

01190  
16



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

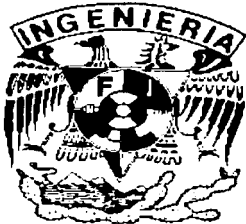
## EFFECTOS DE SALMUERA Y TEMPERATURA EN LA PERMEABILIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

GERARDO SILVA GONZÁLEZ PACHECO



DIRECTOR: RAFAEL ALMANZA SALGADO

MÉXICO, D.F.

2003

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## PIEDRA DE SAL

Tu estabas dormida  
como el agua que duerme en la alberca...  
y yo llegué a ti  
como llega  
hasta el agua que duerme  
la piedra.

Turbé tu remanso y en ondas de amor te quebraste  
como en ondas el agua que duerme se quiebra  
cuando  
llega  
a turbar su remanso dormido  
la piedra.

Piedra fui para ti, piedra soy  
y piedra quiero ser, pero piedra  
blanda de sal  
que al llegar a ti se disuclva  
y en tu cuerpo quede,  
y sea  
como la levadura de tu carne  
y como el hierro de la sangre de tus venas.  
Y en tu alma deje una sed infinita  
de amarlo todo... y una sed de belleza  
insaciable...  
eterna...

León-Felipe: *Versos y oraciones del  
caminante*

A Elia, por ella y para ella

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la  
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el  
contenido de mi tratado, respectivamente

NOMBRE: Gerardo Silva González

Pacheco

FECHA: 13/11/03

FIRMA: P.A. 

Tener un hogar limpio,  
de gustos bien sencillos,  
un huerto que dé frutos  
y un pequeño vergel.  
Buen vino, poco lujo,  
unos cuantos chiquillos,  
y en silencio y a solas  
una mujer fiel.

Montesquicu

A mis padres,  
Joaquín Silva y Piña (†)

y Emma González Pacheco Fleischer

gracias a ellos

El corazón habla más alto cuando no  
se mueven los labios.

Lillian Gilbreth

A mis hermanos, cuñados y sobrinos, Emma y Felipe, Margarita y Paco, Laura y Joaquín, Regina, Andrés, Francisco, Ana Cristina, Esteban y Fernando. A mi tío Rodolfo, a la familia Pimentel-González Pacheco y González Pacheco Hdz.-Mejía. A la memoria de mi abuela, mi tía Nena, mi tío Jaco y mi tío Carlos (†). A mis amigos, especialmente Gustavo, Juanjo y Nacho. A ti ojos azules (†).

El mar se mide por olas,  
el aire por alas,  
nosotros por lágrimas.

El aire descansa en las hojas,  
el agua en los ojos,  
nosotros en nada.

Parece que sales y soles  
nosotros y nada...

Jaime Sabines: *Horas*

Al Dr. Rafael Almanza Salgado, por su generosidad

“La tierra será como los hombres sean”

Refrán náhuatl

A la memoria del Investigador Emérito Nicolás Aguilera Herrera (†)

† La memoria es el único paraíso del que no pueden expulsarnos.  
Jean Paul Richter



## AGRADECIMIENTOS

La producción del hombre de ciencia, como toda actividad del espíritu, se halla rigurosamente condicionada por el medio físico y moral. Con razón se ha dicho que el sabio es planta delicada, susceptible de prosperar solamente en un terreno especial formado por el aluvión de secular cultura y labrado por la solicitud y estimación sociales

Santiago Ramón y Cajal

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A las autoridades del Instituto de Ingeniería de la UNAM durante mi larga estancia, directores, subdirectores y coordinadores, especialmente: Dr. José Luis Fernández Zayas, Dr. Francisco Sánchez Sesma, Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro, Dr. Rafael Carmona Paredes, Dr. Luis Álvarez-Icaza Longoria, Dr. Miguel P. Romo Organista. y M. en I. Alejandro Sánchez Huerta.

A todos los que colaboran en la Coordinación de Mecánica Fluidos y Térmica, especialmente a la Sra. Angélica E. Mendoza Neri, Dr. David Morillón Gálvez, M. en I. Felipe Muñoz Gutiérrez, M en I Filiberto Gutiérrez Martínez, M. en I. Manuel Aguirre Gándara, Drs. Ricardo y Enrique Chicurel Uziel y Dr. Alejandro Romero.

A mis compañeros de cubículo, de excursión y de camaradería en momentos alegres y otros difíciles: Óscar Callejas, quien colaboró en la elaboración de las gráficas de resultados, Álvaro Lentz, Genaro Correa, Iván Martínez, Gustavo Jiménez, Vicente Flores, Jesús Chávez y Arturo Sáez.

Al Sr. Carlos Aguayo del II, quien colaboró intensamente en diversas pruebas de laboratorio para la obtención de información confiable durante todas las etapas del proyecto.

Se agradecen muy especialmente los comentarios y sugerencias de la Mtra. Olivia Gómez Mora, le debo tanto.

A la Dra. Norma García, a la M. en C. Ma. del Socorro Galicia, a la Dra. Rosalía Ramos, a la Dra. Laura Reyes, a la Biól. Elizabeth Fuentes, y a la Técnica Ma. del Consuelo González por su incalculable cooperación y constante respaldo en la realización e interpretación de análisis fisicoquímicos realizados en el Laboratorio de Edafología "Mtro. Nicolás Aguilera" de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

A la M.I. Emilia Soledad Lucario del II, por su eficiente ayuda en la obtención de reactivos, materiales y equipo requerido para el trabajo experimental.

A las Licenciadas Guillermina Sánchez y Elizabeth Plata de la USI del II, por la siempre amable atención en la búsqueda y adquisición de información bibliográfica y documentos.

A los Drs. Octavio Cano y Adolfo Cordero del IFUNAM, así como a la M. C. Ma. Angélica del C. Arias del Instituto de Geología de la UNAM, por los análisis de difracción de rayos X.

Al Dr. Alfredo Gómez, Dr. Jesús Arenas, Dr. Jesús Miranda, M. en C. Carlos Magaña y M. en C. Jacqueline Cañetas Ortega del Laboratorio Central de Microscopia del IFUNAM, a cargo del Dr. Javier Miranda.

Al Departamento de Matemáticas de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería, especialmente al Fís. Juan Velázquez, así como a los ingenieros Ricardo Martínez, Erik Castañeda, Francisco Barrera y Bernardo Frontana.

A la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Al Quím. Sergio Botello, a la Rest. Elia Botello, por los conocimientos y material de consulta gentilmente brindados. Al M. en I. Gustavo Padrós, por los útiles libros obsequiados.

Este trabajo es en parte el resultado de investigaciones patrocinadas por CNA, CFE, DGAPA-UNAM y CONACYT. Se reconocen especialmente al Dr. Alberto Jaime, su apoyo en esta investigación; al Dr. Gabriel Auvinet, por sus sugerencias y por permitir el uso del permeámetro de pared flexible en el Laboratorio de Geotecnia del II; al Ing. Jesús Alberro y a los Drs. Marcos Mazari, Raúl Flores Berrones y Eulalio Juárez Badillo por los comentarios que aportaron a estos estudios.

**Ciudad Universitaria, octubre de 2003**

**Dr. Wilfrido Rivera Gómez Franco**  
Coordinador del Programa de Posgrado en Ingeniería

**M. en C. Salvador Marín Córdova**  
Jefe de la Sección de Geotecnia de la DEPTI

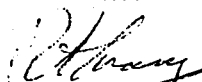
**EFFECTOS DE SALMUERA Y TEMPERATURA EN  
LA PERMEABILIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS**

**Integración de Jurado:**

**Presidente:** Ing. Jesús Alberro Aramburu  
**Secretario:** M. en C. Rafael Almanza Salgado  
**Primero Vocal:** Dr. Alberto Jaime Paredes  
**Segundo Vocal:** Dr. Gabriel Auvinet Guichard  
**Tercer Vocal:** Dr. Marcos Mazari Menzer  
**Suplente:** Dr. Raúl Flores Berrones  
**Suplente:** Dr. Eulalio Juárez Badillo

El tema de tesis se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en la Coordinación de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos.

Asesor

  
Rafael Almanza Salgado

Sustentante

  
Gerardo Silva González Pacheco

## ÍNDICE

1	Introducción	1
2	BARRERAS IMPERMEABLES	5
2.1	<i>Tipos de revestimientos</i>	9
2.2	<i>Revestimientos con suelos naturales y comerciales</i>	12
2.3	<i>Pruebas de compatibilidad</i>	16
2.4	<i>Aplicaciones en campo</i>	25
3	SISTEMA COLOIDAL SUELO-SOLUCION	29
3.1	<i>Las soluciones</i>	29
3.2	<i>Sistemas coloidales</i>	39
3.3	<i>Arcillas como partículas coloidales</i>	49
3.4	<i>Resumen y conclusiones</i>	84
4	FILTRACIONES EN REVESTIMIENTOS CON SUELO	85
4.1	<i>Tejido del suelo y permeabilidad</i>	85
4.2	<i>Flujo de agua y transporte de sales</i>	94
4.3	<i>Efectos del flujo de calor y conductividad térmica</i>	103
4.4	<i>Flujos asociados</i>	110
4.5	<i>Resumen y conclusiones</i>	116
5	DESCRIPCION DE LOS ENSAYES DE LABORATORIO	117
5.1	<i>Materiales utilizados</i>	117
5.2	<i>Líquidos de prueba empleados</i>	130
5.3	<i>Pruebas de compatibilidad</i>	132
6	RESULTADOS EXPERIMENTALES	159
6.1	<i>Pruebas de permeabilidad</i>	159
6.2	<i>Pruebas de Límites de Atterberg Modificadas</i>	199
6.3	<i>Pruebas Fisicoquímicas</i>	207
7	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	217
7.1	<i>Permeabilidad</i>	217
7.2	<i>Límites de plasticidad</i>	244
7.3	<i>Pruebas Fisicoquímicas</i>	250
7.4	<i>Resumen y conclusiones</i>	262
8	CONCLUSIONES	266
	REFERENCIAS	275

## RESUMEN

Se han realizado numerosos estudios relativos a los efectos de soluciones salinas en la permeabilidad de suelos arcillosos; sin embargo, generalmente consideran las interacciones químicas para bajas concentraciones, predominantemente con bentonitas y sin valorar el efecto de gradientes térmicos. Por ejemplo, en estanques solares, la principal preocupación es la filtración de salmuera concentrada. Debido a la gran extensión que se requiere cubrir para proteger acuíferos y el subsuelo, la necesidad de un revestimiento eficiente y económico es evidente.

Con el fin de simular las condiciones del suelo y un flujo en estado estable, así como la presencia de diferentes concentraciones de soluciones de sales alcalinas y gradientes térmicos, se diseñaron prototipos especiales de laboratorio. Se consideraron ciclos de carga y descarga hidráulica, química y térmica. En esta investigación experimental se describen varias muestras de suelo compactado, tanto nativas como comerciales. Bentonitas sódicas se probaron en dos condiciones: como revestimientos de suelo compactado o geosintético. Salmuera de KCl fue el principal líquido permeante.

Además de las pruebas de permeabilidad, para complementar los resultados se realizaron otras pruebas de compatibilidad, como límites de Atterberg modificados, pruebas fisicoquímicas, y análisis de difracción de rayos X y con microscopio electrónico de barrido. Una evaluación más completa ayuda a relacionar estos efectos con fenómenos como la electrostricción, fuerzas de solvatación, sinéresis y diagénesis, donde la composición mineral, potencial osmótico, y el arreglo estructural de las muestras juega un papel principal en el impacto de flujos acoplados bajo gradientes hidráulicos, químicos y térmicos.

## ABSTRACT

Numerous studies pertaining to the effects of salt solutions on clay soil permeabilities have been carried out, however, generally these studies consider such clay-chemical interactions only for low concentrations, predominantly on bentonites and without taking into account the effect of thermal gradients. For example, in the case of solar ponds, the major concern is the leakage of concentrated brine to underlying soil. Due to the large area that is required to cover to protect aquifers or subsoil environment, the necessity of an efficient lining is evident, but it must be as cheap as possible.

In order to simulate the soil conditions and the establishment of a constant rate of flow in steady state, as well as the presence of different alkaline salt solution concentrations and thermal gradients, special laboratory prototypes were designed and constructed. Hydraulic, chemical and thermal loading and unloading paths were considered. In this laboratory research several native and commercial compacted soil samples are reported. Sodium bentonites were tested in two conditions: compacted and geosynthetic clay liner. KCl brine was selected as the main permeant fluid.

In addition to the permeability experiments, other compatibility tests were undertaken to complement the results, e.g., modified Atterberg limits, physicochemical tests, X-rays diffraction analysis and scanning electron microscope. A more complete evaluation helps to relate these effects to phenomena such as electrostriction, solvation forces, syneresis and diagenesis, wherein the mineral composition, osmotic potential and structural arrangement of the soil samples play a major role in the impact of coupled flows under hydraulic, chemical and thermal gradients.

## 1. INTRODUCCIÓN

“Agua; agua por todas partes. Y de beber, ni una gota.”

Samuel T. Coleridge

Ya que el suelo es un sistema abierto de varias fases, cuya conducta está afectada por una variedad de fenómenos físicos y químicos que ocurren en diferentes escalas, en los últimos años se ha observado un interés creciente en la investigación de las características de composición del mismo y de sus propiedades fisicoquímicas al interactuar con el medio, a corto y largo plazo. Por otra parte, en proyectos especiales e investigaciones presentadas en congresos internacionales relativos a temas que involucren al sistema partículas sólidas – agua – aire, cada vez se recurre más a la escala de nanómetros para explicar el comportamiento macroscópico del suelo; esto ha sido favorecido por el rápido avance en la tecnología requerida para el análisis e identificación de la composición y pruebas de laboratorio, así como por la mayor difusión de la información, y por una creciente y necesaria participación multidisciplinaria. Las propiedades de clasificación usuales del suelo no siempre reflejan adecuadamente la influencia de factores de composición y estructurales, cuya comprensión requiere considerar el comportamiento del agua y los iones en las *nanopartículas*, y la influencia del agua libre y sus solutos en el desarrollo de la *microestructura*; hay muchos ejemplos de tipos de suelos donde estos factores son especialmente importantes, como los dispersivos.

La geotecnia ambiental, como componente esencial de la ingeniería ambiental, ha sido una de las subdisciplinas de la geotecnia con mayor crecimiento durante los últimos quince años. La disposición y contención de desechos que protejan el ambiente, y la remediación de sitios contaminados, plantean problemas especiales que los ingenieros geotécnicos son los únicos calificados para resolver; no obstante, para hacerlo efectivamente se requiere de nuevos conocimientos de las propiedades del suelo y de las influencias de factores químicos y biológicos en su comportamiento, así como de la correspondiente evaluación de las interacciones complejas de distintos materiales, y también del uso de métodos de análisis que comúnmente deben ir más allá de aquellos empleados para la solución de los problemas clásicos en la geotecnia (Mitchell, 1996).

Desde hace unas tres décadas, en la práctica de la ingeniería geotécnica comenzaron a adquirir mayor importancia los problemas ambientales, como la disposición y almacenamiento de desechos peligrosos, la limpieza de sitios contaminados, y la protección de los acuíferos. En el ámbito nacional y universitario, instituciones como CNA, CFE y PEMEX, así como la propia UNAM y CONACYT, han apoyado propuestas que persigan atenuar el impacto ambiental y preservar la calidad del agua, así como aquellas que tengan que ver con el empleo de revestimientos que protejan el subsuelo de la contaminación en sitios de disposición de desechos industriales y mineros.

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

En una investigación conducida a finales de los años sesenta sobre las propiedades de las arcillas del valle de México (Marsal y Graue, 1969), se manifestó la evidencia de una variable no considerada hasta entonces, la concentración de sales disueltas en el agua intersticial, y se recomendó resolver los puntos oscuros señalados en aquel trabajo. El propio nombre de uno de sus autores, Raúl J. Marsal, reconocido investigador y formador de recursos humanos, resultó entonces vinculado en más de un sentido con dicha variable.

En ambientes de sedimentación marinos ocurren cambios fisicoquímicos debido al incremento en la presión por sobrecarga, incremento de temperatura e interacción química de los minerales y el flujo del agua de poro. A grandes profundidades, donde el agua normalmente es caliente y salina, es importante la *diagénesis*, conjunto de procesos que provocan cambios fisicoquímicos en un sedimento, debido a los efectos en el espacio poroso, pues algunos procesos actúan para reducir o ampliarlo. Generalmente, el término acoplamiento químico-mecánico se refiere a eventos que ocurren relativamente en cortos periodos; sin embargo, a largo plazo permiten cambios notables en propiedades mecánicas, *microestructura* y hasta mineralogía. Se mencionan como ejemplos la disolución-precipitación por presión, la compactación de la sal granular, transformación de *montmorilonitas* en *illitas* y formación de suelos residuales (Di Maio *et al*, 2002). Por otra parte, con el desarrollo de fuentes de abastecimiento de agua subterránea y la subsecuente disminución del nivel del agua freática, el balance dinámico entre el agua dulce y salada se puede alterar y permitir la intrusión de agua salina en acuíferos costeros. Asimismo, hay muchos estudios que intentan determinar la posición de la *haloclina*, interfase agua dulce - agua salina, principalmente en áreas costeras y para condiciones de flujo como pueden ser las inducidas en la vecindad de pozos de bombeo. El peligro de contaminación de los acuíferos es grave. En el propio valle de México ya se ha advertido del riesgo de la desecación de la formación arcillosa superior (acuitardo), producto del excesivo bombeo, con el consecuente agrietamiento que favorecería el rápido flujo de agua contaminada desde la superficie y directamente hasta la primera capa dura (Mazari *et al*, 1996). Para comprender la formación de los sedimentos, modelar plumas salinas y estimar aproximadamente la rapidez del lavado en baterías de pozos de lavado, como los de la industria petrolera, son necesarios análisis que consideren factores como el acoplamiento de gradientes hidráulicos, químicos y térmicos.

En la literatura se encuentra una serie de compendios actualizados que permiten conocer ciertas etapas en las que se utilizan arcillas como impermeabilizantes en sistemas de desechos municipales e industriales; sin embargo, esta literatura, en general, contempla sólo algunas arcillas, usualmente bentonitas, está limitada a pocas sustancias, en su mayoría orgánicas, y no considera el efecto de los cambios de temperatura.

En este trabajo se emplearon sustancias colorantes para investigar, desde un punto de vista geotécnico, los efectos de las sales y la temperatura en el comportamiento de las arcillas. Sin embargo, existen otros enfoques para apreciar tales interacciones. Por ejemplo, Reyes Constantino (1993) buscó aclarar la preparación del *azul maya* y resolver la incógnita sobre cómo fue que los artistas prehispánicos emplearon una o varias arcillas para preparar el pigmento azul, cuya resistencia al ambiente es excepcional (Ortega, 2003). Los indígenas utilizaron arcillas contenidas de forma natural en el agua enturbada arrastrada por las lluvias, y de manera empírica lo asociaron de forma indisoluble con



tintas vegetales, con ayuda del calentamiento de la mezcla; en estudios de identificación se han detectado, aparte de *atapulgita* o *paligorskita*, otros silicatos, como *sepiolita*, *caolinita*, *montmorilonita* y *nontronita*. En buen parte de los suelos de México abunda la montmorilonita; por otra parte, también existe paligorskita, pero casi no se le menciona, posiblemente porque desde una perspectiva agrícola no tiene tanta importancia (Reyes, 1993). Como se verá posteriormente, esta arcilla puede ser de gran interés en geotecnia.

El propósito de estos estudios, efectuados en el IUNAM, es aprovechar parte de un proceso natural del suelo, y adecuarlo de la manera más conveniente para reducir, y aun eliminar, la peligrosidad de los residuos industriales en el lugar de su destino final. Por medio de arcillas se propone obtener las condiciones adecuadas para evitar daños a los ecosistemas y propiciar una estabilización de los residuos. El diseño de revestimientos por medio de suelos arcillosos debe considerarse como una obra de ingeniería, compatible con otros sistemas de control de residuos líquidos o sólidos, factible de aplicarse en países en vías de desarrollo. Sin embargo, la inevitable interacción con el medio puede implicar un cambio de las propiedades físicas y químicas de algunos componentes del suelo durante el tiempo de su operación como barreras impermeables.

Este trabajo prosigue con estudios iniciados en la tesis de maestría (Silva, 1995), con el fin de resolver las problemáticas planteadas en proyectos de investigación realizados en forma paralela, contando con la valiosa asesoría de investigadores y entidades de la UNAM, y motivados por la comprensión de fenómenos y su aplicación en campos de la Ingeniería Geotécnica, como el de estabilización y mejoramiento de suelos.

Entre los alcances de esta investigación experimental se encuentra el trabajo sistemático con prototipos de laboratorio que simulan ciertas condiciones en campo al utilizar diversas arcillas, generalmente compactadas, como material de revestimiento. Asimismo, para cumplir con el objetivo que encierra el título de esta tesis se recurrió a pruebas adicionales a las propiamente de permeabilidad. La aplicación de técnicas fisicoquímicas para evaluar las propiedades de distintos tipos de suelos arcillosos, así como los cambios que ocurren en ellos al interactuar con el medio, particularmente ante la exposición de gradientes químicos y térmicos, permiten aclarar fenómenos observados en aplicaciones para proyectos de ingeniería, a veces de manera rápida y sencilla.

La presente tesis se centra en aplicaciones para el diseño de barreras de fondo por medio de revestimientos flexibles (suelos compactados y geotextiles con bentonita), así como de algunos tipos de barreras verticales que utilicen arcillas. En la primer parte se presentan alternativas para emplear suelos arcillosos como impermeabilizantes, como una opción que reduzca el costo y el riesgo de contaminación en el subsuelo, y se discuten factores como tipo de líquidos almacenados y efectos de temperatura. Los capítulos de revisión del estado del arte y teoría (capítulos 2, 3 y 4), engloban de manera condensada la información necesaria para analizar el tema en cuestión. El capítulo 3, además de presentar las bases teóricas, sirve de glosario de la mayoría de los términos y conceptos que se mencionan en otros apartados, sobre todo en los capítulos a los que precede. El trabajo experimental comienza con la descripción de los ensayos de laboratorio (cap. 5); le siguen la presentación de los resultados correspondientes (cap. 6), la respectiva discusión (cap. 7) y, finalmente, las conclusiones (cap. 8).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 2. BARRERAS IMPERMEABLES

No conseguirá nunca  
tu lanza  
herir el horizonte.  
La montaña es un escudo  
que lo guarda.

Federico García Lorca

La fase líquida de muchos sistemas de suelo contiene varios tipos y cantidades de electrólitos disueltos. Compuestos orgánicos o inorgánicos se encuentran en suelos de sitios afectados por derrames químicos, filtraciones de desechos y agua contaminada (Mitchell, 1993).

La contaminación subterránea ocurre cuando las sustancias químicas que forman parte del líquido almacenado, o bien que son transportadas durante la migración del agua a través de depósitos de residuos, alcanzan el ambiente contiguo a los sitios de almacenamiento o disposición de desechos. En éstos, el agua contaminante usualmente se origina de la precipitación, así como de las actividades de la disposición de los desechos, consolidación de éstos o ambos. La cantidad y calidad del agua contaminada por los desechos depende principalmente de las condiciones climáticas, propiedades fisicoquímicas de los residuos y operaciones de disposición (Shackelford y Nelson, 1996).

Tras una revisión del surgimiento de la Geotecnia Ambiental, se concluye que este campo debe identificarse principalmente con los aspectos geotécnicos del manejo de desechos. Es útil caracterizar los problemas asociados con la Geotecnia de acuerdo con la emisión de los desechos, y con ese propósito distinguir entre desechos municipales, industriales, agrícolas, mineros y nucleares (Morgenstern, 1994). En países industrializados los desechos pueden clasificarse, en general, en cuatro categorías: municipales, industriales, de baja radioactividad y desechos peligrosos (Das, 1994).

