la mineralización de la zona. Las rocas que manifiestan esta alteración están confinadas en zonas de intenso fracturamiento; los minerales esenciales de esta alteración son el cuarzo y los feldspatos potásicos.

**Argilización.** La argilización con frecuencia se encuentra superpuesta a la silificación; estas alteraciones se forman por la acción de soluciones ascendentes y presentan un color pardo claro. Consiste básicamente en la alteración de los feldspatos por soluciones hipogénicas.

**Oxidación.** Esta alteración es el resultado de la acción de aguas meteóricas que actúan sobre productos de argilización y silificación principalmente, la oxidación presenta un color que va de café oscuro a rojizo, siendo las impurezas que se encuentran en las arcillas.

## 7.6. ORIGEN DE LOS SILICATOS.

Aun con las técnicas modernas disponibles hoy en día, el conocimiento que tenemos de la corteza terrestre es muy limitado, ya que sólo se ha explorado una pequeñísima porción del casquete superficial, es decir aproximadamente los primeros cuatro kilómetros a partir de la superficie, o sea el 0.062% del diámetro terrestre (12 740 km). Sin embargo, mediante métodos indirectos, como los sismológicos, se ha logrado poner en evidencia que la



estructura interna de la Tierra, a semejanza de una cebolla, está formada por capas que tienen una composición más o menos definida: así, hacia el interior de la superficie encontramos la capa llamada SIAL, situada entre los 40 y 100 km de profundidad, que es rica en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. Más hacia el interior hallaremos la capa denominada SIMA, rica en hierro y magnesio pero con algunas porciones de sílice, aluminio y otros elementos, de carácter básico, más caliente y fluida que la capa SIAL. La capa SIMA es considerada la madre directa de todas las formaciones minerales que afloraron a la superficie. Es decir, que es muy probable que las primeras rocas superficiales se hayan formado por el enfriamiento y cristalización posterior de las corrientes de magma provenientes de la capa SIMA, acarreadas por las erupciones volcánicas y enfriadas en la superficie, dando origen a las rocas básicas como los basaltos. En cambio, la afloración del material fundido proveniente de la capa SIAL, a través de las hendiduras y fallas, originó la formación de las rocas ígneas de carácter ácido: los granitos. Las segregaciones del magma caliente, su migración y su compactación posteriores, dieron origen a diversos minerales, como las cromitas, magnetitas, corindón, sienitas, mármoles y cuarcitas, entre otros. Unos más resultaron de la presión de los suelos al replegarse, como ocurrió con el grafito.

La acción de los vapores y de los gases calientes sobre las primeras rocas condujo a su alteración y a la consecuente formación de mezclas finas de minerales. Estas últimas permanecieron en forma de residuos o bien fueron transportadas y depositadas en los lechos de los ríos y en los fondos marinos. El arrastre y depósito de esas mezclas finas pudo efectuarse por vía fluvial, es decir, por acción de los ríos o bien por medio de los glaciares y los vientos. El resultado fue su depósito en los lechos lacustres y marinos, lo cual produjo los yacimientos más importantes.

Por lo anterior, es fácil aceptar que el 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos. La corteza tiene una densidad media de 2.7, mientras que la densidad media de la Tierra es de 5.5, o sea que en el interior se concentran los elementos más pesados, hierro, níquel, etcétera. Los silicatos forman el árbol genealógico de las arcillas.

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo y, como veremos, su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra, es decir, que dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición. Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neoformación y 3) por transformación. El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares.

Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes o bien a partir de la arcilla original, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidrotérmicas. Curiosamente, estos mecanismos están relacionados con la latitud en el planeta, de modo que encontramos que el primer mecanismo fue más común en las regiones árticas, mientras que la neoformación y la transformación resultaron dominantes en los trópicos húmedos. A las arcillas que se



presentan en la naturaleza como una pasta suave se les llama "lodos", mientras que aquellas que tienen la apariencia de un sólido blancuzco se les denomina piedra lodosa o bien roca laminada (en inglés: *shale*). Es importante que a los depósitos de arcilla se les nombre arcillosos, a fin de distinguirlos de los depósitos arenosos y además plásticos, a fin de diferenciarlos de las rocas ígneas.

## 7.7. GÉNESIS DE LAS ARCILLAS.

Las arcillas se forman por intemperismo o alteración hidrotermal de los silicatos o vidrios ricos en aluminio.

Los minerales más comúnmente alterados a arcillas son feldespatos (plagioclasas, ortosa, microclina, etc.) y vidrios volcánicos ricos en aluminio. Después de la alteración, las arcillas pueden quedarse en el lugar de su formación o llevadas y depositadas en otro sitio por el agua u otros medios de transporte. En el primer caso hablamos de arcillas residuales.

Las arcillas residuales forman una capa más o menos irregular por encima de las rocas alteradas y cuando el proceso es más avanzado, pueden heredar la textura de las rocas descompuestas, como, por ejemplo, de los piroclásticos.

Para que las arcillas sean limpias, las impurezas tienen que ser removidas. Esto puede producirse durante el transporte, siempre y cuando éste no sea turbulento; y especialmente durante la depositación en aguas tranquilas.