Los desechos peligrosos depositados en tierra generalmente se encuentran en una de las siguientes categorías físicas: inorgánicos acuosos, orgánicos acuosos, orgánicos y lodos (EPA, 1974). En los desechos inorgánicos acuosos el agua es el solvente (fluido dominante) y la mayoría de los solutos son inorgánicos. Algunos ejemplos de estos solutos son las sales inorgánicas, metales disueltos en ácidos inorgánicos, y materiales alcalinos tales como la sosa cáustica. Ejemplos de sustancias en esta categoría son las salmueras, desechos de electrólisis, desechos de corrosión de metales y soluciones de deslavado cáustico (Craig, 1981).

En la naturaleza abundan ejemplos de sales en disolución acuosa, por ejemplo los océanos, albuferas, aguas salobres superficiales y subterráneas, y salmueras geotérmicas. La vasta capa de agua salada que cubre gran parte de la Tierra está conectada y generalmente tiene una composición constante. Por esta razón, los oceanógrafos hablan del océano terrestre más que de los océanos individuales estudiados en geografía. Su

volumen es  $1.35 \times 10^9 \text{ km}^3$ . Casi toda el agua de la Tierra, el 97.2%, está en el océano y es agua salina. Del resto, el 2.1% se encuentra en forma de mantos de hielo y en los glaciares. Toda el agua dulce –en lagos, ríos, y agua freática sólo abarca el 0.6%. La mayor parte del 0.1% restante se encuentra como aguas salobres (saladas), como el Gran Lago Salado de Utah (Brown *et al*, 1993).

La salinidad del agua de mar, definida en términos del número de gramos de sales secas existentes en 1 kg de agua de mar, varía de 33 a 37 g, con un promedio cercano a 35 g (35 000 ppm); es decir, el agua de mar contiene alrededor de 3.5% de sales disueltas (Brown *et al*, 1993). El agua salina es similar en concentración al agua de mar. Una salmuera es agua salada con una concentración de sales disueltas mayor que la ordinaria del océano. El agua salobre tiene valores de salinidad que fluctúan de 500 a 17 000 ppm (Parker, 1992), es decir, menores que los del agua de mar, pero mayores que los del agua potable, que no debe exceder de 500 ppm.

En el océano las cantidades de cloro (19.35 g/kg) y sodio (10.76 g/kg) son mucho mayores respecto a otros elementos, como el potasio (0.40 g/kg) (Brown *et al*, 1993). Esta proporción puede variar en otros sistemas; por ejemplo, en salmueras extraídas del lago de Texcoco se reportaron los siguientes valores para cloro, sodio y potasio, respectivamente: 5.2, 6.60 y 0.44 g/L (Durand-Chastel, 1968). Asimismo, al comparar dos tipos de salmueras obtenidas de la explotación de los pozos geotérmicos de la República Mexicana, Los Azufres, Mich. y Cerro Prieto, B.C., se observan diferencias, como que la del primer sitio está más diluida y su contenido de NaCl y KCl es cinco veces menor respecto de la del segundo (Almanza y Muñoz, 1994).

La presencia de sales ácidas, neutras o básicas en la solución del suelo puede ser el efecto de la exposición del mineral a la intemperie (*intemperismo*), y de la descomposición microbiana de materia orgánica, así como de la contaminación proveniente del agua de irrigación y de residuos de fertilizantes, o de diversos desechos industriales. En condiciones naturales, generalmente no se acumulan en áreas húmedas debido al lavado intenso, pero suelen acumularse en regiones áridas, o bien, en ambas zonas si el drenaje es restringido (Page, 1982).

Además de los sistemas naturales con salmueras en altas concentraciones, existen otros artificiales, como los campos geotérmicos, almacenamientos de desechos líquidos industriales o de aguas negras, lagunas de evaporación, estanques solares, instalaciones de confinamiento de soluciones salobres y residuos mineros. Estas instalaciones necesitan algún tipo de revestimiento para evitar contaminar acuíferos o cualquier otro sistema subterráneo.

Otro aspecto relacionado a la contaminación sería el de los efectos de la temperatura en las filtraciones a través de medios porosos como son los suelos. La temperatura máxima de un suelo superficial seco puede llegar a 54°C (Lyon y Buckman, 1956). En sitios de disposición final de residuos sólidos y líquidos en ocasiones se presentan reacciones exotérmicas. Debido a reacciones químicas pueden alcanzarse, durante periodos cortos, temperaturas mayores a los 100°C; asimismo, por efecto de la descomposición biológica durante la fase aerobia, la temperatura en el interior de un relleno llega a valores de 55°C,

regresando posteriormente al valor ambiente en la fase anaerobia, mientras que en sitios de disposición de desechos de combustibles nucleares son de esperarse temperaturas de aproximadamente 100°C. En un sistema de almacenamiento de sales inorgánicas, como es el caso de estanques solares y lagunas de evaporación y cristalización, las temperaturas que se alcanzan son del orden de 80 a 90°C (Almanza y Muñoz, 1994).

De acuerdo con lo anterior, frente a la necesidad de almacenar un líquido escaso, de gran valor económico, o bien contaminante, es importante establecer criterios para la construcción y control de filtraciones, de manera segura y barata.

El primer paso en el diseño de sistemas de almacenamiento es buscar el sitio más apropiado con base en las condiciones óptimas desde el punto de vista hidrológico, geológico y geotécnico. El segundo paso es realizar una extensa investigación geotécnica en el sitio. El diseño físico del sistema de confinamiento debe incluir consideraciones de permeabilidad y deformación a largo plazo, así como cambios en las propiedades debido a la interacción con el material almacenado. Cuando la capacidad de deformación del subsuelo no cumpla los requisitos hay que considerar el mejoramiento del suelo de cimentación (Van Impe, 1994).

Los residuos de las operaciones de la minería y la industria usualmente son almacenados como líquidos o lodos retenidos por diques de nivel bajo, en los que debe tomarse en cuenta la elevación del nivel freático. Los perfiles de suelo ideales son aquellos con un nivel freático profundo (Fredlund y Rahardjo, 1993).

El confinamiento de desechos puede realizarse con barreras hidrológicas y barreras físicas pasivas. En estas últimas, los sistemas de confinamiento están constituidos por barreras de fondo (revestimientos), barreras verticales (muros, trincheras o pantallas) y barreras de control superficial (cubiertas), así como por sistemas de drenaje (recolección y remoción de las filtraciones). Por otro lado, el empleo de barreras reactivas pasivas es una prometedora aproximación a los métodos para limpieza del agua del subsuelo (fig. 2.1)

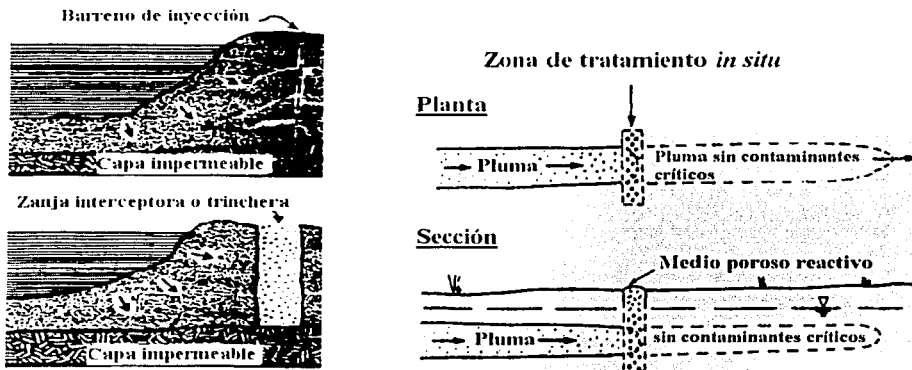
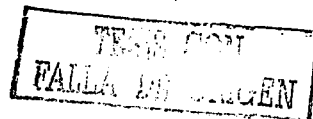


Fig. 2.1 Barreras verticales y reactivas (Shen, 1962; Mitchell, 1996)



Las barreras de fondo incluyen formaciones naturales de suelo y rocas, barreras de inyección, sistemas de revestimiento compuestos, inyección a chorro y algunos sistemas especiales de reciente diseño, como las inyecciones a través de perforaciones con dirección controlada. Una alternativa de los sistemas de revestimiento de fondo es el concepto de trinchera perimetral o muro de retención; el objetivo es diseñar una barrera empotrada en una capa impermeable natural o artificial a una cierta profundidad. Las barreras verticales utilizadas para contener desechos contaminantes o agua subterránea incluyen: muros de pilotes perforados y entrecruzados; muros delgados de vigas hincadas; tablestacados de acero; pantallas de lodo (simples o compuestas); cortinas de inyección; barreras de flujo mezcladas *in situ* (mezclado profundo de suelo o inyección a chorro); arcilla compactada o mezclas minerales; muros densos de bentonita; bentonitas combinadas con geomembranas traslapadas, con muros de suelo congelado y vitrificado, o con ambos (Mitchell, 1994; Morgenstern, 1994).

En ciertos sistemas son especialmente importantes las propiedades térmicas de los revestimientos. Los estanques solares de gradiente salino son sistemas artificiales, contruidos para generación de electricidad, donde se almacenan salmueras de alta concentración (fig. 2.2); aparte de las filtraciones, el flujo de calor del fondo del estanque hacia el subsuelo reduce la eficiencia de dichos sistemas. Por ello, es necesario la selección de un material adecuado que sirva como barrera para impermeabilizar, aislar térmicamente y, al mismo tiempo, evitar la contaminación.

El uso de revestimientos de arcillas compactadas (*CCL*) para estanques solares, así como resultados de pruebas de laboratorio de dichos materiales con salmueras calientes de NaCl, saturadas o altamente concentradas, ya han sido discutidos (Almanza *et al*, 1989; Almanza y Lozano, 1990; Almanza y Castañeda, 1993). En tales estudios la *capacidad de intercambio catiónico*, el área específica y la composición mineral son parámetros importantes para entender el comportamiento del revestimiento arcilloso.

Esta tecnología ha seguido avanzando en diversos países (Robbins *et al*, 1995, Hassairi *et al*, 2001); uno de los principales objetivos que se plantean es la reducción de costos, así como la comprensión de otros fenómenos del cuerpo de salmuera que conforma al estanque, con el fin de predecir su comportamiento a largo plazo. Debido a la gran extensión, la necesidad de un recubrimiento eficiente pero barato es evidente. Se han usado con buen éxito materiales plásticos como revestimientos para pequeños prototipos de estanques solares. Sin embargo, la experiencia con grandes estanques solares (mayores de 5 km<sup>2</sup>) muestran que, si se usan tales revestimientos sintéticos, el costo se incrementa hasta en un 30%; revestimientos con arcillas locales pueden ser la respuesta, particularmente en países en desarrollo.

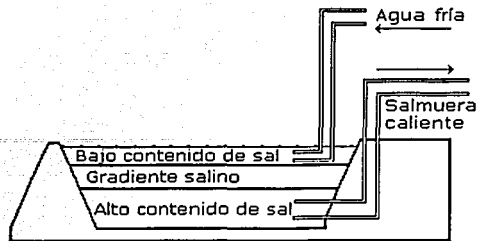


Fig. 2.2 Esquema de un estanque solar y zonas que lo forman (Almanza, 2003)

## 2.1 Tipos de revestimientos

Existen diversos tipos de revestimientos y productos para impermeabilizar; las técnicas de impermeabilización pueden clasificarse en tres grandes grupos (Auvinet y Esquivel, 1986):

- Mecanismos de sellado natural y tratamientos químicos
- Revestimientos rígidos
- Revestimientos flexibles.

El sellado natural de las barreras a base de material térreo puede deberse a la propia capacidad del suelo de cerrar las fisuras que aparecen durante la operación del revestimiento, así como a la disminución de vacíos del suelo por procesos físicos, químicos o biológicos, como la sedimentación, intercambio iónico, cementación y crecimiento de microorganismos.

Los tratamientos químicos consisten en productos que se mezclan con el suelo para mejorar su comportamiento como impermeabilizantes; entre estos productos se menciona la bentonita. Las bentonitas son utilizadas en varias aplicaciones en el campo geotécnico y ambiental debido a sus propiedades de plasticidad, permeabilidad y cualidades reológicas, y es común, por simplicidad, hablar de bentonitas cálcicas, bentonitas sódicas y *bentonitas activas*, es decir, bentonitas sódicas *activadas* con sosa ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Koerner *et al.*, 1995); la bentonita granular desprende menos polvo, es más fácil de extenderse en capas, pero es más costosa que la pulverizada. Respecto de algunos procedimientos recomendados para el sellado de estanques agrícolas y almacenamientos mediante el uso de bentonitas se mencionan tres métodos: con estanque seco, bajo el agua y con pantalla impermeable (Shen, 1962).

Los revestimientos rígidos se hacen comúnmente con concreto hidráulico y asfáltico, así como con una mezcla de suelo arenoso con cemento, denominada suelo-cemento. Entre los revestimientos flexibles se encuentran las membranas sintéticas (geosintéticos), membranas asfálticas, láminas asfaltadas prefabricadas, y revestimientos a base de suelos compactados.

TIENES CON  
FALLA DE ORIGEN

En términos de materiales para revestimiento hay una clara distinción entre revestimientos minerales (arcillas y mezclas de arena-arcilla) y revestimientos artificiales (geomembranas, revestimientos asfálticos, etc.) (August *et al*, 1997).

En los últimos años se han desarrollado gran variedad de técnicas de impermeabilización; sin embargo, los métodos de impermeabilización con suelos compactados son los que mejor se adaptan a las condiciones nacionales pues, además de contar con varios años de experiencia de operación exitosa, frecuentemente resultan los más económicos. Las membranas sintéticas tienen un limitado récord de comportamiento, suelen ser demasiado costosas, y son de comportamiento incierto debido a posibles defectos de fabricación, alta dependencia de las prácticas de instalación y condiciones propias de operación, como la alta temperatura del suelo (Auvinet y Esquivel, 1986; Tobin y Wild, 1988).

Hasta 1982, la arcilla era el principal material de revestimiento usado en rellenos. Actualmente, ciertas organizaciones y agencias reguladoras, como la Agencia de Protección Ambiental de EUA (US EPA) o las regulaciones federales en Alemania, exigen como condición para construir almacenamientos superficiales y rellenos con desechos peligrosos sistemas de revestimiento mixto o compuesto (comúnmente a base de sintéticos), y sistemas para recolectar y remover los lixiviados, donde pueden intervenir productos geosintéticos que utilizan arcillas del tipo de las bentonitas (fig. 2.3). La aplicación de geosintéticos es una herramienta novedosa para prevenir la contaminación en rellenos sanitarios y confinamientos controlados, ya que permite el control y tratamiento adecuado de líquidos y gases contaminantes.

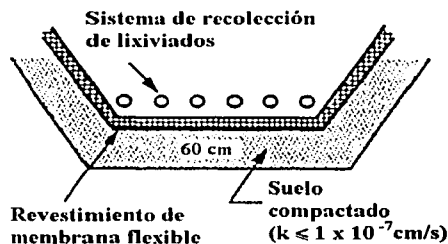


Fig. 2.3 Diseño conceptual de revestimiento doble o compuesto y sistema de recolección de lixiviados (Koerner et al, 1995)

Para entender la construcción y funcionamiento de los sistemas dobles es necesario revisar las propiedades generales de los materiales que los componen, esto es, el suelo arcilloso y los geosintéticos (geotextiles y geomembranas). En general, los geosintéticos son materiales manufacturados a partir de polímeros. Entre ellos están las geomembranas y los geotextiles. Para la selección de geomembranas deben considerarse sus propiedades mecánicas: maniobrabilidad, deslizamiento, agrietamiento por esfuerzo y coeficiente térmico de expansión, así como la estabilidad de la pendiente lateral (Das, 1994).



Se han propuesto en la literatura diversas combinaciones para sistemas de revestimientos sintéticos compuestos. Los diseños que usan geosintéticos deben basarse en revestimientos sintéticos y minerales combinados debido a los severos requisitos para traslapes de revestimientos geosintéticos y la posibilidad de pequeñas perforaciones a través de estos materiales muy delgados ( $\leq 15$  mm) (Van Impe, 1994).

Un tipo especial de membrana sintética es el EPDM (monómero diene-etileno propileno), que es una categoría especial de hule butilo y es el único que puede emplearse para altas temperaturas (de 80 a 100°C) (Auvinet y Esquivel, 1986); sin embargo, el material, además de costoso, tiene que sellarse térmicamente en el sitio, lo cual es una operación difícil.

Un efectivo y económico diseño de revestimiento puede consistir en una película de polietileno de baja densidad (LPDE) manufacturada localmente, colocada entre dos capas de arcilla local compactada (Jubran *et al.*, 1996). No obstante, el polietileno presenta ciertas desventajas: baja confiabilidad de las juntas, piezas de tamaño reducido, rigidez y baja resistencia al arrugamiento (Auvinet y Esquivel, 1986).

Un geotextil es un textil en el sentido tradicional, o una fibra sintética, usualmente de productos del petróleo o de fibra de vidrio, que se utiliza de manera asociada o conjunta con un suelo. El textil, a su vez, es un conjunto de fibras, dentro de las cuales deben distinguirse diversos procesos de fabricación, los cuales conllevan a las diferentes clases de geotextiles existentes en el mercado: tejidos, no tejidos, anudados o entrelazados, punzonados, y compuestos (por varios tipos de geotextiles). Las fibras y los filamentos se elaboran, generalmente, a partir de polímeros, entre los que destacan: los poliésteres, polietilenos o polipropilenos y poliamidas (Morales, 1990). En los geotextiles se ha observado un comportamiento integrado al suelo, reforzándolo, haciendo las veces de elemento a la tensión. En cuanto a su comportamiento hidráulico, el geotextil presenta una pequeña oposición al paso del agua, asociado con un aumento de resistencia al paso de las partículas sólidas.

Los revestimientos de arcilla-geosintéticos (GCL) están compuestos de geosintéticos y una delgada capa de arcilla, usualmente bentonita, adherida a una geomembrana, o bien, intercalada entre dos capas de geotextiles (fig. 2.4). Este último tipo de GCL contiene regularmente alrededor de 4 a 5 kg/m<sup>2</sup> de bentonita sódica. Su espesor en seco es de 6 mm, pero al hidratarse se expande aproximadamente a 12 mm. La presión de expansión por fuerzas de repulsión entre partículas es de 2 MN/m<sup>2</sup>, aproximadamente, mientras que las correspondientes a la expansión entre cristales por adsorción de dos, tres y cuatro capas de moléculas de agua son de 100 y 27 MN/m<sup>2</sup>, respectivamente. Los geosintéticos se manufacturan en paneles con espesor de aproximadamente 5 m y longitudes hasta de 60 m (Mitchell, 1994; Koerner *et al.*, 1995).



Fig. 2.4 Geotextil con bentonita (Koerner et al, 1995)

En EUA se requiere que la permeabilidad para barreras de tierra y tierra tratada sea igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s o menor, con valores permitidos en algunos casos de  $1 \times 10^{-8}$  m/s. Un requerimiento típico ha sido una capa compactada de arcilla de al menos 60 cm de espesor. En el caso de revestimientos sintéticos, son casi impermeables y el flujo se presenta casi exclusivamente por defectos de fabricación o instalación. Los requisitos para barreras de geomembrana se especifican comúnmente en términos de un espesor mínimo aceptable y tipo de material, más que de una permeabilidad máxima permitida. No obstante, la efectividad completa de una barrera para prevenir flujo y difusión depende tanto de su permeabilidad como de su espesor. La *permisividad*, definida como la relación de la permeabilidad al espesor, equivale a la velocidad de flujo correspondiente a una diferencia de carga unitaria a través de la barrera. La permisividad es una medida útil de la efectividad relativa de diferentes sistemas de barreras. Algunos valores típicos de permeabilidad de diferentes materiales para barreras, así como espesores usuales para barreras hechas con los materiales indicados, se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Comparación de valores de permisividad de revestimientos (Mitchell, 1994)

Material	Permeabilidad (m/s)	Espesor típico (m)	Permisividad (s <sup>-1</sup> )
Arcilla compactada	$1 \times 10^{-9}$	0.9	$1.1 \times 10^{-9}$
Geomembrana	$1 \times 10^{-14}$	0.001 - 0.002	$0.5 - 1 \times 10^{-11}$
Arcilla-geosintético	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-10}$	0.012	$8 \times 10^{-11} - 8 \times 10^{-9}$

2.2 Revestimientos con suelos naturales y comerciales

El éxito de la técnica de impermeabilización con suelos compactados reside en la adecuada selección del tipo de suelo, en su preparación y en el método de colocación. Generalmente, un revestimiento de suelo debe combinar varias propiedades: baja permeabilidad, estabilidad ante los gradientes aplicados y resistencia a la erosión, y en determinadas circunstancias, estabilidad volumétrica para evitar el agrietamiento por secado (Auvinet y Esquivel, 1986).

Los parámetros más importantes para controlar el coeficiente de permeabilidad, k, de una arcilla compactada son: contenido de agua y peso unitario seco de compactación, tamaño de los terrones y liga entre capas (Auvinet y Esquivel, 1986; Mitchell y Jaber, 1990).

Numerosos casos estudiados en campo indican que los valores de conductividad hidráulica en suelos arcillosos compactados pueden ser varios órdenes de magnitud mayores que los valores medidos en laboratorio con el mismo suelo, particularmente si el control de calidad de la construcción es pobre. Como consecuencia de la relación entre los valores de conductividad hidráulica de laboratorio y de campo, algunas agencias reguladoras (EPA) establecen como requisito que los valores de laboratorio se confirmen en campo en un terraplén de prueba que se construye utilizando los mismos materiales y procedimientos de construcción que se emplearán en el revestimiento real (Shackelford y De Mello, 1994).

Los materiales usados para revestimientos térreos artificiales son:

- 1) Suelos nativos, tanto de grano fino (limo y arcillas) así como suelos gruesos con cantidades significativas de finos
- 2) Mezclas de suelos, como arena con bentonita sódica
- 3) Suelos mejorados o químicamente estabilizados, como arcilla con cal
- 4) Revestimientos de arcilla-geosintéticos (GCL).

Los revestimientos deben cumplir principalmente con tres condiciones: 1) tener una conductividad hidráulica (permeabilidad) relativamente baja; 2) ser compatibles con el líquido almacenado; y 3) tener capacidad de atenuación relativamente alta.

### 2.2.1 Impermeabilidad

En la literatura se recomiendan distintas especificaciones en cuanto a límites de Atterberg y granulometría del material para revestimiento. Generalmente, estas recomendaciones se han hecho con el fin de lograr bajas permeabilidades en campo ( $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s). Esto se consigue al incrementar la maniobrabilidad del suelo y con ello reducir la existencia de macroporos y otros defectos secundarios que son potencialmente perjudiciales para el revestimiento de arcilla. Si se aumenta la cantidad de finos, particularmente de material arcilloso, y se limita la cantidad de material grueso se minimiza el máximo valor de la relación tamaño de partícula-terción permitido para material de revestimiento, con lo cual se disminuye el riesgo potencial de macroporos y defectos estructurales, así como la permeabilidad. En función de lo anterior, el suelo deberá cumplir con el siguiente criterio (EPA, 1989):

1. Deberá tener al menos 20% de finos (partículas del tamaño de arcilla y limo fino)
2. El índice plástico, IP, deberá ser mayor de 10%. Los suelos que tienen un IP mayor de 30% son difíciles de manejar en campo y son más susceptibles de sufrir desecación y agrietamiento
3. El suelo no deberá contener ninguna partícula ni pedazo de roca que sea mayor de 1.2 plg ( $\approx 25$ -50 mm).

La composición mineral y la actividad A (relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas menores de  $2 \mu\text{m}$ ) son dos factores primordiales en la

permeabilidad. La actividad de las arcillas sigue el orden decreciente: esmectitas > atapulgita > illita > caolinita.