Las arcillas transportadas y depositadas forman estratos tabulares o lentes. Los depósitos hidrotermales de arcillas pueden ser también tabulares a lo largo de las fracturas por las cuales circulaban las aguas residuales magmáticas. La mineralogía y pureza de las arcillas depende de su génesis.

## 7.8. LA NOBLEZA DE LAS ARCILLAS.

Las arcillas o lodos heredados de los continentes y depositados, neoformados o transformados, en los lechos marinos, lacustres, fluviales o estuarinos, han provocado cambios espectaculares en el planeta Tierra. Que digan si no es así la formación del petróleo, la de las moléculas orgánicas prebióticas que dieron origen a la vida y la de los suelos agrícolas, sin mencionar el surgimiento de las civilizaciones que hicieron uso del barro cocido en la manufactura de su cerámica.

En efecto, la mayor parte de las cimas de los yacimientos de petróleo de las costas del Golfo de México (EUA-México) ocurren a la profundidad en la que usualmente se produce la transformación de las arcillas tipo esmectita (E) en las denominadas illitas (I). Ambas tienen la misma estructura laminar, excepto que las segundas no son expandibles debido a las fuertes cargas electrostáticas que mantienen a las hojas ligadas. Así, la transformación de la esmectita en illita pudo haber desempeñado papel importante en la génesis del petróleo: al ser contenidas las moléculas orgánicas en el interior del espacio interlaminar de



la esmectita, aquellas estaban "protegidas" de la oxidación y sujetas a un proceso de tipo catalítico que pudo haberlas convertido en petróleo, tal y como ahora lo conocemos. Pero es un hecho experimental que la sustitución del silicio (Si) por aluminio en las hojas que componen el acordeón químico de la esmectita, origina un exceso de carga electrostática negativa en las hojas, de tal magnitud a escala molecular que provoca la deshidratación del potasio (K), el cual se encuentra comúnmente en el espacio interlaminar de las arcillas. Luego, el agua así expulsada pudo haber acarreado en su paso a los hidrocarburos formados en el interior de las arcillas, mientras que la contracción subsecuente de las hojuelas de arcilla deshidratada podría haber provocado un colapso en el material, dejando hendiduras y poros por los que pudo migrar el fluido hacia los recipientes rocosos.

Por otro lado, la estructura laminar de las arcillas permite el almacenamiento de agua en el espacio interlaminar, formando así agregados lodosos difíciles de romper. La combinación de la arcilla con la materia orgánica del suelo y algunos óxidos minerales contribuye a la estabilidad estructural necesaria para resistir los efectos mecánicos destructivos. La porosidad interna de las hojuelas de arcilla y su carga electrostática asociada son adecuadas para la absorción de especies tales como los cationes de potasio ( $K^+$ ), magnesio ( $Mg^{++}$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ), los cuales son liberados bajo condiciones ácidas apropiadas, pudiendo ser absorbidos por las raíces de las plantas.

La acidez es provocada por una acumulación de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) provenientes de compuestos químicos disueltos en el agua y acarreados por las lluvias; en ellos la concentración ácida llega a ser tal que algunos de los otros cationes atrapados por las arcillas, como los iones  $Al^{3+}$  se disuelven rápidamente en las soluciones, pasando a las raíces vegetales y provocando efectos tóxicos en las plantas. Es por ello que un suelo fértil debe estar balanceado en lo que a la acidez se refiere y el tratamiento en este caso consiste en la neutralización de la acidez mediante la agregación de compuestos alcalinos, como el carbonato de calcio. Luego tenemos que la combinación de acidez e intercambio iónico en las arcillas del terreno es importante en el desarrollo de los suelos agrícolas.

Éstos, en la actualidad, se encuentran expuestos a las contaminaciones por lluvia ácida proveniente de las zonas industriales y por los abonos químicos y plaguicidas, los cuales son absorbidos por las arcillas minerales provocando los efectos combinados de acidez e intercambio mencionados. En cualquier caso, las arcillas son las protagonistas en la formación de los suelos agrícolas y sus propiedades son determinantes para el crecimiento de los vegetales. Por otra parte, la mineralogía del suelo es resultado de diversos factores, el clima y el intemperismo, así tenemos que en las regiones tropicales predominan los caolines mezclados con óxidos minerales (oxisoles) y los suelos negros formados por esmectitas expandibles (vertisoles) combinadas. Si la acidez es baja ( $pH > 6$ ) el suelo arcilloso tiende a ser rico en calcio, en cambio si la acidez es alta ( $pH < 6$ ) el aluminio tiende a ser más abundante, lo que trae efectos tóxicos para la vegetación. Otros cationes, como el amonio, los nitratos y los fosfatos, también son retenidos por las arcillas del suelo e intercambiados bajo condiciones de humedad y acidez adecuadas, siendo realmente accesibles a las plantas y representando una fuente importante de nutrientes. La composición óptima del suelo debe incluir una fracción de arcilla compuesta de partículas menores a 2 micras, y una proporción mayor de sedimentos con tamaños de partícula entre 2 y 60 micras. Esta combinación parece incluir las mejores características para el cultivo y



crecimiento de las raíces vegetales. Es claro, pues, que las arcillas son los componentes del suelo que provocan la mayor influencia en su productividad.