Mediante un estudio geotécnico se evalúa si los suelos locales pueden emplearse para impermeabilizar o, en su caso, definir los problemas de estabilidad que éstos plantearán para la aplicación de un método de impermeabilización dado. En muchos casos, el suelo encontrado en el sitio puede no ser plástico; esta clase de material puede mezclarse con minerales arcillosos, como bentonitas, para lograr las propiedades deseadas. La calidad de las mezclas de arenas limosas con bentonitas será altamente dependiente de la distribución de tamaño de grano de todos los constituyentes, la homogeneidad de la mezcla, el contenido de agua al mezclar y la densidad de la mezcla en la instalación. La arena limosa debe ser bien graduada para suministrar la interacción óptima con los minerales de bentonita, lo que es de gran importancia para eliminar pequeñas fisuras al trabajar bajo gradientes de temperatura (Van Impe, 1994).

Además de los minerales arcillosos, los suelos cohesivos generalmente contienen también otros componentes, principalmente carbonatos, materia orgánica, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, sulfatos y sulfuros, los que pueden reaccionar con los lixiviados. Para evitar cambios perjudiciales, deben estipularse en las regulaciones y observar en la práctica valores límite de estos componentes.

La construcción de un revestimiento altera el balance de humedad natural del suelo. Las capas de revestimientos de tierra y el material de cimentación también están sujetas a desecación, por lo que es necesario optimar el diseño relativo a la prevención de agrietamiento. Un gradiente de temperatura hacia el subsuelo puede causar que el material térreo pierda una gran proporción de su humedad en lugares donde al revestimiento de fondo subyazca una capa de grava para drenaje. Los revestimientos de fondo y el subsuelo están sujetos a cargas térmicas a largo plazo, de lo que resulta el calentamiento del revestimiento entre 40 y 50°C. Tal calentamiento, bajo ciertas condiciones (en revestimientos compuestos con una geomembrana superior, o en segmentos de revestimientos minerales simples sin acceso superior a lixiviados), puede causar desecación en la capa mineral. Los resultados de pruebas de laboratorio y con modelos numéricos de combinaciones de transporte de agua, vapor y calor, indican que el componente mineral del revestimiento compuesto está expuesto al riesgo de desecación si el revestimiento está sobre un material basal permeable. Ninguna capa de drenaje debe construirse directamente debajo del revestimiento mineral, a menos que dicha capa pueda mantenerse continuamente en estado saturado (August *et al.*, 1997).

La desecación se refiere al secado del suelo y a la formación de grietas de tensión que conducen a caminos de flujo preferenciales a través del revestimiento. Es un problema potencial serio en climas áridos y tropicales, particularmente en suelos con alto contenido de agua ( $\geq 40\%$ ). Para minimizar la desecación se recomienda humedecer constantemente el material compactado, formar una capa superior de protección pasando un rodillo sobre cada capa compactada y escarificar el material para una adecuada unión entre capas. Asimismo, se sugiere hacer terraplenes de prueba y emplear el contenido de agua, más que el peso unitario seco, como factor de control de calidad de la compactación.

Las grietas y otros defectos que pueden desarrollarse durante la compactación y debido al intercambio catiónico tendrán la tendencia a sellarse debido al peso del material del terraplén (Achari *et al.*, 1999); sin embargo, debe tenerse en cuenta la posibilidad de que se presenten fisuras por causa de un fenómeno conocido como sinéresis. Tanto en los revestimientos minerales simples como en los compuestos, el *autosellado* es una propiedad muy importante. Dicha propiedad consiste en la capacidad propia de cerrar las fisuras causadas por influencias externas, manteniendo el efecto requerido de barrera del sistema de revestimiento a largo plazo. Esta propiedad se considera, junto con la de adsorción, la mayor ventaja de usar minerales arcillosos como material de revestimiento, al contribuir a la reparación de deficiencias constructivas y posibles agrietamientos debidos al subsiguiente asentamiento del revestimiento. En cuanto a la selección del material, los resultados experimentales indican que los suelos arcillosos con expansión nula o ligera, como los caoliníticos o ílíticos, respectivamente, deben preferirse a los de mayor potencial de expansión, como los miembros altamente expansivos del grupo de la esmectita. Deben rechazarse los suelos con tendencia al colapso, como los limos o margas. Al usar en algunas pruebas soluciones salinas monovalentes y divalentes, las arcillas mostraron mejores propiedades de autosellado de lo esperado: la illita resultó más ventajosa que el caolín a este respecto, además de que es menos susceptible a la desecación y se expande sólo moderadamente. Cabe aclarar que el mineral aislado illita, como el que se utilizó en dichos experimentos, es excepcional y no se presenta en depósitos de arcilla naturales, en las cantidades y con el grado de pureza necesarios para la construcción de rellenos y revestimientos (August *et al.*, 1997).

No puede asegurarse un comportamiento satisfactorio a largo plazo de capas compactadas de arcilla cuando hay desecación, ciclos de congelamiento y deshielo, o excesivo asentamiento del material subyacente. Es conocida la vulnerabilidad de revestimientos de arcilla compactada a grandes incrementos en conductividad hidráulica por ciclos de congelamiento-deshielo, aun cuando las mezclas compactadas de suelo-bentonita pueden no ser tan vulnerables al daño. Parcialmente en respuesta a este tipo de problemas se han desarrollado los revestimientos de arcilla-geosintéticos (GCL), con el fin de utilizarlos como barreras de materiales elaborados básicamente en capas. De limitados datos de laboratorio disponibles, que indican que los revestimientos de geosintéticos no sufren incrementos de permeabilidad como resultado de ciclos de congelamiento-deshielo, los GCL parecen superiores en términos de resistencia a dichos ciclos; sin embargo, es necesaria información adicional en esta área (Koerner *et al.*, 1995).

### 2.2.2 Compatibilidad

La compatibilidad se refiere al efecto potencial en las propiedades del material por interacciones químicas del líquido permeante y el material poroso. Es necesario considerar las peores condiciones del fluido, así como las condiciones promedio.

Varios líquidos orgánicos insolubles en agua pueden causar contracción y agrietamiento de las arcillas, con el consecuente aumento en la permeabilidad. Los químicos orgánicos pueden tener efecto en la permeabilidad dependiendo de factores tales como su solubilidad en el agua, el valor de su constante dieléctrica, así como el de que la arcilla

esté expuesta a una solución diluida o pura del compuesto orgánico. Productos derivados de los hidrocarburos, así como soluciones de compuestos que tienen una baja solubilidad en el agua, pueden alterar la permeabilidad. Por otra parte, las soluciones diluidas de compuestos inorgánicos también pueden tener efectos significativos, como resultado de su influencia en la floculación y dispersión de partículas arcillosas (Evans, 1991 y Mitchell, 1993).

Recientes investigaciones indican que altas concentraciones de sales inorgánicas, solventes orgánicos y valores de *pH* extremos pueden alterar el comportamiento de los revestimientos de arcilla, y ocasionan drásticos incrementos en la permeabilidad o la falla del revestimiento. La clave para resolver las inconveniencias de los revestimientos recae en la comprensión de la química de las arcillas (Tobin y Wild, 1988).

La composición química del líquido de poro puede jugar un rol muy importante, no sólo en términos de la movilidad y migración del contaminante, sino también en la succión osmótica (Fredlund y Rahardjo, 1993). Por tanto, es posible que ocurran asentamientos o expansiones solamente por el cambio en la composición química del líquido de poro.

### 2.2.3 Atenuación

La atenuación se refiere a la reducción en la velocidad y/o magnitud de la migración de contaminantes debido a reacciones físicas, químicas y/o biológicas (Shackelford y Nelson, 1996). Los mecanismos de atenuación y sus efectos netos son los siguientes: la adsorción (inmovilización, si el cambio de *pH* no es alto), el intercambio catiónico y aniónico (inmovilización de los componentes, pero elusión de algunos otros elementos que causa variación en su concentración), la dilución (reducción de la concentración), la precipitación (inmovilización en la mayoría de los casos; los cambios de *pH* y *potencial redox* tienen efecto significativo), y la filtración (inmovilización) (Bagchi, 1989).

El principal objetivo de las medidas para impermeabilización es minimizar la migración de contaminantes. Esto está determinado por la impenetrabilidad y por la retardación de los contaminantes; sin embargo, no existe una valoración aceptada o principio de diseño para ello. Por ejemplo, en algunos estados de Alemania se usa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) como parámetro característico, estableciéndose empíricamente un valor de 10 miliequivalentes (meq) (August *et al*, 1997).

En comparación con los geosintéticos, los revestimientos con arcilla compactada presentan las siguientes ventajas: no sufren perforaciones, ofrecen mayor tiempo de contención, tienen gran capacidad de atenuación de los lixiviados y, aunque su costo es variable, generalmente es menor.

### 2.3 Pruebas de compatibilidad

Para determinar el diseño final de un revestimiento deben hacerse pruebas de compatibilidad específicas con los materiales propuestos como barreras y en condiciones representativas del sitio en el cual se construirá. Su propósito es determinar la posibilidad

de que el líquido almacenado cause un incremento en la permeabilidad del material utilizado como revestimiento. Se han hecho diversos estudios para determinar el efecto de diferentes soluciones químicas en laboratorio. Algunos resultados han sido contradictorios, postulándose varias razones para explicar resultados opuestos, incluyéndose procedimientos de prueba inapropiados. Sin embargo, debido al amplio intervalo de composiciones químicas y a los diferentes materiales potenciales para revestimientos, las pruebas de compatibilidad son un componente necesario para evaluar posibles materiales para revestimientos (Shackelford y De Mello, 1994).

Entre las pruebas para analizar la compatibilidad están los propios ensayos de permeabilidad; adicionalmente, en algunos casos pueden usarse pruebas modificadas de límites de Atterberg y del hidrómetro (sedimentación) para proporcionar una indicación relativamente rápida de un problema potencial de compatibilidad (Shackelford y De Mello, 1994). Asimismo, los análisis por medio de técnicas modernas, como la Difracción de Rayos X (DRX) y el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), son adecuados para examinar los cambios estructurales en los minerales arcillosos después del contacto con especies químicas que afectan su estructura (Mitchell, 1993; Koerner *et al.*, 1995).

### 2.3.1 Pruebas de permeabilidad

Estas pruebas tienen como propósito medir la permeabilidad del suelo al agua. Son las principales pruebas de laboratorio para evaluar la conveniencia de utilizar suelos arcillosos en la construcción de revestimientos en sitios de rellenos o almacenamientos superficiales para desechos peligrosos. De acuerdo con el valor obtenido puede juzgarse si el revestimiento de suelo arcilloso impedirá el movimiento de los lixiviados hacia los cuerpos de agua adyacentes a las instalaciones de disposición final (Craig, 1981).

Desde un punto de vista práctico, un incremento en la permeabilidad puede considerarse significativo si el valor final (flujo establecido) excede el máximo valor permitido. Una consideración adicional en la evaluación de la compatibilidad entre revestimientos de suelos y líquidos permeantes es la de un potencial efecto de primera exposición. Este efecto se refiere al del primer líquido al que se expone el suelo, ya sea por simple humedecimiento o por flujo. La conductividad hidráulica de un espécimen sometido directamente al líquido de prueba puede no resultar igual a la del mismo espécimen expuesto al agua antes que a la solución química. Esta tendencia es congruente con la expansión que produce una matriz del suelo densa en bentonitas expuestas inicialmente al agua, seguida por la floculación de la arcilla al interactuar después con una alta concentración de soluciones electrolíticas. Ya que es poco probable que el revestimiento arcilloso en el campo sea expuesto al flujo de agua antes que a las soluciones químicas, el efecto de primera exposición puede ser significativo en la práctica. Posiblemente, los procedimientos de prueba estándar son aceptables desde un punto de vista reglamentario, pero podrían ser extremadamente no conservadores de acuerdo con la situación en campo (Shackelford y Nelson, 1996).

Para evaluar la compatibilidad en laboratorio se utilizan permeámetros de pared rígida, entre los que se incluye el que emplea la celda de consolidación, y de pared flexible (celdas triaxiales). Estos equipos permiten simular ciertos comportamientos en campo a

largo plazo, aunque cada una tiene desventajas. El sistema de pared rígida puede sobreestimar la permeabilidad cuando la interacción química causa contracción y agrietamiento y, por tanto, excesivo flujo lateral; no obstante, es adecuado para una determinación cualitativa sobre la posibilidad de interacciones adversas. En el sistema de pared flexible la presión de confinamiento lateral previene la aparición de grietas, por lo que hay el riesgo de subestimar la permeabilidad en algunos suelos (Evans, 1991; Mitchell, 1993).

El *consolidómetro* (odómetro) permite probar arcillas en un intervalo de estados de esfuerzo de confinamiento representativos de los de campo, y determinar cuantitativamente los efectos de la interacción química en la estabilidad volumétrica y conductividad hidráulica; sin embargo, mediante este método se introduce gran variación del valor del coeficiente de permeabilidad, que además no se obtiene directamente, sino a través de un cálculo basado en la teoría de consolidación de Terzaghi; las diferencias entre la permeabilidad en campo y la medida en el consolidómetro se atribuyen a diferencias en cuanto al nivel de esfuerzos y gradiente hidráulico. En las predicciones deben considerarse dos aspectos: (1) elevado gradiente hidráulico en la muestra, y (2) flujo no representativo en la etapa de consolidación secundaria, atribuible a la viscosidad estructural del suelo y diferentes permeabilidades en los canales del suelo (Mitchell, 1993; Figueroa, 1996).

Las pruebas anteriores son la manera más directa de evaluar la compatibilidad química a largo plazo entre la muestra de suelo y los líquidos contaminados empleados para prehidratar y/o como permeantes. Sin embargo, en general, estas pruebas no proporcionan una indicación rápida de la compatibilidad, lo que sería deseable en cualquier prueba de laboratorio. Asimismo, a menos que se tomen precauciones especiales, el líquido a evaluar puede dañar el equipo.

El volumen adecuado para probar un suelo es función de un tamaño representativo, donde la relación entre la altura y el diámetro de la muestra es significativa (Daoud, 1996). Además, dicho volumen debe permitir que el material de prueba en el ensayo de laboratorio sea lo más semejante en características mecánicas al del prototipo y que, además, se vea sometido a equivalentes acciones externas, como esfuerzo aplicado o gradiente hidráulico de la situación real; se deben considerar efectos como el de pared y de escala (Marsal, 1969). De acuerdo con determinaciones de la conductividad hidráulica saturada de bentonitas es permisible aplicar gradientes hidráulicos mayores de 30 (hasta 200), pues se conserva una relación lineal entre la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico, de acuerdo con la ley de Darcy (Koerner *et al.*, 1995). Sin embargo, es importante especificar el espesor, sobre todo en otros suelos arcillosos, pues trabajar con una muestra delgada implica que la carga hidráulica en laboratorio sea mayor que la de campo, y que se puedan producir flujos turbulentos que aumenten o disminuyan la permeabilidad por lavado de finos, o por formación de una capa filtrante (Bowles, 1992).

Las pruebas de pérdida de fluido (*fluid loss*) han sido usadas por décadas en la industria de perforación de pozos como una prueba índice de los fluidos a base de bentonitas. Esta prueba consiste en la preparación de un lodo dentro de un aparato especial el cual es presurizado a 100 psi (7.03 kg/cm<sup>2</sup>). Conforme el fluido sale del lodo se forma una



pastilla o costra de concentrado filtrado (*filter cake*), y la cantidad de fluido recolectado en un cierto intervalo de tiempo se registra como la pérdida de fluido; mientras mayor sea su valor, menos adecuado será el comportamiento de la pasta filtrada que se forma cuando el sistema es presurizado. Esta prueba es sencilla y puede ejecutarse rápidamente y permite una mezcla intensa del líquido de prueba con la arcilla. No obstante, la habilidad de la arcilla para formar una pasta filtrada a partir del lodo no necesariamente representa su capacidad para funcionar como material de revestimiento. Por tanto, esta prueba no es representativa del comportamiento en campo y tampoco proporciona datos a largo plazo.

CETCO (1994b) desarrolló la prueba denominada filtro de presión de carga superior (*top loading filter press*), TLFP, que esencialmente es un híbrido entre una prueba de permeabilidad y la prueba de pérdida de fluido (fig. 2.5); a diferencia de ésta, el líquido filtrado es recolectado continuamente durante el desarrollo del experimento. Esta prueba reproduce mejor las condiciones de campo de los GCL, ya que la muestra es colocada previamente, en vez de ser el resultado de la formación de la pasta filtrada del lodo; una cierta porción de arcilla se coloca dentro de una celda de pared rígida y se prehidrata con el líquido de prueba; la celda se llena y sella para luego presurizarla a 100 psi. El volumen acumulado se grafica contra el tiempo y la línea resultante es la velocidad de filtración, lo que puede compararse con el resultado obtenido con agua pura para evaluar el impacto del líquido contaminante; sin embargo, con este procedimiento no se obtienen directamente valores de permeabilidad.

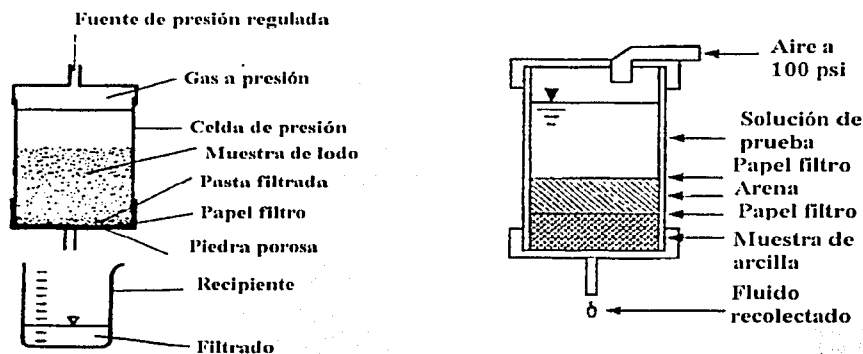


Fig. 2.5 Pruebas de pérdida de fluido (Evans, 1991; CETCO, 1994b)

### 2.3.2 Variación de propiedades índice

Además de la permeabilidad, otro parámetro importante para evaluar la conveniencia de utilizar cierta clase de suelos como material de revestimiento es la variación de la plasticidad de las muestras de suelo como resultado de la interacción con los líquidos permeantes, sobre todo en aquellas que presentan relativamente altos índices de

plasticidad. En dichos especímenes se han observado variaciones que dependen de las concentraciones de las soluciones y del tiempo de exposición de las muestras a las soluciones en cuestión. Si los cambios en las propiedades de plasticidad, compactación y contracción no son previstos, las consecuencias pueden ser negativas.

Muchas investigaciones se han realizado para estudiar el efecto de complejos iónicos de sales en las características físicas y de filtración de suelos salinos; éstas dependen de la cantidad y tipo de sales presentes en estado sólido y disueltas en el agua de poro, así como también de la capacidad de intercambio de bases y de los cationes intercambiados que determinan el grado de dispersión e hidratación de las partículas.

La desalación puede afectar la plasticidad del suelo en diferentes maneras debido al complejo mecanismo por el cual las sales influyen en el contenido de agua característico, que en muchos casos se incrementa. La lixiviación de las sales se acompaña de cambios en el complejo iónico de sales y, como consecuencia, en la dispersión y capacidad de retención de agua de la fracción fina del suelo. Como resultado final, estos factores influyen no solamente en la permeabilidad del suelo, sino en casi todas sus propiedades físicas (Petrukhin, 1993).

Generalmente, las propiedades plásticas de un suelo arcilloso serán muy diferentes dependiendo de cuál sea el catión de intercambio. Según la literatura, el índice de plasticidad es mayor para una bentonita sódica que para una cálcica (Grim, 1962). Asimismo, se dice que entre diversos suelos estudiados, aquellos saturados de sodio presentan comúnmente el índice de plasticidad más alto (Baver *et al*, 1980). En estudios de estabilización de suelos se ha investigado el efecto que sobre los límites ejercen diversas sustancias adicionales, encontrándose que las que más los afectan son las de base sódica, que por lo regular los aumentan considerablemente; sin embargo, la sal común (NaCl) produce frecuentemente disminución del límite líquido. Los cloruros también afectan la plasticidad de los suelos al reducir los límites plástico y líquido (Winterkorn y Pamukcu, 1991).

El contenido de agua en el límite plástico, LP, depende de la cantidad y naturaleza del material coloidal presente; el suelo está en un estado no saturado y la orientación de las partículas y su deslizamiento ocurren en ese punto, siendo la cohesión máxima un poco por encima de dicho valor. El límite líquido, LL, depende del número de películas de agua adsorbidas por las partículas, y es la humedad en la que éstas se unen para llenar la mayor parte de los espacios porosos, la tensión disminuye y la cohesión es mínima. El índice de plasticidad es una medida indirecta de la fuerza necesaria para moldear al suelo, depende del número de películas de agua y representa la cantidad de agua añadida para pasar del valor de tensión máxima hasta aquél donde ocurre el flujo; esto significa que debe haber una relación directa entre el IP y el LL (Baver *et al*, 1980).

Las energías de valencia y de hidratación de los cationes intercambiables afectan la cantidad de agua adsorbida por las partículas de arcilla. Sus efectos son distintos según se trate de arcillas con retículo dilatado o con estructura cristalina más rígida; en el primer caso los iones de Li y Na causan notable hinchazón osmótica y mayor dispersión del sistema. En la montmorilonita sódica, entre más agua esté captada entre las capas, más cantidad de ésta se necesita para aumentar el espesor de la película de acción lubricante.

El efecto represivo del ion K en los límites de Atterberg de la montmorillonita se explican porque su tamaño causa una baja energía de hidratación y además es un estorbo para el arreglo ordenado de moléculas de agua. Los iones K se fijan en las capas internas cuando las arcillas se secan, de lo que resulta una estructura de tipo íltico que aminora la adsorción de agua del mineral de arcilla (Baver *et al.* 1980).

Durante el estudio del subsuelo de la ciudad de México se prestó especial atención a las posibles variables que podían influir en los límites de Atterberg de las arcillas, entre ellas su respectiva composición química. Variaciones significativas en estas propiedades promovieron estudios especiales; sin embargo, ninguno de ellos estuvo ligado a la química del agua intersticial. La presencia de sales disueltas provocó un corrimiento de los puntos hacia la izquierda de la carta de plasticidad y abajo de la línea A de Casagrande. Este efecto aumentó con la concentración salina y el límite líquido, y fueron particularmente importantes en suelos con una humedad y concentración salina mayor de 100 y 10%, respectivamente (Marsal y Graue, 1969).

Con el objeto de explicar las variaciones de los límites de plasticidad se propusieron expresiones simples que consideraran el efecto de la presencia de sales disueltas en el agua intersticial, y mediante las cuales fuera posible determinar el contenido de agua del suelo ( $w$ ) y, particularmente, su valor correspondiente al límite líquido (LL) y plástico (LP), así como el respectivo índice de plasticidad (IP); a continuación, se presentan algunas de las expresiones propuestas (Marsal y Graue, 1969), y otras que resultan de su manipulación, donde la concentración de sales y los contenidos de agua se expresan como fracción decimal:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.3.1)$$

$$W_d = cW_w \quad (2.3.2)$$

$$c = \frac{W_d}{W_d + W_w} \quad (2.3.3)$$

$$W_d = \frac{cW_w}{(1-c)}, \text{ para } c < 1; \quad (2.3.4)$$

$$\text{y } W_w = 0, \text{ para } c = 1$$

$$IP' = \frac{IP}{(1+cLL)(1+cLP)} \quad (2.3.5)$$

$$\omega' = \frac{\omega}{1+c\omega} \quad (2.3.6)$$

$$\omega'' = \frac{\omega'}{1+(c''-c')\omega'} \quad (2.3.7)$$

$$\omega' = \frac{\omega''}{1-(c''-c')\omega''} \quad (2.3.8)$$

$$\Delta c = c'' - c' = \frac{1}{\omega''} - \frac{1}{\omega'} \quad (2.3.9)$$

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

donde:

$W_w$  = peso del agua

$W_s$  = peso de sólidos

$c$  = concentración, en peso

$\Delta c$  = diferencia entre dos concentraciones  $c''$  y  $c'$

$W_d$  = cantidad de sales disueltas

$I$  = contenido de agua del suelo; puede sustituirse por  $LL$  o  $LP$

Los símbolos tildados se emplean para aquellas propiedades afectadas por la existencia de sales disueltas; cuando es necesario correlacionar los contenidos de agua de un mismo suelo con dos concentraciones,  $c'$  y  $c''$ , la ecuación 2.3.3 se convierte en la 2.3.7. En las ecuaciones 2.3.6 a 2.3.9, el contenido de agua del suelo,  $I$ , puede sustituirse por el correspondiente al  $LL$  o  $LP$ , con lo que se obtienen  $LL'$  y  $LP'$ , respectivamente, el correspondiente  $\Delta c$ , así como  $IP'$  (2.3.5); asimismo, las ecuaciones 2.3.8 y 2.3.9, derivadas de la 2.3.7, se podrían aplicar para que, con los datos necesarios, se obtuvieran el contenido de agua de la muestra con menor o nula concentración de sal, y el incremento de ésta, respectivamente. Cabe mencionar que, de acuerdo con la definición de concentración en peso (ecuación 2.3.3), la ecuación 2.3.2 es una simplificación de la 2.3.4; cada compuesto tiene cierto valor de solubilidad a una temperatura dada, menor de  $c = 1$ , por arriba del cual se tendrá una solución sobresaturada y el soluto cristalizará.