No menos importante ha sido la interacción de las arcillas con las moléculas orgánicas. Su afinidad por las bases orgánicas nucleicas, como la guanina, la citosina, ha provocado interés creciente entre la comunidad científica que trata de atribuir un papel preponderante a los compuestos minerales de tipo laminar en la formación de las moléculas prebióticas, con las arcillas y su posible relación con el origen de la vida en el planeta.

## 7.9. TIPOS DE ARCILLAS.

Los usos de las arcillas son numerosos siendo también numerosos sus análisis. Los análisis más importantes son el difractométrico, granulométrico y térmico-diferencial. Los minerales de arcillas se determinan por difracción de rayos X o por análisis térmico diferencial. La difracción estudia la estructura de los minerales y permite determinar cuales están presentes.

Las arcillas rojas: esta clase la integra generalmente un depósito de tipo marino formado por los restos de materiales calcáreos y ferrígenos, polvo volcánico, restos de esponjas silíceas, dientes de tiburón, etc. El color rojizo proviene por lo común de sus componentes férricos. Se ha encontrado que estos depósitos son muy extensos.

Arcilla ferruginosa: contiene en su composición diferentes cantidades y tipos de óxido de hierro y puede ser de color amarillo, ocre e inclusive negra (tierras de Siena) debido al óxido de hierro hidratado, mientras que las arcillas rojas contienen, por lo general, un óxido conocido como hematita. Esta particularidad de las arcillas explica por qué en algunas regiones el barro es negro o rojizo, lo cual incide en los colores de la cerámica que se fabrica a partir de estos materiales. Recordemos en este punto al barro negro de Oaxaca, tan distinto de la cerámica ocre o rojiza de la zona central del valle de México.

Arcilla magra y arcilla grasa: estos materiales contienen cierto grado de impurezas, lo que afecta sus propiedades plásticas, es decir, que a mayor contenido de impurezas se obtiene una pasta menos plástica (arcilla magra) al amasarla con agua.

Arcilla de batán: llamadas también tierra de batán, debido al uso que tuvieron en el "batanado" de las telas y de las fibras vegetales como el algodón. Este proceso consistía en limpiar las fibras formadas en la máquina (batán) eliminando la materia grasa mediante la adición de arcilla, por lo general del tipo esmectita, cuyo nombre proviene del griego smektikós: "que limpia."

Arcilla marga: es un material impermeable y frágil, con un contenido de caliza de entre 20 y 60%, aproximadamente.

Arcillas de esquisto o pizarra: las constituyen formaciones antiguas que se presentan en forma de estratos o de plaquetas paralelas que se han dividido por la presión del suelo.



Arcilla atapulgita: también conocida como *tierra de Florida* o *floridrín*, aunque algunas veces se la llamó *tierra de Fuller*. El último apelativo se empleó también para denominar a las sepiolitas. Actualmente la atapulgita es llamada paligorskita

Arcilla bentonita: nombre comercial de las arcillas tipo montmorillonita, las que, tratadas con compuestos químicos aminados (p. ej. dodecilamonio) se vuelven repelentes al agua — hidrofóbicas—, aunque mantienen gran afinidad por las especies orgánicas, en particular los aceites, las grasas y los colorantes o pigmentos naturales. El nombre bentonita proviene de Fort Benton, Wyoming, EUA donde W. C. Knight descubrió un enorme yacimiento de este tipo de arcilla en 1896.

GRUPO DE LA CAOLINITA.. La caolinita está muy extendida, es el principal constituyente del caolín o de la arcilla; siempre un mineral de origen supergénico, que se produce por la alteración de los silicatos de aluminio particularmente feldespatos; Se halla mezclado con los feldespatos en rocas meteorizadas, en algunos lugares forman depósitos grandes donde la meteorización ha sido completa; como uno de los productos comunes de la descomposición de las rocas, se halla en suelos y al ser transportados por las aguas se deposita mezclado con cuarzo y otros minerales en forma de capas de arcilla, es abundante en las pizarras; Este mineral tiene pequeña absorción de iones y de agua y un grado de compactación bajo.

GRUPO DE LA MONTMORILLONITA. Es el mineral de la arcilla dominante en la bentonita, que es una ceniza volcánica alterada y que tiene la propiedad poco común de aumentar de volumen varias veces cuando se sumerge en agua. Se presenta en hojuelas menores de 0.2 micrones de diámetro; tiene gran capacidad de absorción de iones y de agua, baja permeabilidad y gran plasticidad.

GRUPO DE LA MICA HIDRATADA. Es un termino general aplicado a los minerales micaceos de la arcilla; las cuales se diferencian por tener menos silicio sustituido por aluminio y contener más agua y tener parte del potasio sustituido por calcio y magnesio; es el principal constituyente de las pizarras arcillosas, se encuentra en hojuelas de hasta 0.1 micrones de diámetro, tiene un valor intermedio de capacidad de absorción de iones, de agua, permeabilidad y plasticidad.

GRUPO VARIOS (CLORITAS). Este grupo de minerales puede considerarse como derivados ricos en magnesio del grupo de la montmorillonita (Keller, 1955); Han sido recocidos como un elemento constitutivo importante en los sedimentos recientes y antiguos. Esta ocurre en hojuelas que pueden ser de dimensiones menores de 0.1 de micrones de diámetro.

## 7.10. APLICACIONES DE ARCILLAS

La época moderna ha incorporado a las arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de las nuevas tecnologías de modo que, aunque no lo percibamos, las arcillas forman parte importante de nuestras vidas. Un ejemplo son los nuevos materiales poliméricos que



incluyen en su composición las arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves al tacto y propiedades mecánicas mejoradas, como en los juguetes, en las partes del automóvil y en otros componentes que son, además, resistentes a la flama y al desgaste. Algunos productos de alta tecnología incorporan a las arcillas en alta proporción, como los convertidores catalíticos que se utilizan en el control de emisiones contaminantes de los vehículos de motor o bien en el papel incombustible con que se provee a los astronautas desde el accidente del *Challenger* o en las revistas de alta calidad.

Para la industria interesa principalmente la bentonita compuesta principalmente por esmectitas y el caolín constituido por caolinitas predominantes. Las arcillas restantes o comunes están compuestas por ilitas mezcladas con otros minerales, predominantemente arcillosos. Existen todas las variedades mencionadas de arcillas. Como faltan generalmente los análisis de laboratorio se les clasifica empíricamente de acuerdo con sus propiedades o más frecuentemente por sus características externas, lo que conduce a numerosos errores, dificulta su beneficio y control de calidad. Por esto, las arcillas de la región Mixteca pueden competir con las importadas a pesar de que éstas tienen a veces precios mayores. Esta situación ofrece muchas oportunidades de negocios ya que las arcillas en parte tienen propiedades de gran interés para la industria e inclusive son exportadas.

Es decir que si desde el punto de vista geológico las arcillas son minerales naturales que se formaron hace varios millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra, para el artista constituyen los materiales plásticos o los pigmentos que le permiten expresar, mediante formas y composiciones de color, un estado de alma o de conciencia que puede ser bello.

Desde un punto de vista utilitario las arcillas han sido los materiales preferidos por el hombre para la manufactura de utensilios que sirven en la cocción y el consumo de sus alimentos, de vasijas de barro para almacenar y añejar el vino, de piezas finas de porcelana, así como pisos de mosaico y embaldosados.

Existen otras aplicaciones masivas de las arcillas minerales: los lodos de perforación de los pozos petroleros, los moldes de fundición y los catalizadores empleados en la refinación del petróleo.

No faltan las aplicaciones en el campo farmacéutico y en los productos de belleza, ya que las arcillas forman parte importante de los talcos desodorantes, jabones y cremas, pastas de dientes.

En términos generales tienen aplicación en artículos domésticos e industriales, tales como: cerámica, porcelana, utensilios de cocina, jarros ornamentales, estufas de porcelana, tejas, telas impermeables, linóleo, papel para decoración de paredes, jabones para limpieza, ladrillos de pulimentación, adulteración de alimentos, ladrillos de construcción, esmaltes, para conducción de agua, revestimiento de pozos, conductos de chimenea, albañilería, bloques de cimentación, en la industria eléctrica, cajas de enchufe, aisladores, ladrillos refractarios, equipo para fundición de vidrio y cristales, ruedas de esmeril crisoles de caucho, balastro de ferrocarril, cemento portland, filtros de aceite, fabricación de loza.



Los productos secundarios, tales como: micas, minerales de titanio y sílice, con posibilidades de ser recuperados, han recibido poca atención por los productores de arcillas debido a problemas de mercado.

**ARCILLAS COMUNES.** El principal uso de estos materiales arcillosos se da en el campo de la cerámica de construcción (tejas, ladrillos, tubos, baldosas...), alfarería tradicional, lozas, azulejos y gres. Uso al que se destinan desde los comienzos de la humanidad.

**CAOLIN.** Se trata de un mineral muy importante desde el punto de vista industrial. Ha sido utilizando desde antiguo para numerosos usos. En el siglo XVI adquirió gran fama entre la nobleza la porcelana fabricada a base de pastas cerámicas ricas en caolín. Los principales usos a los que se destina en la actualidad son:

**Fabricación de papel.** El principal consumidor de caolín es la industria papelera, utilizando más del 50 % de la producción. En esta industria se usa tanto como carga, como para proporcionarle al papel el acabado superficial o estucado. Para que pueda ser destinado a este uso las especificaciones de calidad requeridas son muy estrictas, tanto en pureza como en color o tamaño de grano.

**Cerámica y refractarios.** También es importante el uso del caolín en la fabricación de materiales cerámicos (porcelana, gres, loza sanitaria o de mesa, electrocerámica) y de refractarios (aislantes térmicos y cementos). Al igual que en el caso del papel las especificaciones requeridas para el uso de caolines en cerámica y refractarios son estrictas en cuanto a pureza y tamaño de grano.

#### Otros usos

Además se utilizan caolines, en menores proporciones en otras industrias: como carga más económica sustituyendo a las resinas en pinturas, aislantes, caucho. También como carga de abonos, pesticidas y alimentos de animales.