Se estableció que el secado de las muestras puede provocar el aumento de la concentración de sales y su cristalización, lo que a su vez favorece la asociación de partículas sólidas en grupos y la transformación de la estructura original de la arcilla en una más granular. En cambio, los gradientes hidráulicos generados por la consolidación provocan el arrastre de los iones disueltos en el agua intersticial, lo que reduce la concentración salina. Por tanto, la concentración de sales disueltas en el agua intersticial es una variable a considerar al correlacionar propiedades índice y explicar el comportamiento plástico cuando una arcilla se deshidrata más allá de su límite plástico por secado progresivo, o como consecuencia de la consolidación (Marsal y Graue, 1969).

Los resultados del programa de pruebas de laboratorio (Ho y Pufahl, 1987) realizadas en dos muestras de arcilla inorgánica, indicaron que la contaminación con salmueras de NaCl produjo en las muestras una disminución en el límite líquido, y un ligero incremento en el límite plástico al incrementar la concentración de la salmuera; estos efectos se incrementan al aumentar la concentración de la salmuera y el contenido de arcilla. Según estudios de soluciones y suspensiones de estos suelos, los cationes adsorbidos en las dobles capas de las partículas arcillosas contaminadas con salmueras no pueden ser fácilmente removidos mediante lavados repetidos de la muestra con agua destilada.

Una vez examinados el comportamiento de plasticidad y de resistencia al corte de bentonitas con diferentes contra iones. Al aumentar la valencia de los iones disminuye el índice de plasticidad; al mismo tiempo se incrementa la resistencia al corte para un esfuerzo efectivo normal constante de 0.1 MPa. Mientras que el límite líquido disminuye

al aumentar la valencia de los cationes el límite plástico se incrementa. La explicación para la disminución del límite líquido es que los cationes con carga alta mantienen más unidas a las láminas elementales con carga negativa, por lo que la capacidad de adsorción de agua disminuye con el aumento de la valencia de los cationes. Una posible explicación del incremento del límite plástico al aumentar la valencia de los cationes es la creciente formación de una estructura floculenta, en la que hay más espacio para el agua intersticial que en una estructura dispersa, que es la correspondiente a la montmorilonita sódica (Koerner *et al*, 1995).

Con base en una investigación experimental sobre los efectos de los electrólitos en propiedades índice de los suelos, se concluyó que para altas concentraciones de electrólitos (> 1 N) el tipo de catión juega un papel marginal (con excepción de aquellos que se adsorben específicamente), mientras que el rol del anión es significativo; también se encontró que los cloruros inducen agregación en vez de floculación. Asimismo, se reporta que los efectos de los electrólitos son mayores en suelos con montmorilonita respecto de los que contienen caolinita (Sivapullaiah *et al*, 1996).

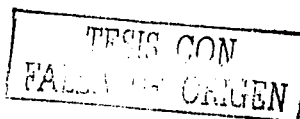
En una investigación sobre la impermeabilización de estanques solares mediante revestimientos de arcilla compactada, se compararon los índices de plasticidad reportados para una bentonita cálcica del estado de Nuevo León y otro suelo arcilloso nativo que también contiene montmorilonita, procedente de Zamora, Michoacán, con los obtenidos después de que ambas muestras fueron sometidas a un flujo con salmuera caliente de NaCl en altas concentraciones (Almanza *et al*, 1990 y 1993). Ambas muestras presentaron una gran sensibilidad a aumentar en forma brusca e inmediata su permeabilidad; este último fenómeno, no obstante, es reversible al permear la muestra compactada nuevamente con agua destilada. En la tabla 2.2 se compararon los índices de plasticidad originalmente reportados en investigaciones anteriores para la bentonita cálcica y el suelo arcilloso de Zamora (etapa N.º1), con los obtenidos después de que ambas muestras fueron sometidas en un dispositivo de laboratorio a un flujo con salmuera de NaCl en altas concentraciones (etapa N.º2), así como con los que se determinaron luego de extraer una muestra y lavarla directamente con agua destilada para eliminar el exceso de sales, verificando el contenido de sal de la solución mediante un salinómetro (etapa N.º3).

Tabla 2.2 Variación de propiedades índice

Muestra y tiempo de exposición	N.º de etapa	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Bentonita Ca**	1	189.0	36.1	152.9
NaCl 80%*	2	81.6	37.0	44.6
(4 meses)	3	297.3	35.1	262.2
Zamora	1	76.6	37.1	39.5
NaCl 65%* (17 días)	2	106.5	32.3	74.2
NaCl 85%* (19 días); agua (5 meses)	3	105.0	30.2	74.8
Caolinita NaCl 100%* (7 meses)	1	69.9	32.8	37.1
	2	60.0	32.9	27.1

\* Porcentaje respecto a la saturación

\*\* Muestra analizada por DRX (cap. 6)



En la bentonita cálcica se observa una disminución del índice de plasticidad entre la primera y segunda etapas, diferencia que cambia después de eliminar el exceso de sal en la tercera etapa. Por el contrario, en la arcilla de Zamora se presenta un incremento en el índice de plasticidad entre la primera y segunda etapa, el cual se conserva en la tercer etapa, esto debido a que durante la segunda etapa la muestra tuvo un lavado prolongado. En la tabla se incluyen datos de las primeras dos etapas de una muestra compactada de caolinita, probada en condiciones similares a las anteriores; Estas variaciones podrían ser función de un cierto valor umbral de concentración, específico para cada muestra (Almanza *et al*, 1989).

### 2.3.3 Pruebas fisicoquímicas y técnicas analíticas modernas

Por lo que respecta a la prueba de sedimentación (hidrómetro) mencionada anteriormente, este tipo de ensaye, entre otros que también consideran las fuerzas de superficie de las partículas en suspensión y su interacción con la solución, pueden ser muy útiles para estimar la estabilidad coloidal en suelos arcillosos, lo que encuentra una aplicación importante al evaluar el riesgo por erosión interna, por ejemplo, en el caso particular de barreras arcillosas con infiltración vertical. La dispersión de arcillas en la parte inferior del revestimiento puede facilitar su posterior y progresiva migración ascendente por fuerzas de filtración, a través de conductos o huecos entre partículas, hasta encontrar salida dentro del almacenamiento (Sherard y Decker, 1977; Goldman y Greenfield, 1988).

Otra prueba de compatibilidad, empleada especialmente en bentonitas, es la prueba de expansión libre, la cual es extremadamente sencilla y proporciona resultados visibles y rápidos; asimismo, existe una relación entre la expansión libre y el LL (Sivapullaiah *et al*, 1996). Sin embargo, hay poca correlación con el comportamiento en campo y a largo plazo. Por otro lado, la determinación de la capacidad de intercambio catiónico proporciona información sobre el grado de interacción de la arcilla con el líquido de prueba, pero no es representativa del comportamiento en campo, además de ser relativamente costosa con ciertos métodos.

Una de las características más aparentes de un perfil del suelo es su patrón de color. Aun cuando los colores tienen escasa o ninguna significación directa, es mucho lo que puede inferirse de ellos si son descritos cabalmente. Por ejemplo, el contenido de materia orgánica se denuncia por lo oscuro de la superficie del suelo en las zonas templadas; en el caso de los trópicos, el humus no da color al suelo (Bornemisza, 1982). Asimismo, un subsuelo de color brillante indica buen drenaje, mientras que colores opacos indican un drenaje pobre. Cuando el drenaje permite la aeración y las condiciones de humedad y temperatura son favorables para la actividad química, el hierro de los minerales del suelo se oxida e hidrata formando compuestos amarillos y rojos; pero al reducirse la hidratación los colores rojos (óxido de hierro libre) sustituyen a los amarillos. Los suelos sódicos y salino-sódicos en ocasiones son oscuros por la acumulación de carbonatos y bicarbonatos de sodio, que a su vez causan la disolución de la materia orgánica por el álcali, lo que da el color oscuro a la costra salina que se encuentra en el suelo; este mineral se acumula y forma la trona (álcali negro). Los suelos salinos se les conoce como álcali blanco

(Aguilera, 1989). Por tanto, el cambio de color de un suelo podría ser útil para determinar la influencia del medio que lo rodea.

Cabe recordar que una correcta identificación y cuantificación de los componentes minerales cristalinos y amorfos puede ayudar en la predicción de la susceptibilidad de ciertos materiales a sufrir disolución química o precipitación al ser expuestos a ambientes de composición, pH y temperatura críticos, así como para tener una idea aproximada del grado de agregación de las partículas de suelo por la presencia de agentes cementantes (Cordero, 1997). Es por ello que los métodos para determinar la composición del suelo y su potencial alteración, entre los que se mencionan el análisis por medio de difracción de rayos X a través de sus diversas técnicas y los estudios de microscopía electrónica, son un recurso más para examinar la compatibilidad.

#### *2.4 Aplicaciones en campo*

Como antecedente del efecto de temperatura sobre la permeabilidad de suelos compactados se informa que, con el fin de encontrar una técnica económica de impermeabilización para ser usada en fosas para almacenar agua caliente, un grupo de ingenieros daneses determinaron incrementos hasta de dos órdenes de magnitud en el coeficiente de permeabilidad de dos suelos arcillosos locales, clasificando a uno de ellos como una tilita (suelo con probable contenido de mica, entre otros minerales arcillosos), al elevar la temperatura de 20 a 90°C (Duer y Svendsen, 1993). Cabe mencionar, sin embargo, que no se aclara la metodología empleada para determinar los valores de permeabilidad reportados.

Al evaluar la peligrosidad de los residuos mineros se menciona que, entre los elementos potencialmente tóxicos, se encuentran los metales representativos, como el sodio, que forman sales solubles, las cuales alteran la calidad de cuerpos de agua y al suelo. Los elementos de transición como el plomo, cadmio y plata, son más fáciles de inmovilizar que los elementos no metálicos como el azufre o selenio, o los elementos de frontera como el arsénico. En poco tiempo se le dará más importancia al impacto de la minería por la dispersión del carbono, como CO<sub>2</sub>, y del azufre, como SO<sub>x</sub>, así como a la afectación de los suelos con sodio, que a la dispersión de metales pesados (Gutiérrez *et al.* 2001).

La industria petrolera representa uno de los mayores riesgos potenciales de afectación al ambiente. El crudo extraído generalmente lleva agua y sales solubles en agua en cantidades considerables, por lo que antes de enviarlo de las zonas de producción hacia las refinerías, el crudo es deshidratado para lograr reducir los costos de bombeo a largas distancias. Esta operación se da en las plantas deshidratadoras, que en México se encuentran en zonas costeras de Tabasco. En las plantas de deshidratación se cuenta con fosas separadoras de agua-hidrocarburos, algunas de las cuales se construyeron con material arcilloso de baja permeabilidad en fondos y paredes, pero que por efecto de una combinación de las sales y la contractibilidad de las arcillas al secarse, se han provocado infiltraciones de aguas salobres hacia el subsuelo con los daños potenciales a los cultivos y a los ecosistemas del suelo, pantanos y sistemas acuáticos que interactúan con éstos

(Pulido *et al*, 2000). Asimismo, en el oeste de Canadá, por ejemplo, dos de las mayores fuentes de contaminación de salmuera del agua subterránea y suelo son el resultado de los lixiviados de los residuos de potasa ( $K_2CO_3$ ) y de las filtraciones de los estanques de salmuera de la industria de la potasa y del petróleo. La salmuera involucrada en estas industrias esencialmente está saturada con cloruro de sodio (Ho y Pufahl, 1987).

Tres estanques solares que utilizan revestimientos de arcilla han sido reportados hasta ahora, uno pequeño en Israel (Tabor y Doron, 1987), otro en la India (Motiani *et al*, 1990), y el tercero en EUA (Robbins *et al*, 1995). A la fecha no se cuenta con información publicada de su comportamiento durante largos periodos.

Un estanque de 6 250 m<sup>2</sup> se revistió con EPDM, de aproximadamente 1.5 mm de espesor, el cual tiene gran resistencia al calor, la sal y los rayos UV (después de siete años todavía parecía estar en buenas condiciones) (Tabor y Doron, 1987). Por otro lado, como parte de una investigación de una técnica económica de impermeabilización para usarse en un almacenamiento de calor estacional por medio de una fosa de agua caliente de aproximadamente 1 500 m<sup>3</sup>, se probó una técnica de revestimiento de arcilla híbrida en dos etapas: una capa espesa de arcilla y un sello secundario de revestimiento sintético delgado, ya sea con una membrana plástica como el polietileno (PE), o elastomérica (EPDM), en función de la estabilidad lateral al deslizamiento (Duer y Svendsen, 1993). Asimismo, un método de bajo costo para revestimientos de estanques consistió en utilizar plásticos baratos, como el polietileno (PE), en forma de emparedado con suelos arcillosos. Este método se probó en un estanque de 40 000 m<sup>2</sup> con buen resultado después de algunas modificaciones. La utilidad neta fue la posibilidad de construir estanques con un costo hasta tres veces menor que con membranas sintéticas (Tabor y Doron, 1987).

La primera aplicación de un GCL en un estanque solar se realizó en la Universidad de Texas en El Paso (Robbins *et al*, 1995). Originalmente se había instalado como impermeabilizante una membrana plástica, consistente en una tela de poliéster recubierta con PVC con una masa por unidad de área de 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, como parte principal de un sistema de revestimiento doble, en el que el confinamiento secundario estaba formado por una membrana ya existente de hypalon (resina de polietileno clorosulfonado, CSPE). Una exhaustiva investigación demostró que la falla del revestimiento fue amplia y muy prematura respecto del tiempo de vida estimado. La pérdida de elasticidad fue probablemente el factor individual más importante en la falla final; se estima que dicho factor se debió a los efectos de las altas temperaturas, salmueras y bajo pH a los que estuvo expuesto el revestimiento en el estanque solar.

El costo y facilidad de instalación fueron los principales factores en la decisión para diseñar un nuevo sistema de revestimiento empleando un GCL. De los comúnmente disponibles en el mercado, se seleccionó uno consistente en una capa de bentonita pegada a una membrana de polipropileno de 0.075 cm, con el fin de proporcionar resistencia a las altas temperaturas experimentadas en el fondo del estanque. El proceso de hidratación es crítico para la eficiencia del revestimiento, por lo que la bentonita se sometió a una prehidratación con agua dulce antes de interactuar con la solución saturada de NaCl, para lograr la expansión de la arcilla y el sellado de las uniones. El estanque completo fue cubierto con una membrana sellada de polipropileno de 0.075 cm, la cual ofrecía un



confinamiento secundario y formaba la base del dispositivo experimental. El sistema de revestimiento primario consistió en el GCL para el fondo del estanque y un revestimiento de polipropileno de 0.1 cm para los lados del mismo, en sustitución del GCL, el cual no puede emplearse lateralmente debido a que la capa de bentonita hidratada no soporta esfuerzos cortantes para un ángulo mayor de 15°, correspondiente al determinado para las pendientes laterales. Desgraciadamente, el GCL sólo se probó durante dos años, hasta que se presentó una falla en la membrana de polipropileno de 0.1 cm situada en los bordes laterales del estanque, por arriba del nivel del agua, producida por un deterioro del material por exposición a los rayos UV, atribuido a un defecto de fabricación. Dicho material, así como el GCL, se sustituyó por una nueva membrana mejorada de polipropileno de 0.15 cm cuyas juntas están soldadas, y con ésta se cubrió el estanque entero; esta barrera sigue funcionando bien hasta la fecha (Huanmin Lu, Universidad de Texas, en El Paso, 2002, comunicación personal).

El lago Nabor Carrillo es el mayor de los cinco lagos artificiales existentes dentro de la zona federal del vaso del exlago de Texcoco, al noreste de la ciudad de México, que opera el proyecto del mismo nombre y que fueron construidos para la regulación de las aguas pluviales, y el almacenamiento de éstas y de aguas residuales tratadas. Con el fin de reforzar el bordo perimetral de dicho lago, y evitar la socavación debida al oleaje y a la migración de filtros, se propuso utilizar geotextiles, bajoalfombras y tela para cobertores. El agua del subsuelo de Texcoco tiene altas concentraciones de sales alcalinas (hasta 44 000 mg/L y pH = 11), principalmente carbonatos y bicarbonatos de sodio, así como cloruro de sodio. Las aguas que almacenaría el lago Nabor Carrillo serían producidas por una planta de tratamiento en proceso de construcción en esa época. Por lo anterior, se realizaron ensayos de intemperismo acelerado, durante 10 h a 93°C, sometiendo muestras de textiles tanto a aguas saladas de pozos someros como a aguas negras (aguas salinas y residuales que existen en la región). Aun cuando las pruebas de intemperismo no fueron convencionales, sí reflejaron la estabilidad del material y la calidad de su proceso de fabricación, lo que permitió verificar la resistencia de los textiles a los tipos de agua a los que éstos estarían sometidos. Los materiales ensayados comprendieron textiles no tejidos disponibles en México, elaborados a base de poliéster y polipropileno, principalmente del tipo punzonado. El producto seleccionado para control de erosión consistió en un geotextil de polipropileno, mientras que para el drenaje se escogió un geotextil de poliéster. Estos materiales demostraron un buen comportamiento físico y durabilidad, al ser sometidos a aguas residuales tratadas durante 9 años en el lago Nabor Carrillo, por lo que se considera que esta experiencia es aplicable a otras obras hidráulicas (Morales, 1990; Murillo, 1990).

La solución final adoptada para la impermeabilización de una laguna de cristalización en el campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C., consistió en un revestimiento arcilloso de 40 cm de espesor protegido mecánicamente contra la desecación mediante una capa de sal de 50 cm de espesor que se forma progresivamente en el fondo de los estanques. En este caso práctico se confirmó la efectividad para almacenar salmueras de alta concentración por medio de revestimientos de arcilla compactada (Auvinet y Esquivel, 1986).

## *2.5 Resumen y conclusiones*

Existen varias barreras impermeables. La efectividad completa de una barrera para prevenir flujo y difusión depende de su permeabilidad y espesor. La permisividad es una medida útil de la efectividad relativa de diferentes sistemas. Hay en la literatura diversas clasificaciones de los materiales para revestimiento, las arcillas entre ellos, como componente principal o parte del sistema. En términos de materiales para revestimiento se distingue entre revestimientos minerales y revestimientos artificiales. Los suelos compactados se ubican entre los revestimientos flexibles.

Las sales solubles se encuentran entre los principales contaminantes que alteran la calidad de cuerpos de agua y al suelo; por ello, se debe estudiar el efecto de las sales disueltas y en estado sólido en las propiedades índice y mecánicas de los suelos arcillosos. El diseño geotécnico y la construcción de revestimientos minerales eficientes para estanques solares y otros sistemas que almacenan soluciones salinas, donde además la temperatura puede incrementarse, implica el análisis de aspectos como control de filtraciones, transporte de sales hacia el subsuelo y aislamiento térmico.

Los revestimientos deben cumplir principalmente con tres condiciones: 1) tener una conductividad hidráulica (permeabilidad) relativamente baja; 2) ser compatibles con el líquido almacenado; y 3) tener capacidad de atenuación relativamente alta.

El uso de revestimientos de arcilla puede ser una opción más económica y factible si la arcilla está disponible en los alrededores. Aunque tiene ventajas, como la atenuación de los contaminantes, deben realizarse pruebas y análisis para determinar su posible comportamiento en campo. Para ello se recurre a las pruebas de compatibilidad, de las que ya existen varios tipos, pero que es un área donde se pueden proponer mejoras e innovaciones para analizar suelos arcillosos con alta y baja capacidad de expansión.

La permeabilidad es la principal prueba de compatibilidad, donde también es importante considerar el efecto de primera exposición, la estructura y el grado de saturación de la muestra. La mayor parte de las pruebas de compatibilidad consideran el evidente cambio de volumen, así como de plasticidad; generalmente, para el diseño, calibración y práctica de estos ensayos se eligen bentonitas. En la literatura se encuentra una abundante base de datos, pero no siempre se especifican las condiciones de prueba, de tal manera que aparentemente existen resultados contradictorios. Se necesita regular este tipo de ensayos, incluida la preparación de las muestras. Asimismo, es importante tomar en cuenta el efecto que podría tener la temperatura y el tiempo en los resultados de pruebas de compatibilidad. Las técnicas analíticas modernas para determinar la composición del suelo, así como su potencial alteración, entre las que se mencionan el análisis por microscopio electrónico y la difracción de rayos X a través de sus diversas técnicas, son un recurso más para examinar la compatibilidad.

Finalmente, en esta sección se comentan resultados obtenidos en laboratorio y en campo, relativos a la interacción y comportamiento del suelo, ya sea compactado o formando parte de un geosintético, ante gradientes químicos y de temperatura. La mayoría de esta información requiere de un seguimiento continuo, puesto que el tiempo es un factor importante.

### 3 SISTEMA COLOIDAL SUELO-SOLUCIÓN

“Porque eso me da que un ave esté asida a un hilo delgado que a un grueso, porque, aunque sea delgado, tan asida se estará a él como al grueso, en tanto que no lo quebrare para volar.”

San Juan de la Cruz: *Subida del Monte Carmelo*

#### 3.1 Las soluciones

Cuando una sustancia, un líquido en este caso, contiene a otra, distribuida en su seno en forma de partículas muy pequeñas, forma un *sistema disperso* o, simplemente, una dispersión. Las propiedades de los sistemas dispersos y, en primer lugar, su estabilidad, dependen mucho del tamaño de las partículas de la sustancia dispersa. Si éstas son muy grandes comparadas con las moléculas, el sistema disperso es inestable y la sustancia dispersa se deposita con rapidez (o sobrenada si su densidad es menor que la del medio). Estas dispersiones inestables, cuyas partículas en suspensión son relativamente grandes se llaman *suspensiones*.

Las *soluciones moleculares*, también conocidas como verdaderas, son unos sistemas en que la sustancia dispersa se encuentra en forma de moléculas aisladas que se hallan íntimamente mezcladas con las que constituyen el medio de dispersión; en ello radica su homogeneidad y el que el sistema sea perfectamente estable todo el tiempo.

Existen también las soluciones coloidales, *soles*, en las cuales el tamaño de las partículas está comprendido entre los dos extremos, el de una suspensión y el de una solución verdadera; cuando menos una de sus dimensiones está aproximadamente en el intervalo de 1 a 1000 nm. Los *coloides* son partículas cuyo comportamiento está regido por fuerzas intermoleculares. Las partículas coloidales, análogamente a las moléculas de las soluciones verdaderas, se encuentran en continuo y caótico movimiento vibratorio, *movimiento browniano*, proporcional a la temperatura del sistema y cuya intensidad es suficiente para contrarrestar las fuerzas de gravedad, lo que les permite no separarse espontáneamente del medio en el que están distribuidas.