La industria química consume cantidades importantes de caolín en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de Al, así como para la fabricación de ceolitas sintéticas.

A partir del caolín calcinado se obtienen catalizadores y fibras de vidrio. La industria farmacéutica utiliza caolín como elemento inerte en cosméticos y como elemento activo en absorbentes estomacales.

A pesar de que la industria ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas y ha ido sustituyendo a las bentonitas por otros productos en la fabricación de moldes para fundición, éste sigue siendo su uso principal.

La proporción de las bentonitas en la mezcla varía entre el 5 y el 10 %, pudiendo ser ésta tanto sódica como cálcica, según el uso a que se destine el molde. La bentonita sódica se usa en fundiciones de mayor temperatura que la cálcica por ser más estable a altas temperaturas, suelen utilizarse en fundición de acero, hierro dúctil y maleable y en menor medida en la gama de los metales no féreos. Por otro lado la bentonita cálcica facilita la



producción de moldes con más complicados detalles y se utiliza, principalmente, en fundición de metales no férreos.

**Peletización.** La bentonita se ha venido usando desde los años 50 como agente aglutinante en la producción de pelets del material previamente pulverizado durante las tareas de separación y concentración. La proporción de bentonita añadida es del 0,5%, en la mayor parte de los casos. Aunque no existen especificaciones estandarizadas para este uso, se emplean bentonitas sódicas, naturales o activadas, puesto que son las únicas que forman buenos pelets con las resistencias en verde y en seco requeridas, así como una resistencia mecánica elevada tras la calcinación.

**Absorbentes.** La elevada superficie específica de la bentonita, le confiere una gran capacidad de absorción, debido a esto se emplea en decoloración y clarificación de aceites, vinos, sidras, cervezas. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y contaminantes orgánicos.

Se utiliza además como soporte de productos químicos, como por ejemplo herbicidas, pesticidas e insecticidas, posibilitando una distribución homogénea del producto tóxico. En los últimos años, además, están compitiendo con otras arcillas absorbentes (sepiolita y paligorskita) como materia prima para la fabricación de lechos de animales. La demanda de bentonitas para este uso varía sustancialmente de unos países a otros, así en Estados Unidos comenzaron a utilizarse a finales de los años 80, sin embargo en Europa el mercado es más complejo y su demanda mucho menor.

**Material de Sellado.** La creciente importancia que está tomado en los últimos años, por parte de los gobiernos de toda Europa, la legislación en lo referente a medio ambiente, ha favorecido la apertura y desarrollo de todo un mercado orientado hacia el uso de bentonitas como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radiactivos de baja y media actividad.

Durante muchos años las bentonitas se han venido utilizando en mezclas de suelos en torno a los vertederos, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito. Esta mezcla se podía realizar in situ o sacando el suelo de su emplazamiento, mezclándolo con la bentonita y volviéndolo a colocar en su sitio, la ventaja de la primera alternativa es que supone un gasto menor pero, sin embargo, implica una mezcla menos homogénea. La segunda alternativa, sin embargo, es más cara pero asegura una mejor homogeneización de la mezcla bentonita-suelo. Por otro lado, esto disminuye la cantidad de bentonita necesaria (5-6 %), frente a 7-8 % para la utilizada en mezclas in situ

Más recientemente ha surgido una nueva tendencia en el diseño de barreras de impermeabilización que se basa en la fabricación de complejos bentonitas-geosintéticos (geomembranas y geotextiles). Consiste en la colocación de una barrera de arcilla compactada ente dos capas, una de geotextil y otra de geomembrana (plásticos manufacturados, como polietileno de alta densidad o polipropileno, entre otros).



La geomembrana es impermeable, mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la bentonita hinchar, produciendo la barrera de sellado compactada. La normativa varía de un país a otro en cuanto a los valores que tienen que cumplir las arcillas compactadas para dicho fin.

Esta utilidad de las bentonitas como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. Las bentonitas más utilizadas para este fin son las sódicas, por tener mayor capacidad de hinchamiento.

Ingeniería Civil. Las bentonitas se empezaron a utilizar para este fin en Europa en los años 50, y se desarrolló más tarde en Estados Unidos. Se utiliza para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas. Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad. Las bentonitas sódicas o cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso. Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones. Prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de bentonita.

Protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas.

En cementos: aumenta su capacidad de ser trabajado y su plasticidad.

En túneles: Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3-5 % de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel). También es posible el transporte de los materiales excavados en el seno de fluidos benoníticos por arrastre.

Alimentación animal. Una aplicación de las bentonitas que está cobrando importancia en los últimos tiempos es su utilización como ligante en la fabricación de alimentos pelletizados para animales. Se emplea en la alimentación de pollos, cerdos, pavos, cabras, corderos, y ganado vacuno, fundamentalmente. Actúa como ligante y sirve de soporte de vitaminas, sales minerales, antibióticos y de otros aditivos.

En 1992 se empezó a fabricar con bentonitas un innovador producto comestible denominado "Repotentiated Bentonite (RB)". Según estudios del "Poultry Research Institute" el aporte de pequeñas cantidades de bentonitas (1 %) a la alimentación de aves de corral reporta importantes beneficios: se incrementa la producción de huevos en un 15 %, su tamaño en un 10 % y la cáscara se hace más dura.

La bentonita tiene una doble misión: actúa como promotor del crecimiento y como atrapador de toxinas. Esto se debe a que el alimento mezclado con bentonita, debido a su gran capacidad de adsorción, permanece más tiempo en la zona intestinal, la arcilla adsorbe el exceso de agua, y hace que los nutrientes permanezcan más tiempo en el estómago, siendo mayor su rendimiento (mayor producción). Por otro lado adsorben toxinas, no pudiendo éstas, por tanto, atravesar las paredes intestinales. La mayor adsorción de agua de



los nutrientes, además, hace que los excrementos sean menos húmedos, así los lechos permanecen más tiempo limpios y se reduce la probabilidad de epidemias y la proliferación de moscas y parásitos. Las aves que comen este tipo de alimentos excretan un 26 % más de toxinas y adsorben un 42 % más de proteínas.

**Catálisis.** El uso de aluminosilicatos en diferentes campos de la catálisis es tan antiguo como el propio concepto de catálisis. Son muchas las aplicaciones de las arcillas como catalizadores o soporte de catalizadores en diferentes procesos químicos. Así, son utilizadas en reacciones de desulfuración de gasolina, isomerización de terpenos, polimerización de olefinas, cracking de petróleo. Las propiedades catalíticas de las bentonitas son resultado directo de su elevada superficie específica y tipo de centros activos

La pilarización consiste en introducir, en el espacio interlamilar de una esmectita, un polímero muy voluminoso que, tras calcinación, da lugar a un óxido estable que determina una porosidad fija y permanente de tamaño controlado (tamices moleculares).

**Industria farmacéutica.** Desde hace tiempo las arcillas se vienen usando como excipiente por la industria farmacéutica. Debido a que no son tóxicas, ni irritantes y a que no pueden ser absorbidas por el cuerpo humano se utilizan para la elaboración de preparaciones tanto de uso tópico como oral. Se utiliza como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y como modificador de la viscosidad. Su principal uso es la preparación de suspensiones tópicas, geles y soluciones. Cuando se usa como parte de una preparación oral, su naturaleza adsorbente puede enmascarar el sabor de otros ingredientes o puede retardar la liberación de ciertos fármacos catiónicos (la hectorita y la saponita se utilizan como fármacos o drogas retardantes). Como en el resto de los excipientes, las cantidades que se requieren son pequeñas. Generalmente las concentraciones de bentonita como agente de soporte es del 0,5-5 % y del 1-2 % cuando se usa como adsorbente.

Las posibles aplicaciones de las bentonitas son tan numerosas que es casi imposible citarlas todas. Además de los campos de aplicación industrial indicados anteriormente, las bentonitas se utilizan:

En la industria de detergentes, como emulsionante y por su poder ablandador del agua, debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico

Par la fabricación de pinturas, grasas, lubricantes, plásticos, cosméticos, se utilizan arcillas organofílicas, capaces de hinchar y dispersarse en disolventes orgánicos, y utilizarse, por lo tanto, como agentes gelificantes, tixotrópicos o emulsionantes.

Para desarrollar el color en leucocolorantes, en papeles autocopiativos, se utilizan bentonitas activadas con ácido.

En agricultura, para mejorar las propiedades de suelos arenosos o ácidos. Así mismo se utilizan esmectitas sódicas para recubrir ciertos tipos de semillas, de forma que su tamaño aumente, y resulte más fácil su distribución mecánica, a la vez que se mejora la germinación.



Otros usos de la interacción del barro (arcilla) con las moléculas orgánicas lo encontramos en la manufactura de la cerámica en la antigüedad. Baste mencionar el uso que los griegos daban a los pigmentos vegetales para la obtención de la cerámica negra y roja, típica del arte de Micenas. Otros ejemplos más sorprendentes los encontraremos en el curso de esta obra en la que estudiaremos la porcelana china del periodo Sung (969-1279 d.c.), la llamada porcelana de "cáscara de huevo" que, debido a su fineza y alta resistencia sorprendió al mundo occidental. Su delicadeza era tal que ya en el siglo IX se hablaba de los vasos de porcelana china translúcida, que dejaban ver los líquidos contenidos en su interior. Se decía que las piezas de porcelana de esta clase trascendían a la naturaleza humana. En cualquiera de los casos precedentes, la arcilla mineral ha sido la protagonista y, gracias a su abundancia natural y accesibilidad, el barro tradicional ha tenido un papel importante en el desarrollo de las primeras civilizaciones. Desde muy temprano, el hombre observó que los objetos de barro húmedo se contraen y endurecen al secarse por la acción del calor y que su resistencia mecánica en esas condiciones es suficiente. Aunque estas propiedades son tan familiares que hacen pensar en una serie de características simples, ha tomado muchos años desentrañar los secretos que dieron origen a las propiedades mencionadas. Ahora que se cuenta con instrumentos analíticos poderosos y con métodos de cálculo avanzados, la sorpresa ha sido mayúscula al comprobarse que donde se esperaba encontrar una estructura simple y rígida, se tiene un arreglo complejo y flexible. Se ha venido encontrando que el horizonte llano presenta en realidad profundos abismos y montañas en lo que se refiere a la física y la química de las arcillas minerales. Un tema de investigación que parecía pertenecer al pasado se descubre ahora como fuente inagotable de nuevos conocimientos y nuevas aplicaciones. Todas estas características sólo hablan de la nobleza de un material y nos dan la esperanza de que con el polvo se han de construir y transformar grandes cosas para beneficio del hombre.