Una *especie química* es cualquier entidad, partícula elemental o molécula, definida por una composición fija. Una misma especie puede variar de tipo de solución y sistema coloidal; por ejemplo, el silicio se presenta en cada etapa intermedia de una transición gradual entre la solubilidad molecular (ácido silíceo), coloide disperso homogéneamente (hidrosol), gel no rígido (hidrogel) y gel rígido (xerogel) (Page, 1982).

### 3.1.1 Fuerzas entre partículas

Todos los líquidos y sólidos terminan en una superficie, o frontera de fase, tras de la cual hay materia de otra composición o estado. Las fuerzas intermoleculares de atracción son fuerzas de corto alcance, que operan entre las partículas que constituyen las unidades de una sustancia líquida o sólida. Se denominan como *cohesivas* a las fuerzas atractivas entre moléculas semejantes, mientras que las *fuerzas adhesivas* unen moléculas distintas, como ocurre entre una sustancia y una superficie.

En los sólidos, los átomos están enlazados en una estructura tridimensional, en cuya superficie se producen campos de fuerzas no satisfechas, las cuales pueden ser balanceadas por: 1) atracción y adsorción de moléculas de la fase adyacente; 2) cohesión con la superficie de otra masa de la misma sustancia, y 3) ajuste interior del estado sólido de la estructura (Mitchell, 1993).

En general, la *adsorción* es el fenómeno por el cual una sustancia se adhiere a la superficie de otra por un cierto periodo; difiere de la *absorción*, que significa paso al interior, y de la *precipitación*, que incluye el desarrollo de una estructura molecular tridimensional (Sposito, 1989). Los fenómenos de absorción y adsorción pueden producirse simultáneamente, o puede haber dificultad para distinguirlos; en este caso, en inglés se engloban bajo el único apelativo de *sorption*, del latín *sorbere* (Salvat, 1979). La adsorción es la acumulación neta de materia en una interfase. La materia acumulada y la superficie sobre la que aquella lo hace se denominan, respectivamente, *adsorbato* y *adsorbente*; una molécula o ion que potencialmente puede ser adsorbido se denomina *adsortivo*.

La intensidad de las fuerzas intermoleculares de las diferentes sustancias varía dentro de un amplio margen. No obstante, generalmente son mucho más débiles que los enlaces iónicos o covalentes. Las fuerzas intermoleculares son de procedencia eléctrica y pueden manifestarse en distintas formas, siendo la más sencilla de ellas la determinada por la ley fundamental de la electrostática; tales fuerzas, llamadas *coulombianas*, tienen importancia primordial en la interacción de los iones, pero entre moléculas neutras no pueden existir.

#### 3.1.1.1 Fuerzas intermoleculares

Se conocen dos tipos de fuerzas de atracción entre las moléculas neutras: fuerzas de Van der Waals y *puentes de hidrógeno*. Estas fuerzas intermoleculares se distinguen de las coulombianas por su unicidad (solamente se manifiestan en la atracción). Cada una de estas fuerzas es de naturaleza *electrostática* (influencias recíprocas entre cargas y cuerpos cargados eléctricamente), e implica la atracción de especies positivas y negativas.

Las fuerzas de Van der Waals son predominantemente de naturaleza electrostática y provienen de interacciones de dipolos de moléculas (fuerzas dipolo-dipolo), o de fuerzas de atracción producidas por dipolos permanentes que pueden inducir dipolos en moléculas no polares adyacentes, o por oscilaciones de cargas internas en moléculas sin momento dipolo mensurable (fuerzas de dispersión de London). Son fuerzas de acción a muy corta distancia y disminuyen proporcionalmente a la 7.<sup>a</sup> potencia de la distancia. Estas fuerzas son las responsables de la aglomeración de átomos o moléculas en los

estados de agregación líquida o sólida, y juegan un papel significativo en la unión de minerales de arcilla y en la estructura del agua líquida.

Además del efecto de dipolo, las fuerzas de Van der Waals pueden tener también carácter multipolar y son aditivas. Así, la atracción total entre dos partículas que contienen un gran número de átomos, por ejemplo dos partículas de arcilla, es igual a la suma de las fuerzas atractivas de todos los átomos en ambas partículas, por lo que resultan fuerzas que no son tan pequeñas. Además, en las partículas grandes la disminución de las fuerzas con la distancia no es tan considerable como a escala atómica.

El puente de hidrógeno es un tipo especial de atracción intermolecular que existe entre el átomo de hidrógeno de un enlace polar (sobre todo un H-F, H-O o H-N) y un par de electrones no compartido en un átomo electronegativo (F, O, N) de una molécula vecina. Los puentes de hidrógeno se pueden considerar como un tipo específico de atracción dipolo-dipolo que tiene algún grado de covalencia, por lo que son más débiles que los enlaces químicos ordinarios, pero más fuertes que los producidos por fuerzas de Van der Waals.

Existen fuerzas intermoleculares entre un ion y una molécula polar neutra que posee un momento dipolar permanente. Las fuerzas ion-dipolo tienen importancia en las soluciones de sustancias iónicas en líquidos polares; por ejemplo, una solución de NaCl en agua. Los iones de cierta carga son atraídos al extremo de carga opuesta de un dipolo. Generalmente son más fuertes que las fuerzas dipolo-dipolo.

### 3.1.1.2 Tensoactivos

Los *tensoactivos* o *surfactantes*, del inglés *surface-active agent* y *surfactant*, respectivamente, son sustancias que ejercen un marcado efecto en el comportamiento de superficie de un sistema, produciendo cambios en la energía superficial de líquidos o sólidos, habilidad que está asociada con su tendencia a migrar a las interfaces. Son compuestos generalmente solubles que reducen la tensión superficial de líquidos, de la interfase de dos líquidos, o de un líquido y un sólido. En contraste con sustancias que disminuyen la energía superficial de un líquido, otros solutos como las sales inorgánicas, ácidos y bases, al aumentar de concentración pueden incrementar la tensión superficial, pero su efecto es comparativamente menor que los que la hacen disminuir, por lo que con el fin de establecer cierta diferencia, a unos y otros se les llega a denominar solutos inactivos de superficie y agentes activos de superficie, respectivamente.

En general, los tensoactivos se clasifican en tres grupos: aniónicos, catiónicos y no iónicos. A este último tipo corresponden sustancias que tienen grupos de polaridad variable, de lo que resulta que una parte de sus moléculas sea *liófila* (polar o grupo iónico) y otra *liófoba*, es decir, que acepte o rechace moléculas de la fase líquida, respectivamente, y en esta última clase se incluyen ciertas sustancias coloidales como las arcillas. El grupo de polaridad variable muestra disposición a acumularse en las interfaces debido a una preferencia energética y de entropía, así como tendencia a la propia asociación de coloides y formación de micelas de tensoactivos por medio del denominado enlace hidrófobo.

### 3.1.2 Soluciones acuosas inorgánicas

Una *solución* se puede definir como una dispersión homogénea de dos o más sustancias entre sí. Aquellas cuyo medio dispersante es un líquido se denominan acuosas. La sustancia disuelta se llama *soluto*, y *disolvente* el medio en el que se disuelve. Una solución saturada contiene la cantidad máxima posible de sustancia disuelta. La *solubilidad* de una sustancia a una temperatura dada es la concentración del soluto en el disolvente en una solución saturada. Las soluciones *insaturadas* y *sobresaturadas* son, respectivamente, aquellas donde se disuelve menor o mayor cantidad de soluto que la necesaria para formar una solución saturada. Algunas veces se pueden preparar soluciones sobresaturadas por saturación de una solución a una temperatura elevada, que luego se enfría a una temperatura en la que el soluto es menos soluble. Las soluciones sobresaturadas son inestables, y en condiciones apropiadas el soluto cristalizará para dar soluciones saturadas.

La solubilidad depende de la naturaleza de las sustancias y es afectada por la temperatura; en general, la solubilidad aumenta con la temperatura. Las sales de cloruros y sulfatos son las más solubles, en tanto que los grupos de sulfuros e hidróxidos lo son menos. Los minerales del grupo de los carbonatos, silicatos y aluminatos tienen una pequeña, pero significativa solubilidad (Domenico y Schwartz, 1990).

De acuerdo con resultados obtenidos de las solubilidades de ciertos compuestos inorgánicos en agua a varias temperaturas (Perry y Chilton, 1973; Lange, 1992), se observa que la variación de solubilidad en función de la temperatura es comparativamente mayor en el LiCl y en el KCl que en el NaCl (fig. 3.1).

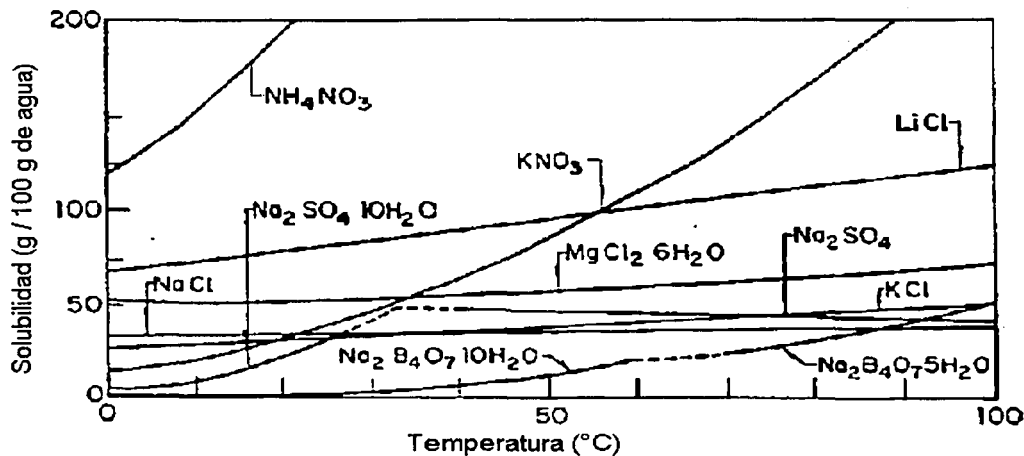


Fig. 3.1 Variación de la solubilidad con la temperatura (modificada de Perry y Chilton, 1973)

La concentración de una solución puede formularse de distintas maneras. Además de la *fracción molar*, la concentración de una disolución puede expresarse indicando (1) la cantidad de soluto por unidad de volumen de solución, o bien (2) la cantidad de soluto por cantidad unitaria de disolvente. El primer método es más aplicable para los cálculos *estequiométricos*, que consideran las proporciones según las cuales los cuerpos se combinan entre sí, y a él corresponden los sistemas de unidades de peso por unidad de volumen, la *molaridad* y la *normalidad*; sin embargo, existe la desventaja de la variación de la concentración al cambiar la temperatura: si la temperatura aumenta también lo hace el volumen, por lo que la concentración disminuye. En fisicoquímica suele ser más conveniente el segundo método, en el que están clasificados la concentración o porcentaje en peso y la *molalidad*; como tanto la cantidad del soluto como del disolvente se expresan en unidades de masa, no hay cambio en la concentración al variar la temperatura.

El método de concentración en fracción de peso, o porcentaje en peso, da el número de gramos de soluto por cada 100 g de solución; una solución de NaCl al 10% contiene 10 g de NaCl en 90 g de agua. La concentración molar (M) define el número de moles de una especie por litro de solución (mol/L). Debido a que las sustancias reaccionan en proporciones molares, muchos de los cálculos termodinámicos usan concentraciones expresadas en moles. La concentración molal (m) define el número de moles de una especie (número de pesos moleculares en gramos del soluto) por kilogramo de solvente (mol/kg). Esta escala para concentraciones en soluciones diluidas es casi la misma que la concentración molar debido a que un litro de solución tiene una masa de aproximadamente 1 kg. Para soluciones más concentradas las dos escalas llegan a ser cada vez más diferentes. La concentración de masa por volumen es la escala más común. Define la masa de un soluto disuelto en una unidad de volumen de solución: las

concentraciones se reportan en unidades tales como mg/L o µg/L. Vuelve a haber una correspondencia cercana entre estas dos últimas escalas de concentración. Para soluciones diluidas: 1 ppm = 1 mg/kg = 1 mg/L. Conforme la salinidad total de una solución comienza a exceder, aproximadamente,  $10^4$  mg/L, la ecuación de conversión mg/kg = (mg/L)/(densidad de la solución), es necesaria para cambiar entre estas escalas de concentración (Domenico y Schwartz, 1990).

La *fuerza iónica* es una medida de la concentración molar total de iones, que resalta la contribución proporcional a la solución no ideal de las especies (i) con carga (z) mayor de uno, y se determina mediante la ecuación 3.1:

$$I = 0.5 \sum_i M_i z_i^2 \quad (3.1)$$

Para soluciones con fuerzas iónicas menores de 0.1 M, se puede suponer que los *coeficientes de actividad* de los iones en solución tienen un valor cercano a uno (soluciones ideales) (Domenico y Schwartz, 1990). Es por ello que en soluciones diluidas es válido considerar solamente las concentraciones equivalentes para el análisis del efecto de las especies químicas disueltas, sin que exista un factor adicional que afecte su comportamiento, como sería el caso de ambientes salinos.

Si se conoce la fuerza iónica de la solución se puede estimar el efecto de la sal. Es común separar en tres los términos que contribuyen al coeficiente de actividad estequiométrico: electrostático, por asociación de iones y de solvatación; generalmente, los dos primeros términos disminuyen progresivamente con el aumento de la fuerza iónica, mientras que el tercero se incrementa (Fletcher, 1993).

### 3.1.2.1 Electrólitos

Ciertos compuestos, conocidos como *electrólitos*, en un disolvente ionizante producen *iones*, que son partículas cargadas positivamente (*cationes*) o negativamente (*aniones*). Los iones se producen principalmente de dos maneras: (1) en compuestos electrovalentes, por una simple separación de los iones que ya existían como tales en el estado cristalino, aunque en solución pueden tener moléculas de agua unidas más o menos firmemente a los iones mediante efectos polares, como agua de hidratación; (2) por interacción del compuesto con agua o cualquier disolvente ionizante.

A los compuestos electrovalentes con un alto grado de ionización, tanto en estado sólido como en solución, se les llaman *electrólitos fuertes*. En éstos, a diferencia de los *débiles*, la ionización es completa, excepto en las soluciones más concentradas, donde se presenta la formación de parejas de iones. Los iones no actúan independientemente, excepto en solución muy diluida, y su efecto sobre las *propiedades coligativas* (aquellas que dependen de la concentración de las partículas y no de su naturaleza individual) se reduce en la mayoría de las soluciones por la influencia de las fuerzas interiónicas. Las propiedades de las soluciones de electrólitos son esencialmente las de los iones individuales, por ejemplo, los cloruros se caracterizan por las propiedades de dicho ion; asimismo, las reacciones de los electrólitos son esencialmente las que ocurren entre los iones. Por ello es útil el concepto de *actividad*, que equivale a una concentración



electrolítica reducida o corregida, que da cuenta del comportamiento de los iones en soluciones reales.

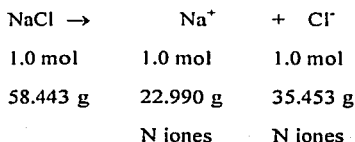
En los electrolitos fuertes la ley de acción de masas se puede aplicar mediante la sustitución de las concentraciones comunes ( $c$ ), determinadas por vía analítica, por las concentraciones efectivas (es decir, las que se ponen de manifiesto en la acción), conocidas por actividades ( $a$ ). La relación entre ambas magnitudes viene expresada por la fórmula  $a = fc$ , donde  $f$  es el llamado *coeficiente de actividad*, factor de corrección puramente empírico que refleja en forma sumaria toda interacción de los campos de fuerza producidos en un sistema dado; su magnitud depende de la composición del soluto, y de la concentración y temperatura de la solución, principalmente (Nekrásov, 1981).

La dilución de una solución de un electrolito, débil o fuerte, da como resultado una disminución de las fuerzas de atracción entre los iones (aumento de la actividad), y la mayor ionización de un electrolito débil (incremento del número de iones). Por otra parte, se conoce como *efecto del ion común* a la represión de la ionización de un electrolito débil por causa de la adición, a través de un electrolito fuerte, de uno de sus mismos iones (Crockford y Knight, 1983).

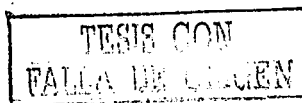
El *potencial redox* es una medida de la capacidad de oxidación ó reducción de un sistema, y es un factor importante para estimar el sentido del equilibrio en el transcurso de una reacción, pero no es una medida de la actividad de los iones.

### 3.1.2.2 Sales neutras

Las sales se suelen clasificar en cuatro tipos para estudiar su reacción con el agua: (1) de ácidos fuertes y bases fuertes, como el cloruro de sodio (NaCl), de potasio (KCl) o de litio (LiCl); (2) de ácidos débiles y bases fuertes; (3) de ácidos fuertes y bases débiles y (4) de ácidos débiles y bases débiles. La primera clase no se hidroliza y, por tanto, la solución sigue dando reacción neutra. Las últimas tres clases se hidrolizan en agua y la solución se puede hacer ácida o básica dependiendo del tipo de sal. Las *sales neutras* se forman por sustitución total, o parcial, de los hidrógenos de un ácido por metales; tal es el caso de las sales haloideas, como el NaCl, KCl y LiCl que son compuestos binarios, constituidos de metal con valencia única y no metal. En estos compuestos iónicos, las cantidades molares se pueden interpretar en términos de número de iones ( $N = 6.02 \times 10^{23}$ ), por ejemplo, para el NaCl:



Para caracterizar termodinámicamente a las especies en solución debe haber una variable independiente en el sistema, lo que en principio descarta el considerar como componentes aislados a los iones; no obstante, las sales neutras pueden ser verdaderas variables independientes, cuyas propiedades termodinámicas son mensurables, pudiendo elegir



entre usar las actividades de la sal neutra o, cuando se trata de soluciones electrolíticas que contienen una sola sal, la de los respectivos iones; en soluciones de muchos componentes, donde las especies iónicas pueden estar involucradas en diferentes reacciones, es más fácil tratar a cada ion de manera individual (Fletcher, 1993).

Los elementos Litio (Li), sodio (Na) y potasio (K) pertenecen al grupo 1 de la tabla periódica y forman parte del grupo de metales alcalinos, que llevan ese calificativo debido a que sus hidróxidos son álcalis fuertes, y se caracterizan por la alta solubilidad de sus sales; tienen un sólo electrón en su capa más externa, el cual fácilmente se pierde, por lo que forman iones monovalentes estables. El Na y el potasio K están muy difundidos en la naturaleza, constituyendo, respectivamente, el 2 y 1% de los átomos de la corteza terrestre. El porcentaje de Li es bastante inferior (0.02%). Los metales alcalinos en la naturaleza se encuentran exclusivamente en forma de compuestos. El Na y K son compuestos constantes de muchos silicatos sumamente abundantes. El más importante de los minerales de sodio es el cloruro sódico, contenido en elevada proporción en el agua de los mares (Nekrásov, 1981). Por su parte, el cloro (Cl) es un elemento no metálico del grupo 7, que tiene una alta electronegatividad, por lo que forma enlaces predominantemente iónicos con los metales alcalinos, de relativa baja electronegatividad; los aniones de ácidos fuertes, como el ion  $\text{Cl}^-$ , no se hidrolizan y en consecuencia no influyen en el pH. El cloro constituye el 0.02% del número de átomos de la corteza terrestre. Algunas propiedades de estos y otros elementos, así como de sus respectivos iones se presentan en la tabla 3.1; nótese que el tamaño de los cationes es menor que el de sus respectivos átomos, al contrario de lo que sucede con los aniones.

Tabla 3.1 Tamaños de especies químicas (Nekrásov, 1981; Rodríguez, 1986; Mitchell, 1993)

Propiedad	Na	K	Li	Ca	Mg	Cl
Número atómico	11	19	3	40	12	17
Peso atómico	22.99	39.10	6.94	40.08	24.30	35.45
Radio atómico (Å)	1.57	2.02	1.23	1.74	1.30	0.99
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Li}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$
Radio iónico (Å)	0.98	1.33	0.68	0.99	0.65	1.81
Radio iónico hidratado (Å)	5.6 - 7.9	3.8 - 5.3	7.3 - 10.0	9.60	10.80	

De acuerdo con los coeficientes de difusión, las movibilidades del  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en agua son aproximadamente iguales, por tanto, cada uno conduce casi la misma fracción de la corriente. Mientras más concentrado está el KCl, menor es la contribución de otros iones como el  $\text{H}^+$  al flujo de corriente. En cambio los coeficientes de difusión del  $\text{Na}^+$  y  $\text{Li}^+$  son menores, por lo que las sales que forman también lo son, en ese orden. Asimismo, el KCl tiene mayor conductancia que el NaCl. La conductancia depende en proporción directa de la velocidad de los iones. Además de la cantidad de masa, el grado de hidratación de un ion, esto es, el agua adsorbida al ion junto con la atmósfera orientada del disolvente establecida a su alrededor, afecta su velocidad; la atracción interiónica también disminuye

su velocidad, en tanto que la elevación de la temperatura la aumenta (Crockford y Knight, 1983).

### 3.1.2.3 Solvatación

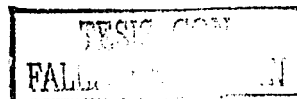
La interacción de las moléculas del soluto y del disolvente se conoce como *solvatación*, e *hidratación* cuando el disolvente es agua. En cuanto a las propiedades de soluciones de electrólitos concentrados, la solvatación tiene un efecto directo en el coeficiente de actividad de una sal neutra o de un ion aislado; cualitativamente, esto equivale a reducir el contenido de agua del sistema en la cantidad ligada al ion en cuestión. El efecto es el de incrementar la concentración aparente y, por tanto, su coeficiente de actividad. En la figura 3.2 se aprecian la solvatación de un catión (a) y de un anión (b), respectivamente.

La solvatación del ion por aumento en la concentración de soluciones de electrólitos disminuye la *permisividad relativa* o constante dieléctrica de soluciones y, para una misma concentración, es más notable para cationes di y trivalentes. En la figura 3.3 se puede observar tal efecto para una solución de NaCl.

El término *electrostricción* se aplica a la compresión de un material debido a la presencia de un campo eléctrico, el cual induce una forma de deformación elástica de un dieléctrico, asociada con aquellos componentes de deformación que son independientes de la dirección del campo, en contraste con el *efecto piezoeléctrico*; dicho fenómeno se ha observado para el agua en soluciones acuosas. La solvatación y el colapso del solvente contribuyen a la electrostricción; la primera afecta la densidad y compresibilidad de las soluciones acuosas y ocasiona la remoción de moléculas de agua de la estructura del solvente y su colapso. La influencia de la electrostricción cambia abruptamente con la temperatura y la presión (Fletcher, 1993; Parker, 1994).

Para entender las relaciones suelo-agua es importante considerar el tipo de atracción entre las especies, la separación de equilibrio, y las energías de interacción molecular involucradas. El arreglo de las moléculas de H<sub>2</sub>O en agua y hielo ocupa sólo un pequeño porcentaje, menos del 40%, de un determinado volumen. Esta disposición puede ser aún menos densa si las moléculas de agua son vecinas de una superficie plana que posee un campo con carga negativa, que atrae sus porciones con carga positiva mutuamente repelentes. Por otro lado, los fuertes campos eléctricos alrededor de los cationes en la disolución pueden romper los enlaces de dipolos H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O, y producir una configuración más densa dentro de su esfera de influencia; esto origina un valor negativo del volumen aparente de los iones en soluciones acuosas (V<sub>a</sub>), como se muestra según los siguientes datos (Winterkorn y Fang, 1991):

Ion:	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
V <sub>a</sub> (Å):	+12	+8	-2	-8	-8	-8.5	-33	-45	-48	-87



TESIS CON  
VALOR DE ORIGEN

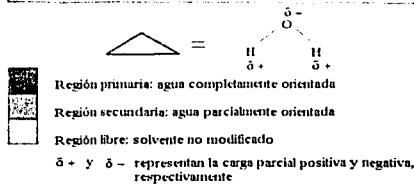
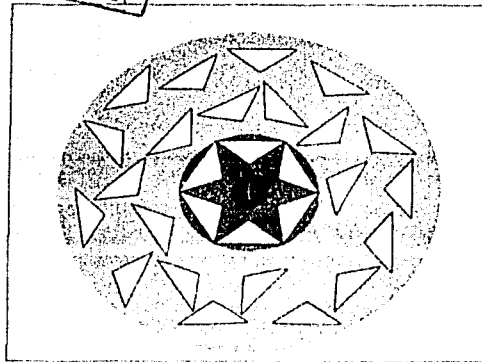


Fig. 3.2a Solvatación (Fletcher, 1993)

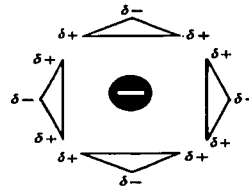


Fig. 3.2b Solvatación de un anión

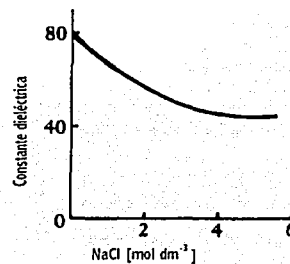


Fig. 3.3 Permisividad vs concentración

### 3.1.2.4 Asociación de iones

Las fuerzas electrostáticas dentro de los pares iónicos son independientes de la naturaleza química específica de los iones y son dominadas por la carga y tamaño de los iones. Para electrolitos 1:1 no es de esperarse una asociación de iones significativa. No obstante, en soluciones concentradas de electrolitos pueden ocurrir especies compuestas de un catión y varios aniones. Especies asociadas que sólo contienen iones de la misma carga, sólo son posibles en soluciones muy concentradas, debido a las importantes fuerzas de repulsión involucradas. De acuerdo con la figura 3.4, si se considera que  $\hat{a}$  es la distancia de máxima aproximación entre iones (suma de radios electrostáticos de los iones seleccionados), y  $q$  es la distancia crítica para la asociación, se tienen los siguientes casos (Fletcher, 1993):

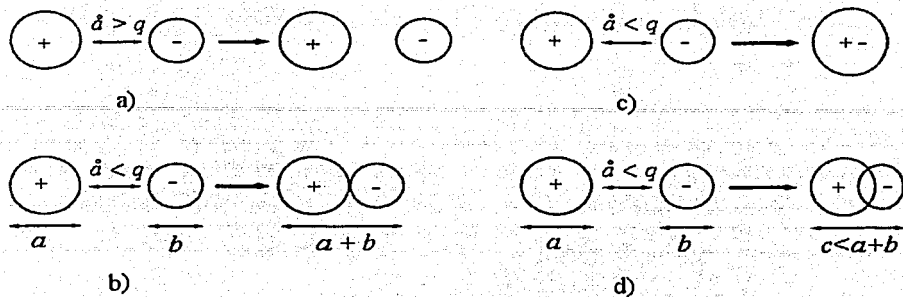


Fig. 3.4 Asociación de iones (Fletcher, 1993)

donde:

- Nula asociación de iones
- Esfera externa: par iónico formado sin desbaratamiento de las esferas de solvatación de los iones individuales. El solvente aún está presente entre los iones
- Esfera interna o de contacto. Par iónico con desbaratamiento de las esferas de solvatación de iones individuales. Los iones están en contacto directo. El par iónico está completamente solvatao
- Par iónico formado con un desplazamiento parcial de las esferas de solvatación de los iones. Una parte del solvente se ha removido y otra permanece.

### 3.2 Sistemas coloidales

Los sistemas dispersos en los que las partículas distribuidas en el medio dispersante tienen tamaño coloidal se llaman soluciones coloidales o soles. Los soles más importantes desde el punto de vista práctico son los *hidrosoles*, sistemas en los que el medio dispersante es el agua.

En relación con la fase líquida que les sirve de dispersión, las partículas coloidales se clasifican en dos grupos. Las que adsorben en su superficie moléculas de la sustancia que constituye el medio dispersante, formando con ella complejos más o menos estables del tipo de los solvatos, se llaman *liófilas* y cuando el medio dispersante es agua, *hidrófilas* (afinidad con el agua), por ejemplo el ácido silícico y el óxido férrico. Esta adsorción se debe a que en ciertas moléculas los grupos polares, o los que tienen cargas, interactúan con las moléculas de agua en la periferia de las moléculas. Los agregados formados por asociación de partículas coloidales llevan ocluida una cantidad de la fase líquida. Los coloides del otro grupo no adsorben moléculas de la fase líquida, por lo que se llaman *liófilos*, y cuando el medio dispersante es el agua, *hidrófilos* (sin afinidad al agua). En sus soles, las partículas no están rodeadas de una película de la fase líquida, y al formarse agregados más grandes el líquido no se ocluye en ellos.

Según el comportamiento que los sedimentos formados por floculación muestren frente a la fase líquida los sistemas coloidales se clasifican en reversibles, que comprenden soles macromoleculares (soluciones verdaderas) y las asociaciones de coloides (coloides hidrófilos), y sistemas irreversibles, como los coloides hidrófobos. Los precipitados de los coloides reversibles, al ponerse en contacto con el agua pura se disuelven en ella espontáneamente, formando soles. Muchos coloides reversibles antes de formar el sol adsorben una gran cantidad de sustancia de la fase líquida, aumentando fuertemente su volumen. Semejante hinchamiento puede tener lugar al simple contacto con el agua, mientras que en otros casos se necesita recurrir al calentamiento para obtener el sol.

### 3.2.1 Teoría de la doble capa eléctrica

Una de las características distintivas de las partículas coloidales es la presencia de una carga en su superficie, positiva en algunos y negativa en otros, la cual se adquiere por ionización directa de los grupos que están en la superficie de las partículas, o bien, por adsorción selectiva de iones de la solución en la que están suspendidas las partículas. Como las partículas coloidales de una misma especie presentan idénticas propiedades *interfasiales* (superficiales), la carga eléctrica que adquieren es de un mismo signo. Las que adsorben principalmente cationes se denominan coloides electropositivos o *basoides*, y floculan en medio alcalino, como hidratos de hierro,  $\text{FeOH}_3$ , y aluminio,  $\text{AlOH}_3$ ; las que adsorben aniones reciben el nombre de coloides electronegativos o *acidoideas*, y floculan en medio ácido, como arcillas, ácidos húmicos y complejos de hierro y silicio.

Un *coión* es un ion con igual signo que la carga de superficie fija sobre la arcilla u otro intercambiador, mientras que un *contraión* es aquél con signo opuesto a la carga fija de superficie. Se conoce como *exclusión de coiones* a la tendencia de un intercambiador de iones, por ejemplo una arcilla, a excluir a los coiones de la vecindad de la superficie: a veces se le refiere como adsorción negativa (Gray y Mitchell, 1967). Un coloide *homoiónico* contiene esencialmente un solo tipo de contraion, como la arcilla montmorilonita sódica, en tanto que en un coloide *heteroiónico* están presentes varios contraiones.

En el sistema partícula-solución, se denomina como fase externa a la parte exterior o mayoritaria de la solución electrolítica donde la concentración de cationes es igual a la de aniones (Gray y Mitchell, 1967). A la parte formada por la carga de la partícula y la capa de iones adsorbidos necesaria para neutralizarla (contraiones) se le llama *fase interna*, o *doble capa eléctrica o difusa*, de la que se conocen tres modelos. El de Helmholtz supone que la disminución de la fuerza es lineal, el de Chapman y Gouy indica que es exponencial, y el de Stern habla de una disminución inicialmente lineal y después exponencial.

La partícula coloidal con capa difusa compensadora lleva el nombre de *micela*; ésta consta de un núcleo cargado, rodeado por una atmósfera iónica dispersa. Al núcleo de la micela unido a la capa de iones que determinan la carga eléctrica o potencial se le llama *gránulo*; si a éste le agregamos la capa compensadora de iones unidos rigidamente, entonces se le denomina *partícula* (Nekrásov, 1981. Cepeda, 2002). En la figura 3.5 en la

mitad superior del círculo se muestra un esquema general de la micela, y en la inferior una micela del ácido húmico.

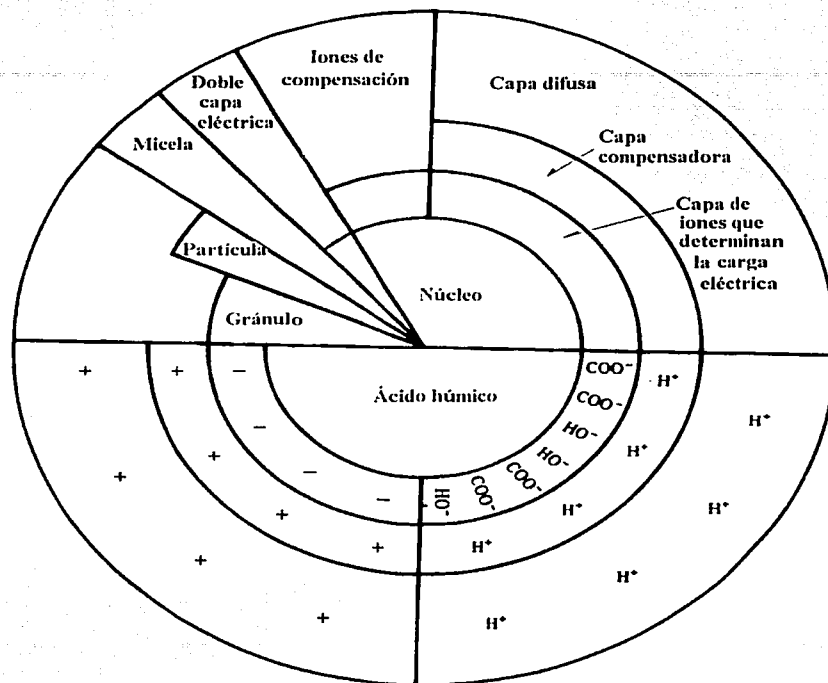


Figura 3.5 Constitución de los coloides del suelo (modificada de Cepeda, 2002)

Alrededor de una partícula cargada negativamente hay una acumulación selectiva de iones positivos (*capa de Stern*) presentes en la solución por atracción electrostática entre el adsorbente y el adsorbato; la distribución de los iones es del tipo condensador. Lo anterior se aplica a su vez a una superficie cargada positivamente, la que entonces atrae iones negativos. El espesor de la capa de Stern está fijado por el radio hidratado de los iones de carga opuesta (contraiones). De acuerdo con la teoría de Gouy y Chapman, parte de estos cationes tienden a formar una segunda capa que permanece fija a la partícula coloidal (*capa de Gouy*), donde la concentración de cationes disminuye con la distancia desde la superficie de carga negativa. Esta capa, de naturaleza algo difusa, forma junto con la capa superficial negativa lo que se conoce como la doble capa eléctrica o difusa. Fuera de ella, los iones se mueven libremente y constituyen una atmósfera iónica parecida a la que existe alrededor de los iones en solución. Entre la solución interna, o de la micela, y la externa existe un equilibrio, o sea, que las cantidades cambiables y las cantidades disueltas guardan cierta proporcionalidad; todo aumento o disminución en una

de las partes conduce a un efecto similar en la otra. En la figura 3.6 se ilustra un modelo eléctrico de la doble capa, de espesor  $\vartheta$ , en el límite de las fases sólida y líquida. En la parte superior se muestra la distribución iónica, esto es, la variación de la concentración  $c$  en función de la distancia  $x$ . En la parte inferior del esquema aparece la variación de los distintos potenciales eléctricos, adyacentes a la partícula con carga negativa, y se indican (1) los complejos de esfera interna, (2) de esfera externa, y (3) el enjambre difuso de iones; también se observa que es cuestionable suponer que  $\Psi_s \approx \zeta$  (Di Maio *et al*, 2002).

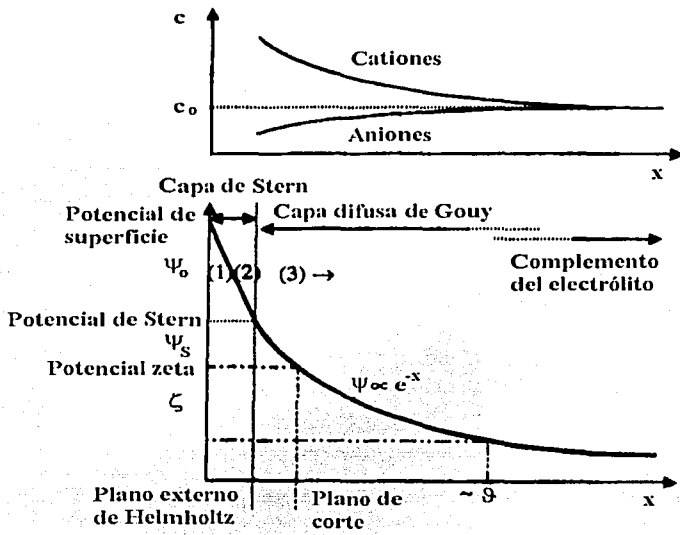


Fig. 3.6 Modelo de la doble capa difusa (Di Maio et al, 2002)

El espesor de la doble capa eléctrica resulta de un balance entre la fuerza electrostática que atrae a la capa difusa hacia la superficie del mineral y las fuerzas osmóticas que tienden a difundir a los cationes lejos de la superficie de la partícula. La fuerza de atracción electrostática depende de las propiedades del mineral (esto es, su carga superficial), mientras que las fuerzas osmóticas están en función de las propiedades de la solución que lo rodea, incluidos los iones disueltos (Goldman y Greenfield, 1988). El espesor de la doble capa estará dado por la distancia, medida a partir de la superficie cargada eléctricamente, donde la concentración de aniones y cationes se iguala a la de la solución libre.

Debido a la carga de superficie existe un potencial eléctrico entre la partícula coloidal y la solución anterior. La parte de potencial que existe entre la capa difusa fija y la solución libre se conoce como *potencial electrocinético* o *zeta*. Dicho potencial no es igual al potencial de superficie de la doble capa, y aunque son proporcionales, el potencial zeta



debe ser menor, ya que su alcance es el plano real de corte entre el agua libre y la envolvente de agua que se mueve con la partícula en un proceso *electrocínético*, el cual se localiza a una pequeña, pero desconocida distancia de las superficies (Mitchell, 1993). El potencial zeta más bien se parece al potencial de Stern y también es afectado por la concentración del electrólito. De acuerdo con lo anterior, el potencial zeta tiene un carácter poco definido y, por tanto, una limitada aplicación para evaluar la estabilidad. No obstante, desempeña un papel importante en las propiedades eléctricas de los sistemas coloidales, como la *movilidad electroforética*; en sistemas de carga reversible, ésta cambia de signo. Hay sustancias llamadas *anfólitos* o *anfotéricas*, las cuales existen en el estado sin disociar en forma de iones híbridos, que se pueden ionizar para producir aniones o cationes, dependiendo de que actúen contra un protón o un ion hidroxilo. El pH al cual el anfólito existe casi enteramente en la forma de híbrido se llama el *punto isoeléctrico* (IEP), y es aquel en que el potencial zeta y la movilidad se anulan, la suspensión es menos estable y, por tanto, más fácil de coagular. Debe notarse que la carga superficial no necesariamente es nula en dicho punto, es decir, que el *punto de carga cero* (PZC) y el IEP de un sistema coloidal, en general, no son idénticos. El PZC es la propiedad más importante de la doble capa (Bornemisza, 1982; Crockford y Knight, 1983; Goldman y Greenfield, 1988).

La constante dieléctrica de las capas de agua adsorbidas es mucho menor que la del agua libre, por lo que en el modelo de Stern de la doble capa, esto afecta en la capacidad de condensador molecular y en el potencial de Stern, así como posiblemente también se alteren las fuerzas de Van der Waals y se cambie el PZC.

La adsorción de agentes activos de superficie o tensoactivos modifica las propiedades de la interfase, ya que cambian la tensión y pueden también variar la configuración de la doble capa difusa, o las características de humedecimiento del sólido ante diferentes líquidos. Dependiendo de sus efectos en un sistema particular, los compuestos se denominan *peptizantes* o *floculantes* (Van Olphen, 1963).

### 3.2.2 Estabilidad coloidal

En química coloidal, el término *estabilidad* se refiere a la capacidad de las partículas de permanecer como entidades independientes en una dispersión; esto es, mantenerse en un estado disperso. La estabilidad de los sistemas coloidales se debe en su mayor parte al hecho de que las partículas con cargas iguales se repelen entre sí. Las partículas de un coloide en particular tienen la misma carga, y las fuerzas de repulsión impiden la coagulación o floculación. Cualquier procedimiento que destruya la carga de superficie producirá la coagulación del coloide. Debe tenerse en mente que las partículas en una dispersión no solamente están sujetas a fuerzas interparticulares, sino también gravitatorias, de difusión y convección.

La conversión del estado estable de una dispersión o solución dada a un estado inestable se denomina *desestabilización*. El proceso capaz de realizar la desestabilización de las partículas dispersas es la coagulación, donde las partículas coloidales aumentan de tamaño y se ven sometidas a una sedimentación por gravedad.

Se llama sedimentación a la caída de partículas en suspensión bajo la acción de la fuerza de gravedad y su acumulación en el fondo del recipiente, que forma un sedimento separado de un líquido *sobrenadante* claro. Este proceso es muy rápido en suspensiones coaguladas, donde se sedimentan grandes aglomerados de estructura débil, tipo baraja de cartas; el sedimento formado es flojo, tiene gran volumen y puede destruirse con facilidad para volver a llevarlo a suspensión. En un sol estable y libre de sales también ocurre la aglomeración, aunque el proceso es muy lento (Van Olphen, 1963). En suspensiones estables se forma en el fondo un sedimento compacto, constituido de capas u hojas apiladas en forma paralela, adheridas unas a otras fuertemente, por lo cual es duro de romper y llevar de nuevo a suspensión (IGAC, 1995).

La propiedad de masa de los coloides da origen a que actúen la fuerza de gravedad y de atracción de Van der Waals, mientras que la propiedad de carga eléctrica produce las respectivas fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión coulombianas, e indirectamente, de solvatación o formación de capas de adsorción (Sposito, 1989). Las tres primeras fuerzas ocasionan que una suspensión coloidal sea inestable, mientras que las otras dos favorecen la estabilidad; la fuerza de gravedad (corregida por el efecto de flotación), es una fuerza creada por el campo de gravedad de la Tierra, e inicia y sostiene la coagulación a través de la sedimentación de las partículas; las demás, son fuerzas entre partículas que producen atracción o repulsión entre los coloides. Los fenómenos de dispersión, coagulación, floculación, defloculación y otras propiedades son el resultado de esta interacción de partículas.

En un sol hidrófobo coloidalmente estable, como un sol de arcilla en agua dulce, las partículas individuales se dispersan homogéneamente en el líquido. Con el tiempo, ocurren cambios en dicho sistema debido a (1) la sedimentación, la cual es contrarrestada por la fuerzas de difusión e interparticulares; (2) la maduración, que consiste en la tendencia del sistema a reducir el área superficial de las partículas por medio del crecimiento de las de mayor tamaño, a costa de la disolución de las más pequeñas (prácticamente nula en soles de arcilla), y (3) la aglomeración de partículas (Van Olphen, 1963).

La formación de *tactoides*, caso particular de *coacervación* (separación de un sol en dos fases líquidas, una de mayor concentración de partículas), es un fenómeno de orientación de partículas y una evidencia de la interacción de partículas a larga distancia. Los tactoides se forman espontáneamente en algunos soles de partículas de forma laminar o de barra. Las partículas están orientadas paralelamente entre sí a distancias del orden de 100 Å (Van Olphen, 1963).

### 3.2.2.1 Estabilización

Se dice que las suspensiones coloidales son estables (y sus partículas dispersas) si no existe una sedimentación por gravedad de la suspensión en un periodo práctico (2 a 24 h). La dispersión y peptización dan lugar a la formación de suspensiones o soluciones coloidales estables. La dispersión consiste en introducir la sustancia sólida triturada en un medio líquido y dispersarla en este medio formando una suspensión estable. Comprende

varios pasos: humedecimiento de la sustancia por el líquido, rompimiento de agregados y aglomerados, y estabilización de la suspensión.

El proceso de formación de un sol por la acción de cantidades muy pequeñas de electrólitos, entre otros sales y muchos compuestos orgánicos, sobre los precipitados de coloides irreversibles se llama *peptización* y es la base de uno de los métodos para obtener soles por dispersión. La *defloculación* o peptización consiste en la dispersión producida por un aditivo sobre las partículas que aumenta las fuerzas repulsivas, principalmente a través de cargas eléctricas. Una poca cantidad de estas sustancias produce un cambio abrupto en las propiedades de la suspensión y una disminución radical de su viscosidad. La sobredosificación de un agente peptizante puede provocar el proceso contrario, la coagulación (IGAC, 1995). Se llama peptizante al tipo de iones que crean la carga estabilizadora de la partícula y al electrólito que los contiene. La cantidad requerida de estos iones es muy pequeña, regularmente menor de  $1 \text{ meq/dm}^3$  ( $1.0$  equivalente  $g = [\text{masa de la fórmula}]/[\text{carga}]$ ; por conveniencia se utiliza una unidad más pequeña, que se abrevia como miliequivalente y que es la milésima parte de un equivalente-gramo); no siempre es necesario añadir un electrólito peptizante, ya que algunas veces los productos de disolución del material coloidal, o los productos de disociación del agua, actúan como tales (Van Olphen, 1963).

Un ejemplo de peptización por iones determinantes de potencial es la estabilización de soles de hidróxido de aluminio por medio de iones  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{OH}^-$  (o iones más complejos), cuya disposición depende del pH de la solución. En ciertos óxidos que tienen un potencial de superficie dependiente del pH, como los de aluminio o el férrico, se acostumbra referirse al  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  como iones determinantes de potencial, aunque actúan como tales sólo de manera indirecta. No todos los soles tienen la posibilidad de alternar entre cargas positivas y negativas: el sol de sílice, como tal, sólo obtiene carga negativa (Van Olphen, 1963).

Los coloides hidrófobos sólo se pueden estabilizar por la adsorción superficial de iones que puedan interactuar con el agua, de otra manera, su falta de afinidad causa que se separen de ella. Al mismo tiempo, la mutua repulsión entre las partículas del coloide con iones adsorbidos de la misma carga evita que las partículas choquen y aumenten su tamaño.

La capacidad protectora de los coloides consiste en estabilizar coloides hidrófobos por medio de agregación de coloides hidrófilos de la misma carga que forman una capa a su alrededor. La adición de cualquier sustancia que tenga un extremo hidrófilo (polar o con cargas) que interactúe con el agua, y un extremo hidrófobo (no polar) que haga lo propio con el coloide hidrófobo, estabilizará la suspensión (Crockford y Knight, 1983; Brown *et al*, 1993).

### 3.2.2.2 Desestabilización

Se denomina coagulación a la formación de aglomerados. La coagulación que produce voluminosas masas de partículas asentadas con altos contenidos de agua se llama floculación. Si al sedimentar las partículas forman masas densas, el proceso se conoce como agregación (Van Olphen, 1963; Sposito, 1989). También se llama floculación a la

formación de aglomerados debido a la creación de puentes por medio de moléculas adsorbidas y partículas coloidales coaguladas (fig. 3.7) (IGAC, 1995).

La coagulación se produce añadiendo un electrólito a la mezcla o medio dispersante en tal cantidad que su concentración supera la denominada concentración crítica de coagulación (ccc). En general, el valor de la ccc depende de la naturaleza de las partículas coloidales, de la composición de la solución en la que aquéllas están suspendidas, y del tiempo que se permita para su precipitación, previa agitación de suspensiones diluidas ( $< 3 \text{ kg/m}^3$ ) preparadas en una serie de soluciones electrolíticas de concentraciones gradualmente mayores. La regla de Schulze-Hardy establece que el valor de dicha concentración está predominantemente determinado en una proporción directa, por la valencia de los iones con carga opuesta a la de la partícula, siendo secundario el tipo de ion. Esta regla es válida para una variedad de soles y electrólitos indiferentes (o inertes). Estos son electrólitos que no se comprometen en ninguna clase de reacción específica con el sol. Por ejemplo, no deben contener iones determinantes de potencial para el sol, u otros iones que son específicamente adsorbidos en las partículas del sol, ni deben reaccionar químicamente con los iones que constituyen la doble capa eléctrica. El poder floculante de los cationes para soles negativos decrece ligeramente en el orden  $\text{Cs} > \text{Rb} > \text{NH}_4 > \text{K} > \text{Na} > \text{Li}$ , y los aniones para soles positivos en el orden  $\text{F} > \text{Cl} > \text{Br} > \text{NO}_3 > \text{I}$ . Esta secuencia de efectos iónicos frecuentemente observada en muchos fenómenos fisicoquímicos se llama la serie liotrópica o de Hofmeister (Van Olphen, 1963; IGAC, 1995).