Ejemplos de productos terminados con arcillas.



2



3



## 8. CONCLUSIONES

Con este trabajo de investigación del proyecto geológico localización y estudio de yacimientos de arcillas en la Mixteca Oaxaqueña, se obtuvo abundantes zonas potenciales con características que indican la existencia de yacimientos minerales arcillosos susceptibles de ser explotados económicamente.

Con la ubicación de los yacimientos arcillosos en la región Mixteca Oaxaqueña, se espera incrementar el interés por invertir en estudios cualitativos y cuantitativos de dichos yacimientos y con ello fortalecer los esfuerzos por mejorar el nivel de vida de la población que habita estos lugares.

La exploración de las arcillas es producida en tajo abierto por lo que los costos son reducidos en comparación con las explotaciones subterráneas.

Las perspectivas que presentan los yacimientos arcillosos en cuanto al potencial es prometedora, ya que se pueden explotar grandes volúmenes con diferente porcentaje de minerales caolinífero, bentoníticos y montmorilloníticos de acuerdo con las nuevas tecnologías, estos materiales pueden ser usados en diferentes campos de la industria.

## 9. RECOMENDACIONES

Surge un conjunto de necesidades y posibilidades sobre los yacimientos arcillosos en cuanto a investigar, restaurar, cuantificar, optimizar, proteger, difundir y promover la producción, la aplicación de los materiales, la diversificación de las líneas del producto, la implementación de calidad, las formas de presentación, cómo mejorar los horizontes de comercialización del trabajo y del empleo, así como la calidad de vida y la sustentabilidad ambiental y ecología.

Con los avances parciales de este trabajo de investigación del proyecto geológico localización y estudio de yacimientos de arcillas en la Mixteca Oaxaqueña, se realizarán acercamientos con las empresas públicas y privadas que realizan exploraciones y explotaciones, con la finalidad de inducir interés hacia estudios más detallados en las zonas donde afloran caolines, bentonitas y montmorillonitas, así como la posibilidad de iniciar operaciones en yacimientos arcillosos que en algún tiempo fueron explotadas.

Existe un amplio campo de investigación de las arcillas, principalmente sobre las propiedades nutricionales.



## 10. BIBLIOGRAFÍA.

- A. Betejtin. 1970. Curso de Mineralogía. Editorial Mir, segunda edición. 735p.
- Alan M Bateman. 1982. Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico, Editorial Omega. 975p.
- Alencáster, Gloria, 1963. Pelecípodos del Jurásico Medio del noroeste de Oaxaca y noreste de Guerrero: UNAM. México, Paleontología Mexicana n15. p.52.
- Alencáster, Gloria y Buitrón, B. E. 1965. Fauna del Jurásico Superior de la región de Petlalcingo, Estado de Puebla: UNAM. México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana n21 p53.
- Consejo de Recursos Minerales 1996. Monografía Geológica-Minera del Estado de Oaxaca. 279p.
- Cormnelius S. Hurlbut, Jr. 1980. Manual de Mineralogía de Dana. Editorial reverté, segunda edición. 653p.
- Carrasco, Ramírez, R. 1981. Geología Jurásica del área de Tlaxiaco Mixteca Oaxaqueña. UNAM. Facultad de ciencias. Tesis Maestría.
- E. W. M. Herinrich. 1980. Petrografía Microscópica. Editorial Omega. Segunda Edición. 320p.
- Erben, H. K. 1965. Estratigrafía y paleontología del mesozoico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca y Guerrero especialmente del jurásico inferior y medio Libreta Guía. p77.
- Centeno-García, Elena, Ortega-Gutierrez, Fernando y Corona Esquivel, R. J. 1990, Oaxaca fauna del .Cenozoico(resumen) vol. 22 p.13.
- Ferrusquia-Villafranca, I. 1970. Geología del área de Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca. Soc. Geol. Méx. P97-119.
- Ferrusquia-Villafranca, I. 1976. Estudio Geológico-Paleontológico en la región Mixteca partel.
- González, Torres, Enrique. 1987. Geología y paleontología del área de Tezoatlán, Oaxaca: UNAM. Tesis prof.
- Guerrero H. C. J., 1996 Asesoría geológica-minera al lote minero de yeso "El Mezquite" en el municipio Santo Domingo Tonalá, Huajuapán, Oaxaca. 22p.
- Guerrero H. C. J., 1997 Asesoría geológica-minera al lote de tobas (canteras) en el municipio Asunción Cuyotepeji, Huajuapán, Oaxaca. 20p.
- Guerrero H. C. J., 1998 Asesoría geológica-minera al lote de tobas (canteras) en el municipio San Miguel Tulancingo, Coixtlahuaca, Oaxaca. 20p.
- Guerrero H. C. J., 1999 Asesoría geológica minera al yacimiento de mármol en el municipio de Tonameca, Pochutla, Oaxaca. 22p.
- Grajales-Nishimura, J.M. 1988. Geology, geochronology and tectonic implications of the Juchatengo green rock sequense, state of Oaxaca, Southern México. Tesis Maestría 145p.
- INEGI, 1998. Carta Topográfica escala 1:250000 Oaxaca, E14-9. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.