Bajo la influencia del electrólito se produce un adelgazamiento de la doble capa de las partículas coloidales, lo que provoca una superioridad de las fuerzas de atracción sobre las fuerzas de repulsión y la unión de partículas en conjuntos mayores. En el caso de los coloides hidrófobos, la coagulación por electrólitos se verifica fácilmente, siendo suficientes unas cantidades relativamente pequeñas de iones. Por lo contrario, la coagulación de coloides hidrófilos se produce sólo cuando la concentración del electrólito es muy alta.

La coagulación también se puede provocar por calentamiento. Al calentar la dispersión coloidal aumenta el movimiento de las partículas y, por tanto, el número de colisiones. Las partículas aumentan de tamaño a medida que se adhieren entre sí después de chocar (Brown *et al.*, 1993).

Otro método para precipitar un coloide consiste en agregar un coloide de carga contraria. Si se agrega un sol de óxido férrico de carga positiva a un sol de carga negativa, como las arcillas, ambos coloides se precipitarán (precipitación mutua de coloides) (Crockford y Knight, 1983).

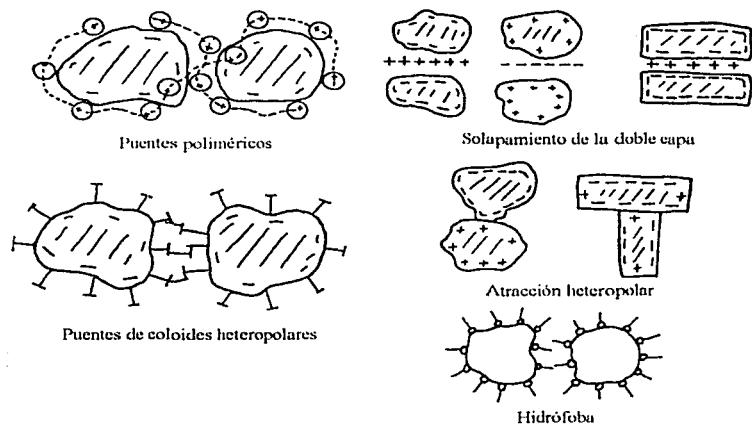


Fig. 3.7 Tipos de coagulación (modificada de IGAC, 1995)

### 3.2.2.3 Gelificación

Los precipitados de los coloides (flóculos) poseen distinta estructura. Los coloides liófilos al flocular no arrastran consigo pequeñas cantidades de la fase dispersante, sino que precipitan en forma de polvos finos o grumos. En cambio, los coloides liófilos aprisionan cantidades más o menos considerables de la fase líquida, lo que condiciona el aspecto gelatinoso de sus flóculos. Tales flóculos integrados también por la fase líquida de ordinario se llaman geles (si la fase líquida es agua, hidrogeles).

Un *gel* (o *liogel*) es un sistema coloidal de dos fases, de apariencia homogénea, que presenta cierta rigidez y elasticidad; a diferencia de los soles, retiene su forma característica. En el gel, las partículas están aglomeradas en un solo grumo (flóculo) que se extiende a través del volumen disponible. Si las partículas son más o menos esféricas se pueden enlazar en forma de un collar de cuentas impartiendo rigidez al sistema. Las partículas laminares se pueden asociar en rígidas estructuras tipo baraja de cartas, mientras que las de forma de barras o agujas pueden construir un andamiaje. La rigidez del gel dependerá del número y resistencia de las uniones de partículas en la estructura continua. Comúnmente, los geles tienen un bajo contenido de sólidos. La gelificación ocurre en ciertos soles de sílice, alúmina y arcilla.

La formación de un gel se puede considerar como una precipitación incompleta de un sol. En el curso de este proceso los coloides se unen en agregados filamentosos, que se entrelazan formando un semisólido muy poroso, y hay un aumento en la solvatación, aun cuando la mayoría del disolvente probablemente es retenido en la estructura semisólida. En forma general, se puede decir que las mejores condiciones para la formación de geles están en un punto intermedio entre las condiciones óptimas para la estabilidad del sol y la precipitación completa. Muchos geles se pueden producir por el sencillo procedimiento



de enfriar un sol liófilo. Cuanto mayor es el estado de subdivisión del sol menor será el valor de concentración mínima para la formación del gel. La temperatura de gelificación está influida por el pH de la solución y por la presencia de varios iones; algunos geles se forman simplemente por adición de un electrólito al sol. Algunas veces la adición produce un gel por doble descomposición (por ejemplo, cierta concentración de HCl con una solución de silicato de sodio producen el gel de sílice).

Las concentraciones de diferentes electrólitos que son requeridos para causar la gelificación de los soles están gobernados también por la regla de Schulze-Hardy, lo que indica que es un caso especial de coagulación, únicamente que el acoplamiento de partículas procede de distinta manera (Van Olphen, 1963). Una propiedad característica de muchos geles es su tendencia a absorber líquidos e hincharse, proceso conocido como imbibición. El grado de hinchazón está determinado por la naturaleza individual del gel, la temperatura del sistema, el pH de la solución y la acción selectiva de ciertos iones. En el punto isoeléctrico la hinchazón alcanza un mínimo (Crockford y Knight, 1983).

#### 3.2.2.4 Proceso sol-gel

En muchos sistemas coloidales se presenta, en distinto grado, una transformación reversible isotérmica gel-sol, conocida como *tixotropía*, como en la alúmina o el óxido de hierro coloidales. Si el sistema se deja reposar se forma un gel, que se convierte en sol por agitación. Es un proceso dependiente del tiempo, idealmente reversible e isotérmico, que ocurre en condiciones de volumen y composición constantes, donde un material se endurece en reposo y se suaviza o licua con el remoldeo; la resistencia viscosa al movimiento de los iones y partículas explica el tiempo que tarda el endurecimiento.

El proceso sol-gel es muy útil para producir recubrimientos y películas de cerámica. El gel simplemente se aplica y después se calienta para formar el producto cerámico. Es un proceso donde se producen partículas extremadamente pequeñas (0.003 a 0.1  $\mu$ ) de tamaño uniforme en una serie de etapas químicas seguidas de calentamiento controlado. Las partes cerámicas suelen formar microrroturas y huecos (espacios vacíos) al azar que son indetectables durante su procesamiento. Cuando estas partes se utilizan bajo tensión, estos defectos concentran el esfuerzo, ocasionando finalmente la falla de la parte. La resistencia a la fractura se incrementa si las partículas individuales se sintetizan, de forma que se unan entre sí. Al calentar un gel disminuye el componente líquido, por lo que el material se encoge en forma considerable y es difícil evitar la formación de espacios vacíos y otras imperfecciones (Brown *et al.*, 1993).

#### 3.2.2.5 Sinéresis

En arcillas naturales, tras su depósito, las fracturas pueden ser producto de expansiones y contracciones por humedecimiento y secado. Las juntas y fisuras en arcillas preconsolidadas resultan del agrietamiento por contracción y descarga. Las grietas pueden ocurrir en arcillas que tengan un contenido de agua consistentemente arriba de su límite de contracción; se han encontrado fisuras en arcillas normalmente consolidadas con alto contenido de agua que no pueden haber sido causadas por secado o por descarga. También se ha observado un incremento en la fragilidad (*friabilidad*) en trozos de arcilla blanda que se han almacenado por mucho tiempo; tal comportamiento se observa muchas

veces en la gelatina debido al envejecimiento. Se ha postulado que estos efectos son resultado de la *sinéresis*, que es la mutua atracción de partículas arcillosas para formar agregados estrechamente unidos con fisuras entre ellos, o por la remoción del potasio por intemperismo (Goldman y Greenfield, 1988; Mitchell, 1993).

El proceso por el cual un gel se contrae sin evaporación del disolvente se conoce como sinéresis. En el estado de gel, los sedimentos son cohesivos y pueden fallar de una forma frágil sin la presencia de agentes cementantes. La sinéresis es un proceso complejo que puede ocurrir en coloides de muy contrastante estructura y composición, por lo que no deben hacerse generalizaciones respecto de la naturaleza de las interacciones partícula-solvente durante dicho fenómeno (Dewhurst, 1998). Pruebas con geles muestran que la sinéresis se debe a una contracción volumétrica de la estructura del gel por la expulsión de la fase del fluido de sus intersticios. Experimentalmente se estudiaron los mecanismos de la contracción de lechadas de aluminosilicatos, investigándose la influencia de la temperatura y composición de la mezcla en la sinéresis. Se mostró que la sinéresis debe ser principalmente un proceso de contracción química y que las únicas fuerzas identificadas que trabajan en contra de ella son las de adhesión superficial o trabazón mecánica. Se encontró que la sinéresis no ocurre si existe suficiente vinculación en la interfase gel-matriz, o en todo caso hasta muy extensos periodos, y que solamente a altas temperaturas se tiene un efecto significativo, esto es, al incrementar la temperatura de 20 a 55°C (Jefferis y Sheikh, 1995).

### *3.3 Arcillas como partículas coloidales*

En los suelos, las partículas insolubles del tamaño de la arcilla y de limo fino se clasifican como coloides, en cuanto a que son partículas sólidas de muy baja solubilidad con un diámetro entre 0.01 y 10  $\mu\text{m}$ . No obstante que la composición puede variar desde la de un mineral de arcilla, hidróxido metálico o humus, hasta la de una combinación de material orgánico e inorgánico, la característica de un coloide es que no se disuelve en agua para formar soluciones, sino que permanece en una fase sólida en suspensión.

En comparación con otros coloides hidrófilos que tienen tal afinidad por el agua que forman espontáneamente soluciones coloidales, las arcillas se consideran hidrófobos, aun cuando el agua las humedece y es adsorbida en las superficies de sus partículas. Las suspensiones de arcillas en agua son entonces hidrosoles hidrófobos que constituyen un sistema de dos fases, cuyas pequeñas partículas sólidas tienen una gran área superficial con un comportamiento dominado por fuerzas de superficie y que pueden coagular en presencia de pequeñas cantidades de sal (Mitchell, 1993).

Los soles hidrófobos, como las arcillas, son sistemas irreversibles, pues la aglomeración de sus partículas es un proceso irreversible, ya que las partículas no son capaces de desligarse espontáneamente, por el simple contacto con el agua, tan rápido o más de lo que se asocian (Nekrásov, 1981; Van Olphen, 1963). Las propiedades del sistema minerales arcillosos-agua se rigen por las leyes de la química coloidal; éstas dependen de las proporciones de la fase dispersa (minerales arcillosos) y de la fase dispersante (agua).

### 3.3.1 Definición y clasificación de arcillas

El término arcilla puede resultar ambiguo, pues se aplica tanto a un tamaño de partícula como a un tipo de mineral, aunque la cantidad de éste en los suelos se aproxima a la de material menor de dicho tamaño. Se denomina como arcilla a un producto natural, originado a partir de la meteorización de las rocas, cuyas partículas son generalmente microscópicas y submicroscópicas, constituido principalmente por aluminosilicatos de origen secundario (minerales propios de la arcilla) y componentes accesorios, primarios, secundarios u orgánicos, en el cual radica gran parte de la actividad fisicoquímica del suelo (Besoain, 1985). En su mayoría, dichas partículas están en el intervalo coloidal ( $< 1 \mu\text{m}$ ), aunque para efecto de aplicaciones en ingeniería se considera como límite superior  $2 \mu\text{m}$  (Mitchell, 1993). El término mineral de arcilla se aplica en general a los aluminosilicatos hidratados de tamaños muy pequeños con gran área específica, más o menos cristalizados, algunos con sustitución parcial o total del aluminio por magnesio o hierro y que incluyen como constituyentes, en ciertos casos, elementos alcalinos o alcalinotérreos. Estas partículas se clasifican según su estructura cristalina, y son minerales que predominan en la fracción arcillosa del suelo en estados intermedios y avanzados de intemperismo (Sposito, 1989). El grupo de los aluminosilicatos amorfos y paracrystalinos, con sus representantes alófana e imogolita, pese a su estructura poco definida, se incluye dentro de los minerales de arcilla. Según otra definición, se consideran como minerales arcillosos aquellos que además de tener pequeño tamaño de partícula, presentan una carga eléctrica superficial y una alta resistencia al intemperismo, y además desarrollan plasticidad cuando se les mezcla con cierta cantidad de agua (Grim, 1953); asimismo, la mayoría de las especies de minerales de arcilla presentan una forma laminar y, en algunos casos, fibrosa o tubular, a diferencia de los minerales no arcillosos compuestos principalmente por partículas de forma voluminosa (Mitchell, 1993).

En la práctica se reconocen dos tipos generales de arcillas: las silíceas, características de las regiones templadas, y las arcillas de hidróxidos (con óxidos hidratados de hierro y aluminio), que se encuentran en las regiones tropicales y subtropicales, mezcladas con las arcillas silíceas (Lyon y Buckman, 1956; Cepeda, 1991). Se sabe que en los suelos de regiones templadas los materiales cristalinos son más importantes, mientras que las propiedades de muchos suelos en los trópicos y en regiones volcánicas las deciden sus componentes amorfos (Bornemisza, 1982).

Dependiendo de su procedencia, las arcillas se clasifican en sedimentarias y residuales. Las arcillas sedimentarias, a su vez, pueden ser de origen marino, fluvial, lacustre, eólico y glacial. Son arcillas que han sido transportadas mecánicamente, y forman depósitos lejos de su lugar de origen; generalmente tienen alta plasticidad y variedad de tamaños, y su complejidad radica en que contienen una mezcla de varios minerales, materia orgánica, sales y otras impurezas. Por su parte, las arcillas residuales se han formado en el lugar de procedencia en respuesta al material parental, clima, topografía y condición de drenaje; son no uniformes y pueden retener elementos de la estructura de material no alterado de la roca original. Usualmente tienen baja plasticidad y poco contenido de materia orgánica. Los suelos tropicales, la saprolita, el granito descompuesto y los suelos coluviales son ejemplos de suelos residuales (Mitchell, 1993).



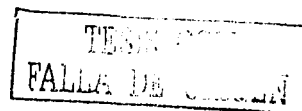
Las arcillas pueden también clasificarse en función de la capacidad de hinchamiento, o bien mediante criterios estructurales y químicos. Ciertas arcillas tienen la capacidad de cambiar de volumen por absorción de moléculas de agua y otros iones polares dentro de su estructura; la capacidad de expansión depende de la estructura laminar y de la magnitud de las cargas residuales. Según la absorción de agua puede hablarse de tres grupos (Ortega, 2003):

- 1) *Esmectitas*: absorción con incremento de volumen (expansibles)
- 2) *Sepiolita-paligorskita*: absorción sin incremento de volumen (no expansibles con importante capacidad de sorción)
- 3) *Ilita-clorita-caolinita*: prácticamente sin absorción (no expansibles)

Con el fin de tener alguna referencia para identificar muestras de suelos arcillosos, en la tabla 3.2 se resumen ciertas características de algunos minerales arcillosos que son relativamente comunes en los suelos de interés ingenieril; los valores indicados son generales, y pueden diferir según el autor que se consulte, así como el tipo particular de arcilla; en la haloisita, por ejemplo, a menor tamaño de partícula la CIC aumenta.

Tabla 3.2 Características minerales de arcilla (Mitchell, 1993; Cordero, 1997)

Arcilla	Ss	CIC (mcg/100 g)	d (Å)	Tamaño	Forma
Caolinita	2.60-2.68	3-15	7.2	0.1-4 X 0.05-2 µm (individual) 3000-4000 (pilas)	Hojuelas hexagonales Agregados vermiformes
Haloisita	2.0-2.2	10-50	10.1	0.07-0.04 X 1 µm	Laminar Tubular Esferoidal
Metahaloisita	2.55-2.56	5-15	7.2		
Montmorilonita	2.35-2.7	80-150	9.6	10 Å (mín.) X 10 µm (máx.)	Hojuelas de lados similares
Ilita	2.6-3.0	10-40	10.0	0.003-0.1 µm X 10 µm (máx.)	Láminas poligonales de grosor variable Agregados en forma de bastones
Clorita	2.6-2.96	10-40	14.0	1 µm	Hojuelas
Sepiolita	2.08	20-30			Hojuelas o fibras
Paligorskita		20-30		4-5 µm (máx.) X 50-100 Å	Listones Agujas agrupadas en paquetes
Alófana				0.05-1.0 µm	Irregular, algo redondeada
Imogolita				10-30 nm	Filamentos planos y curvados, de dos o más unidades filiformes



El criterio de clasificación estructural, que es el más importante, considera el espaciamiento entre las hojas laminares de las estructuras cristalinas de las arcillas, distancia basal, y el tipo de sustitución octaédrica. Los sitios octaédricos pueden ser de dos tipos: 1) trioctaédricos, ocupados con tres iones divalentes ( $3R^{+2}$ ); 2) dioctaédricos, con dos iones trivalentes ( $2R^{+3}$ ). En la tabla 3.3 se presenta una propuesta de clasificación estructural.

Tabla 3.3 Clasificación estructural de arcillas (Ortega, 2003)

Tipo de lámina	Grupo	Subgrupo	Especie	
1:1	Serpentina-caolín ( $z \approx 0$ )	Serpentina (Tr)	Crisolito, antigorita	
		Caolín (Di)	Caolinita.	
			Haloisita	
				Metahaloisita
	Talco-pirofilita ( $z \approx 0$ )	Talco (Tr)	Talco	
		Pirofilita (Di)	Pirofilita	
	Esmectita ( $0.2 \leq z \leq 0.6$ )	Esmectita (Tr)	Saponita, hectorita	
		Esmectita (Di)	Montmorilonita, nontronita	
	Vermiculita ( $0.6 \leq z \leq 0.9$ )	Vermiculita (Tr)	-	
		Vermiculita (Di)	-	
2:1	Ilita ( $0.6 \leq z \leq 0.9$ )	Ilita (Tr)	-	
		Ilita (Di)	Ilita	
	Mica ( $z \approx 1$ )	Mica (Tr)	Biotita	
		Mica (Di)	Moscovita	
	Mica frágil ( $z \approx 2$ )	Mica frágil (Di)	Margarita	
	Clorita ( $z$ variable)	Clorita (Tr)	Nombre común basado en $Fe^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Mn^{2+}$ y $Ni^{2+}$	
		Clorita (Di)	Donbassita	
Clorita (Di, Tr)		Sudoita, cookeita (Li)		
2:1	Sepiolita-paligorskita ( $z$ variable)	Sepiolita	Sepiolita	
		Paligorskita	Paligorskita	

Tr = trioctaédrico; Di = dioctaédrico;  $z$  = carga por fórmula unitaria

Desde el punto de vista químico todas las arcillas contienen  $SiO_2$ , en tanto que los elementos Al, Mg, Fe, K, Na y Ca son indicadores útiles del tipo de arcilla. Asimismo, es posible distinguir dos grandes grupos de sustancias entre estos minerales de tamaño de arcilla:

- a) Los silicatos, que se subdividen en filosilicatos o silicatos laminares, silicatos fibrosos y silicatos amorfos (poco cristalinos). Asimismo, en este grupo se incluyen los tectosilicatos (zeolitas), debido a que son minerales de silicio que se presentan en forma natural, donde la carga eléctrica de sus partículas se adquiere de manera similar a la de arcillas
- b) Óxidos y óxidos hidratados, que se subdividen en formas cristalinas y formas amorfas.

### 3.3.1.1 Filosilicatos

Los minerales de arcilla se producen de manera primordial por el intemperismo sobre feldespatos y micas. Forman parte de un grupo complejo de aluminosilicatos de potasio, magnesio y hierro, conocidos como minerales de red laminar. Son de tamaño muy pequeño y de forma muy plana, por lo que poseen un área superficial considerable. Las unidades básicas son el tetraedro de sílice y el octaedro de alúmina (gibbsite) o de magnesio (brucita), donde los iones metálicos (valencia positiva) están en el interior y los iones negativos no metálicos forman el exterior. Las estructuras laminares se forman cuando los iones oxígeno se enlazan covalentemente entre varias unidades (fig. 3.8).

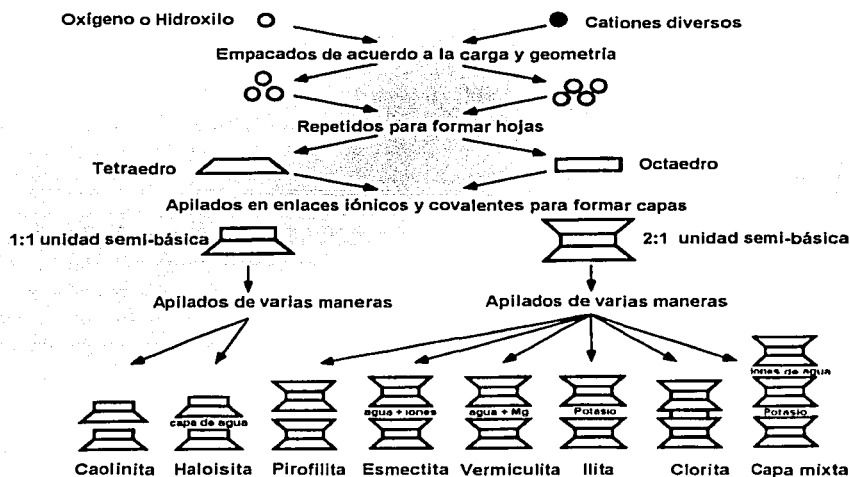
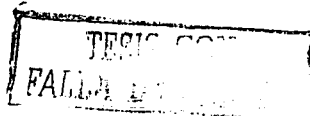


Fig. 3.8 Filossilicatos (Mitchell, 1993)

En conformidad con la nomenclatura de la Sociedad de Minerales de Arcilla se usan los siguientes términos: un plano de átomos, una hoja (lámina) de unidad estructural básica, y una capa de celdas unitarias compuestas de dos, tres o cuatro láminas. Según el número y la clase de láminas que configuran el mineral, se acostumbra distinguir las cuatro subdivisiones siguientes:



*Minerales 1:1 o dimórficos.* Se les denomina también minerales caoliniticos. La caolinita y la haloisita pertenecen a este grupo. El primero es el mineral de arcilla típico de suelos antiguos, muy meteorizados. La caolinita es una arcilla refractaria rica en óxidos metálicos con la propiedad de ser muy resistente al calor, la carga superficial se debe a efectos químicos de superficie, como se puede comprobar al comparar el efecto del pH de la solución en la movilidad. La caolinita es, en sí misma, un mineral de arcilla no expansible, que presenta baja capacidad para fijar potasio y amonio, en forma de laminilla normalmente constituido por pilas de láminas con una distribución muy ordenada, que alcanzan a veces tamaños de arena, por lo que a estas partículas y al estado físico que imparten a los suelos se les llama, respectivamente, pseudoarenas y agregados secundarios (Bornemisza, 1982; Cepeda, 1991). La unión entre las capas de estos minerales es bastante estable (puentes de hidrógeno). Otro miembro de este grupo, importante en los suelos derivados de ceniza volcánica y que aparece en algunos suelos tropicales, es la haloisita, cuyas capas están separadas por moléculas de agua (hidrato de entrecapa). Las haloisitas geológicas se presentan constituyendo masas blancas. En contraste con la mayor parte de las demás arcillas que son laminares, las de haloisita pueden ser tubulares, en forma de bastón o de aguja y esferoidales (por posible herencia de la alófana). A bajas temperaturas (60-75°C) se produce sólo una deshidratación parcial de la haloisita hidratada (endelita o hidrohaloisita), y para producir una deshidratación total, con colapso del espaciado (001) de 10.1 a 7.2 Å (metahaloisita), se requiere una temperatura alrededor de 400°C. Si se deshidrata a esta temperatura se obtiene un contenido de agua similar al de la caolinita. El hecho de que la haloisita se deshidrata irreversiblemente a temperaturas cercanas a la del ambiente y con una humedad relativa cercana al 100%, si bien en forma incompleta, hace extremadamente difícil estudiar a este material sin alteración; por tanto, deben tomarse las precauciones debidas al ensayar suelos con proporciones significativas de este mineral (Cordero, 1997; Whitlow, 1999).