- INEGI, 1994. Carta Geológica escala 1:250000 Oaxaca, E14-9. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1984. Carta Geológica escala 1:250000 Orizaba, E14-6. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1989. Carta Topográfica escala 1:50000 Yolomecatl, E14-D35. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1996. Carta Topográfica escala 1:50000 Asunción Nochixtlán, E14-D36. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1989. Carta Topográfica escala 1:50000 Tepelmeme, E14-D15. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1984. Carta Topográfica escala 1:50000 Santa Cruz Tacache, E14-D13. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1983 Carta Topográfica escala 1:50000 Xochihuehuetlán, E14-D12. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1984. Carta Topográfica escala 1:50000 Santo Domingo, E14-D24. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1992. Carta Topográfica escala 1:50000 Huajuapán de León, E14-D14. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1995. Carta Topográfica escala 1:50000 Santiago Juxtlahuaca, E14-D33. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1992. Carta Topográfica escala 1:50000 Tlaxiaco, E14-D34. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1991. Carta Topográfica escala 1:50000 Tamazulapán, E14-D25. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1991. Carta Topográfica escala 1:50000 Tezoatlán de Segura y Luna, E14-D24. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- INEGI, 1993. Carta Topográfica escala 1:50000 Santiago Tamazola, E14-D23. Instituto Nacional de Estadística e Informática. México.
- López Ramos Ernesto. 1969 Rocas paleozoicas marinas de México. Bol. Soc. Geol. Méx. V32 p. 15-44.
- López Ramos E. 1983. geología de México. Tomo III Edición Escolar. México.
- López-Ticha, D. 1985-1989. Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la cuenca de Tlaxiaco; Asoc. Méx. Geol. Petrolero, Bol. 37 p.49-92.
- Luévano, Ortega, Alvaro, 1988. Mapa geológico del área Villa Silacayoapan, San Jorge Nuchita, Estado de Oaxaca: UNAM. Tesis prof.
- Malpica, Cruz, Rodolfo y de la Torre López, Guillermo. 1980 Integración estratigráfica del paleozoico de México: IMP. proyecto.
- Morán-Zenteno, D. J. 1987. Paleografía y paleomagnetismo precenozoico del terreno Mixteco: UNAM. Facultad de ciencias tesis maestría. 177p.



- Mottana Annibales, Crespi Rodolfo, Liborio Gluseppe., 1977. Guía de Minerales y Rocas. Editores Milán. Segunda Edición.
- Ortega, Guerrero, Beatriz, 1989. Paleontología y Geología de las unidades clásticas mesozoicas del área Totoltepec-Ixcaquixtla, Estados de Puebla y Oaxaca: UNAM. Tesis de maestría 155p.
- Ortega-Gutierrez, F. 1978<sup>a</sup>. Estratigrafía del complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estado de Puebla y Oaxaca. UNAM. Insti, Geol, Revista V2 p112-131.
- Ortega-Gutierrez, F. 1978b. Notas sobre la Geología del área entre Santa Cruz y Ayuquilla, Estados de Puebla y Oaxaca, UNAM. Inst. Geol. Paleont., Méx. 44 p17-26.
- Pantoja-Alor, Jerges, 1970. Rocas sedimentarias paleozoicas de la región centroseptentrional de Oaxaca. Libro Guía, p67-84.
- Pérez, Ibarguengoitia, J. M, Hokuto-Castillo, Alfonso y Cserna, Zoltan de, 1965. Reconocimiento geológico del área de petlalcingo-Santa Cruz, municipio de Acatlán, Estado de Puebla: UNAM. Inst. De Geol. Y Paleon. Mex. 53p.
- Rodriguez, Torres, Rafael, 1970. Geología metamórfica del área de Acatlán, Estado de Puebla, Méx. Libro Guía p51-54.
- Ruiz-Castellanos, M. 1970. Reconocimiento Geológico en el área de Amatitlán-Mariscala, Estado de Oaxaca. Soc. Geol. Mex. Libro Guía p55-56.
- Ruiz Castellanos, Mario. 1979. Rubidium-strontium geochronology of the Oaxaca and Acatlán Metamorphic áreas of southern México. Tesis doctorado. 178p.
- Schlaepfer, c. j. 1970. Geología Terciaria del área de Yanhuatlán-Nochixtlán, Oaxaca. Soc. Geol. Mex. Libro Guía. P85-86.
- Torres, Evan y Torres Alarcón, 1987. Geología del área de Santa María Tejotepec, Oaxaca. UNAM. Tesis prof.