Una *laterita* es un suelo con una relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  menor de 1.33; un *suelo laterítico* tiene una relación entre 1.33 y 2 (Mitchell, 1993). En la caolinita, esta relación varía entre 1.8 y 2.9. La proporción de elementos alcalinotérreos y alcalinos que penetran la estructura son mínimos y el contenido de hierro no sobrepasa 2%. Generalmente, los caolines sedimentarios están contaminados con titanio, que puede alcanzar valores de 1.3 a 3.5% expresado como  $\text{TiO}_2$ ; en los caolines primarios dicho contenido es inferior al 0.5%. La relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de la haloisita es similar a la de la caolinita (1.8 a 2.9), con mayor contenido de agua, y puede presentar impurezas de óxidos de hierro, cobre, magnesio, calcio y titanio. Una porción de los cationes de cambio en la superficie externa de los cristales es permanente, pero gran parte es dependiente de pH y radica en las uniones Si-O-Al en los bordes laterales, sobre los que operan los fenómenos de *protonación-desprotonación* (adsorción de  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ , respectivamente). Los coloides lateríticos (caolinita, haloisita) no se hinchan cualquiera que sea la naturaleza del ion adsorbido en el complejo de intercambio, pues están compuestos de arcillas de red cristalina fija. Sin embargo, ya que la estructura molecular de los caolines es semejante a una gran molécula bidimensional enlazada por puentes de hidrógeno, por ejemplo Al-OH-O-Si, éstos pueden romperse por la acción de ciertos compuestos que tienen la facilidad de penetrar el espacio interlaminar, expandiéndola de 7.2 a 10.7 Å. En condiciones adecuadas, ciertos compuestos son capaces de expandir los cristales de la haloisita

hidratada y otros miembros del grupo de la caolinita. Generalmente, este fenómeno se ha observado con sales de ácidos carboxílicos de bajo peso molecular y grandes cationes (K, Rb, Cs, NH<sub>4</sub>), los que se intercalan como sales totales, por lo que a este proceso se le denomina intersalación. La intersalación se puede lograr moliendo el mineral con los cristales húmedos de las sales, o por medio del contacto del mineral con soluciones saturadas. Aparentemente, una condición para la intersalación es un bajo grado de ionización de la sal (Van Olphen, 1963).

*Minerales 2:1 o trimórficos.* Entre ellos está el grupo de las esmectitas (minerales montmoriloníticos que se caracterizan por su propiedad de expandirse) y el grupo de las ilitas o micas hidratadas (incluyen las vermiculitas); en ambos la carga de superficie se deriva principalmente de la sustitución isomórfica que da origen a una deficiencia de carga, y a fenómenos de intercambio internos y externos. La diferencia entre las esmectitas y las ilitas es que en aquéllas la sustitución isomórfica ocurre en la hoja octaédrica, en medio de la unidad, originando grandes espacios, mientras que las ilitas tienen una sustitución en las hojas tetraédricas, es decir, en la superficie misma de las hojas, por lo que la unidad se mantiene en una posición fija, evitando la expansión debido a la alta carga residual. Las micas son aislantes térmicos debido al espacio interlaminar, el cual no es un buen conductor térmico o eléctrico (las hojas están desconectadas entre sí, lo que impide el paso del fluido térmico o eléctrico). El desplazamiento de mica hacia ilita y montmorilonita se puede lograr por disminución de la actividad del ion K<sup>+</sup>, lo que determina la expansión de la red. Los procesos de secamiento aceleran la liberación de K<sup>+</sup> desde las micas si el nivel de potasio de intercambio es suficientemente bajo. Inversamente, la adición de un alto nivel de potasio tiende, por ley de acción de masas, a invertir el efecto. También el secado y congelamiento del suelo puede facilitar el desplazamiento opuesto, al permitir que las laminillas se junten y se pueda formar el puente entre ellas (Gavande, 1982; Cordero, 1997). Tanto las montmorilonitas como las ilitas presentan alta capacidad de fijación de potasio y amonio. Las ilitas son los minerales de arcilla más abundantes en los sedimentos y en suelos frecuentemente encontrados en la práctica de la ingeniería (Mitchell, 1993; Cordero, 1997).

*Minerales 2:2 ó 2:2:1, o tetramórficos.* Las cloritas pertenecen a este grupo, que tiene algunos aspectos en común con las micas, y se considera que está compuesto de una capa de micas (2:1) y una capa octaédrica adicional de un óxido hidratado, como la brucita, de lo que resulta el mineral 2:1:1. Las cloritas están ampliamente distribuidas en el suelo, aunque son, en general, un componente menor de las arcillas totales. Puede ser residuo de minerales primarios o formarse a partir de arcillas.

*Minerales interestratificados o de capas mezcladas.* Los minerales arcillosos interestratificados son filosilicatos, en los cuales dos o más capas de diferentes minerales de los grupos anteriores se mezclan en una secuencia de apilamiento vertical, para formar un solo cristal o dominio difractante a los rayos X. No son sólo mezclas físicas simples de las capas componentes, pues dicho mezclado es el resultado de una fuerte unión química dentro de las capas individuales, pero una unión débil entre capas (Cordero, 1997).

### 3.3.1.2 Silicatos fibrosos

Están formados por unidades 2:1. En comparación con los otros grupos de filosilicatos, en éstos se presenta un principio diferente de superposición de elementos (tetraedros y octaedros) de la celda unitaria, la cual tiene estrechos canales donde se localizan moléculas de agua y cationes intercambiables; la inversión de uno o dos pares de tetraedros forman dichos canales. Entre los silicatos fibrosos se conocen la sepiolita y la paligorskita; esta última se denomina también atapulgita, y se le encuentra asociada con las esmectitas, o con una mezcla de varias arcillas y materiales calcáreos. La atapulgita, junto con la imogolita, es de los pocos minerales arcillosos formados por bandas (cadenas dobles) de tetraedros de sílice; tiene una morfología parecida a listones o finas fibras. La sepiolita se diferencia por el grado de sustitución del magnesio por el aluminio (Besoin, 1985); asimismo, contiene más moléculas de agua en su estructura que la paligorskita. Estos minerales no se encuentran frecuentemente; la atapulgita se forma en suelos muy áridos, donde hay sales libres, y también en suelos calcáreos, poco meteorizados; comercialmente está disponible en algunas partes del mundo, como EUA. La sepiolita es más rara; en México existe paligorskita en Yucatán, y yacimientos de ésta mezclada con sepiolita en Campeche, y quizá se encuentre en otras regiones del país (Reyes, 1993; Ortega, 2003).

Los tipos de arcilla atapulgita y sepiolita son conocidos por sus excelentes propiedades neutralizadoras y del tipo de esponja; el atractivo de la atapulgita resulta de su estructura cristalina tridimensional, la cual semeja paquetes de agujas. Esta arcilla tiene una baja densidad aparente con una porosidad interna alta, de lo que resulta una gran área superficial que le confiere sus notables propiedades de sorción. Estas arcillas tienen una muy alta capacidad de retención, absorbiendo y soportando hasta 100% de su peso en líquidos. En su procesamiento industrial, los tratamientos de extrusión y calor producen una estructura más porosa que mejora la adsorción, la cual tiende a variar al incrementarse las temperaturas de calcinación, lo que le confiere propiedades zeolíticas.

Las partículas de atapulgita, debido a que consisten en cadenas en tres dimensiones, no se expanden. Tales arcillas tienen sólo moderadas propiedades tixotrópicas, quizá debido a la reducida tendencia de sus superficies externas a desarrollar espesores significativos de moléculas orientadas de agua. En estado natural, las partículas no se dispersan en agua; los contactos de las partículas tienden a promover la floculación y a resultar en suspensiones relativamente inestables con el tiempo, con alta viscosidad. Las mezclas dispersas producen bajas viscosidades y suspensiones estables (Grim 1962).

La atapulgita es empleada en la industria pues los lodos que la contienen presentan pequeñas variaciones en viscosidad y resistencia como gel al ser sometidas a grandes cambios en el contenido electrolítico. Por ejemplo, ha sido útil como lodo de perforación en ambientes salinos debido a su alta estabilidad en suspensiones (Mitchell, 1993). Pruebas índice de lodos de atapulgita indican que son más estables, y pueden proporcionar mayor resistencia a la degradación química, que las bentonitas y otras arcillas tradicionales cuando se les somete a flujos con un incremento en la valencia del catión, en la concentración electrolítica o un decremento en la constante dieléctrica.

La atapulgita, recientemente aplicada en la construcción de pantallas impermeables, tiene atractivos atributos de estabilidad y durabilidad a largo plazo que la hacen una posible alternativa como solución para contención de desechos. Sin embargo, faltan estudios de laboratorio y campo para comprobar su funcionamiento como material de revestimiento.

### 3.3.1.3 Silicatos amorfos (no cristalinos)

Las arcillas del grupo de la alófana se caracterizan por su bajo orden estructural cristalográfico; los compuestos de alófanos presentan una composición química muy variable; se presentan como partículas muy pequeñas y su forma es esférica, y generalmente se aglomeran para formar agregados de mayor tamaño (Besoin, 1985). Las propiedades de las alófanos varían mucho, siendo semejantes a las de las esmectitas cuando tienen magnesio, o a las de las haloisitas. Se caracterizan por su gran capacidad de adsorción de agua, que retiene en grado variable (11 a 100%) y pierde muy gradualmente. Son anfotéricas y la capacidad de intercambio iónico depende del pH (Cordero, 1997).

Al parecer son varias las modalidades de descomposición de la alófana: algunas dan origen a la metahaloisita y otras a la imogolita. Esta última tiene una estructura tubular. La imogolita se dispersa en un medio ácido y la alófana lo hace en un medio alcalino (pH de 3.5 y 10.2, respectivamente) (Cordero, 1997).

### 3.3.1.4 Tectosilicatos

Dentro de esta clase de aluminosilicatos cristalinos se encuentran las zeolitas, que tienen afinidad estructural con los feldespatos, pero que se diferencian por su estructura tridimensional o red abierta con una especie de celdas de dimensión molecular que contienen agua y cationes, y que permite el intercambio de iones y una deshidratación reversible. La zeolita consiste en una red aniónica gigante de átomos enlazados de silicio, oxígeno y aluminio hidratado, con cationes (generalmente de Na, en su forma natural) en los intersticios para equilibrar la carga; los tetraedros están dispuestos de modo que originan cavidades y un sistema de canales interconectados. Existe cierta relación genética entre zeolitas y alófanos: según las condiciones ambientales, las cenizas volcánicas pueden alterarse y dar origen a unas u otras.

Una de las aplicaciones de las zeolitas es la de usarla como tamiz o malla molecular. El tamaño de la ventana de poro de las zeolitas puede calibrarse mediante un intercambio controlado en el que debe considerarse el diámetro cinético de las moléculas. Una zeolita en la que el sodio es intercambiado por el potasio, que es de mayor dimensión, disminuye el tamaño de su poro a un valor de 3 Å. Análogamente es posible sustituir los sodios por calcio. Por otra parte, el radio iónico del  $\text{Ca}^{2+}$  y del  $\text{Na}^+$  son aproximadamente iguales, pero ya que para balancear las cargas de la estructura zeolítica sólo se requiere de un  $\text{Ca}^{2+}$  por cada dos  $\text{Na}^+$ , la abertura de poro está más libre y aumenta de 4.2 a 5 Å al pasar de la forma sódica a la cálcica (Bosch y Schifter, 1991). Por otra parte, la temperatura debe tomarse en cuenta, pues el tamaño de poro aumenta notablemente entre 77 y 420°K (-196 a 147°C), permitiendo que al elevar la temperatura ciertas moléculas se difundan en las cavidades ocupadas por agua a temperatura ambiente. Para las zeolitas la adsorción de sales neutras es baja hasta que las concentraciones son mayores de 1 mol/kg (Fletcher, 1993).

### 3.3.1.5 Óxidos e hidróxidos

En los suelos, la gibsita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) es el óxido de Al dominante, mientras que la goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) y la limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ) son los hidróxidos de Fe más importantes. El número de cargas negativas por micela es muy pequeño y tienen menor poder de adsorción que la caolinita; muchos óxidos hidratados no son tan viscosos, plásticos y cohesivos como son los silicatos (Ortiz y Ortiz, 1988).

Los óxidos libres e hidróxidos pueden estar presentes en suelos, incluyendo compuestos cristalinos y no cristalinos (amorfos) de sílice, aluminio y hierro. Estos materiales pueden ocurrir como partículas discretas o como recubrimientos de partículas en forma de geles o precipitados, y también como agentes cementantes entre ellas.

Un aspecto importante de los óxidos de hierro (aplicable a los oxihidróxidos e hidróxidos de aluminio) es que tienen un comportamiento anfotérico y contribuyen considerablemente a la *capacidad tampón (buffer)* de los suelos ricos en ellos. Estos materiales producen características físicas en el suelo tales como agregados firmes y estables al humedecimiento (Besoin, 1985).

Aunque prácticamente en todos los suelos existen al menos pequeñas cantidades de óxidos y óxidos hidratados coloidales, éstos son particularmente comunes en los suelos formados a partir de cenizas volcánicas (andosoles) y en suelos residuales tropicales (lateríticos).

### 3.3.2 Agua en el suelo

El volumen de agua en un suelo de interés en ingeniería regularmente es igual o mayor que el volumen del material sólido. El agua es fuertemente atraída a la superficie de las partículas, lo que influye en sus propiedades; a una distancia de 1.0 nm, esto es, tres capas moleculares, el agua tiene una estructura diferente de la normal. Asimismo, los iones disueltos alteran la estructura del agua.

Los posibles mecanismos (fig. 3.9) para la interacción arcilla-agua incluyen: a) puentes de hidrógeno y probable efecto por atracción por fuerzas de dispersión de London; b) hidratación de cationes, importante en bajos contenidos de agua; c) atracción por ósmosis, significativa para contenidos de agua superiores a los mínimos requeridos para las primeras capas moleculares; d) orientación de dipolos en un campo eléctrico, aunque el mecanismo de atracción no es simplemente una adsorción de dipolos; parece más razonable una transición gradual de una estructura en la superficie (desorden en el arreglo de las moléculas de agua y alta movilidad lateral) y otra en el agua libre.



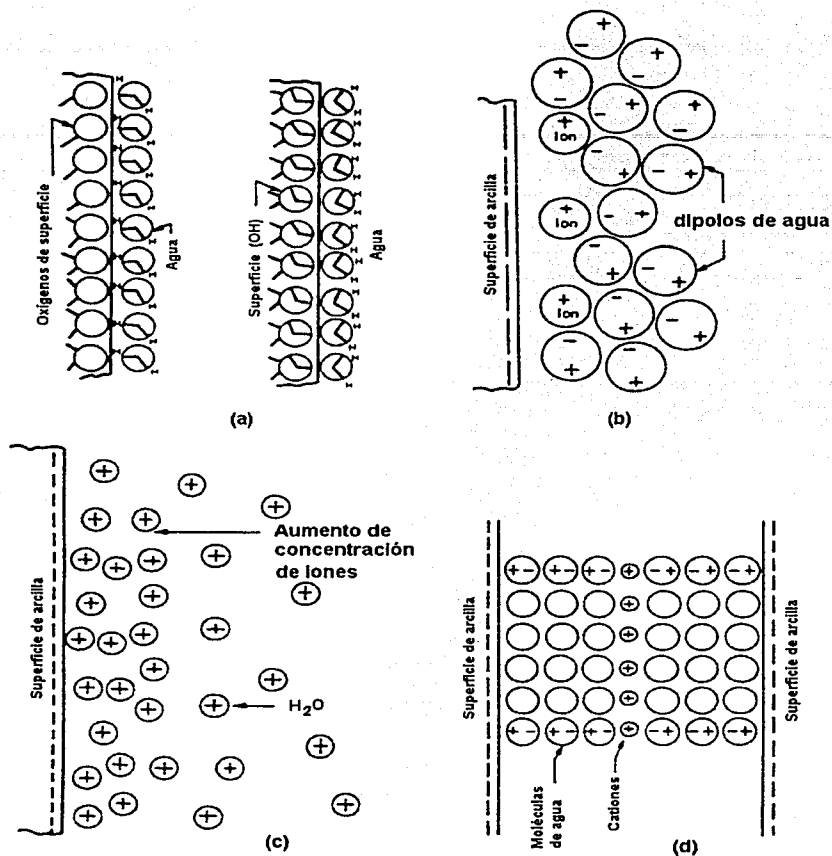


Fig. 3.9 Modelos de interacción suelo-agua (Mitchell, 1993)

Con base en valores de energía fijados en la curva de pF en función del contenido de agua, el agua retenida más o menos temporalmente por los suelos se puede clasificar en *higroscópica* ( $pF \geq 4.5$ ), *capilar* ( $4.5 > pF \geq 2.7$ ) y *gravitante* o de drenaje ( $pF < 2.7$ ). El agua higroscópica está formada por no más de 20 moléculas de agua; se supone que ordinariamente sólo parte del agua higroscópica puede eliminarse con 10 h de calentamiento a una temperatura de 105°C. Esta clase de agua casi no es líquida, mientras que la gravitante, aun cuando actúa como disolvente, generalmente es demasiado transitoria para constituir parte integral del suelo. El agua capilar abarca la humedad del suelo que exhibe el equilibrio líquido conocido como capilaridad; funciona en el suelo

química y físicamente en forma tal que justifica su nombre de *solución del suelo* (Lyon y Buckman, 1956) (fig. 3.10).

Usualmente se consideran dos sumandos del potencial capilar, que son el *matricial* y el *osmótico*; el matricial deriva de tener que vencer las fuerzas capilares consecuencia de la configuración de los poros de la matriz sólida del suelo. El potencial matricial o de la matriz del suelo (geométrico) está asociado con la atracción mutua de las moléculas de agua y con la afinidad de ésta por las superficies sólidas; parte del potencial matricial está formado por cargas de las superficies de los suelos originadas por *sustitución isomórfica* o por *ionización de grupos funcionales* (Cepeda, 2002). Comprende las fuerzas no equilibradas en la interfase aire-agua que dan origen a la tensión superficial; este potencial comprende otros fenómenos en los que es apropiada la analogía con el fenómeno de capilaridad; el potencial capilar puede cuantificarse con la magnitud designada como  $pF$ , que es el logaritmo decimal del potencial, considerado como una presión expresada, a su vez, en gramos-fuerza por  $\text{cm}^2$  o en centímetros de altura de columna de agua. Encima del nivel del agua subterránea es negativo, y por debajo de un nivel de agua libre se anula.

El efecto de la succión matricial es predominante, excepto en arcillas llamadas expansivas, en las que la expansión puede continuar, incluso, cuando la saturación es total y la succión matricial es nula. El potencial osmótico equivale al trabajo requerido para separar el agua que hidrata los iones, y se debe a que el agua de los poros tiene sales en disolución, y ejerce una succión osmótica que habría que vencer para trasladarla a una hipotética agua libre y pura. Para que exista un potencial y una presión osmótica es necesaria la presencia de una *membrana semipermeable*, que permita la *difusión* del disolvente en la dirección de mayor concentración de soluto, pero que impida el paso de las moléculas de éste; la presión osmótica es la que debe aplicarse sobre la membrana del lado de la solución para impedir que haya ósmosis cuando hay disolvente puro del otro lado (Crockford y Knight, 1983). En cuanto al papel del potencial osmótico en el comportamiento de los suelos, hay dificultad para separar los efectos de las sales disueltas sobre el potencial osmótico de los que ejercen sobre la doble capa; esto se debe a que existen diferencias de presión del agua cautiva próxima a la superficie respecto del agua libre dentro de los poros, y de ésta respecto de una masa de agua externa, coincidiendo esta última con el potencial matricial (Jiménez, 1990).

Si cierta cantidad de agua presente en los poros de un sólido no es suficiente para llenarlos completamente, su distribución será tal que se alcance el menor estado de energía, que puede considerarse como aquél en el que mejor se aprovechen las fuerzas de atracción, excepto por el efecto disruptivo causado por el calor, que puede favorecer un arreglo más desordenado. La progresiva ocupación del espacio poroso por el agua puede esquematizarse como el paso a través de cuatro niveles de aumento del contenido de agua (fig. 3.11): 1) material completamente seco, todos los poros vacíos; 2) las superficies de los grandes poros están secos y solamente los poros más pequeños (capilares) están llenos; esta distribución se basa en la suposición de que, por debajo de cierto diámetro, es más conveniente la saturación de poros, por pequeños que éstos sean y aun a costa del secado de los mayores. Este nivel principalmente se alcanza con el secado; 3) los capilares están llenos y las superficies de los grandes poros están provistos con una

película de agua. Este nivel se alcanza principalmente en el humedecimiento; 4) tanto capilares como grandes poros están llenos. Entre estos niveles existen otras intermedias. Cualquier contenido de agua arriba del nivel 3 debe permitir la transmisión de agua en fase líquida; este nivel se conoce también como equivalente al contenido de agua crítico. Dicho contenido de agua debe estar determinado por la naturaleza del material y la geometría del sistema poroso; sin embargo, la presencia de sales puede incrementarlo considerablemente, debido a la hidratación e higroscopicidad de los iones de la sal. Varios tipos de fuerza pueden causar el movimiento del agua líquida en un sólido poroso (Torraca, 1988):

- a) **Succión:** movimiento de una región en la que el contenido de agua está por encima del nivel 3 hacia un nivel inferior
- b) **Difusión:** puede darse con contenidos de agua superiores al nivel 3. El agua se mueve de una región con mayor contenido de agua a otra con menor contenido
- c) **Ósmosis:** al disolverse las sales en el agua y disociarse en iones, éstos atraen moléculas de agua por medio de fuerzas eléctricas (hidratación); como consecuencia el agua se mueve de regiones con pocos iones (baja concentración de sal) hacia regiones con más iones (alta concentración)
- d) **Electroósmosis:** dentro de un cuerpo sujeto a un campo eléctrico el agua migra hacia el polo negativo; si hay iones presentes, éstos migran al polo con carga opuesta, junto con el agua de hidratación
- e) **Termoósmosis:** en un sólido poroso húmedo, el agua se mueve de una región caliente hacia una fría.

Mientras que el mecanismo de succión puede ocurrir con existencia de áreas secas y húmedas, los demás mecanismos de transferencia de agua líquida se basan en la existencia de una película de agua continua a través de la cual se transmiten las moléculas de agua, por lo que dichos mecanismos requieren que el contenido de agua sea igual al de la tercera etapa o superior. El movimiento del agua a través de una membrana semipermeable puede darse en respuesta a un gradiente de concentración, temperatura y a un potencial eléctrico a través de una membrana semipermeable.

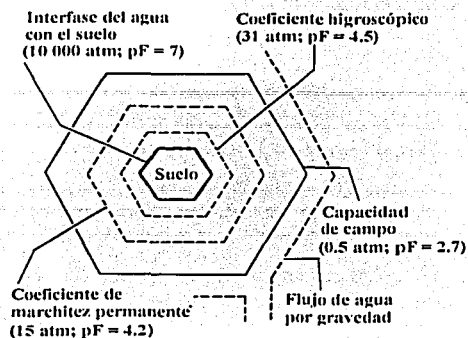


Fig. 3.10 Películas de agua del suelo y tensiones de retención (modificada de Aguilera, 1989)

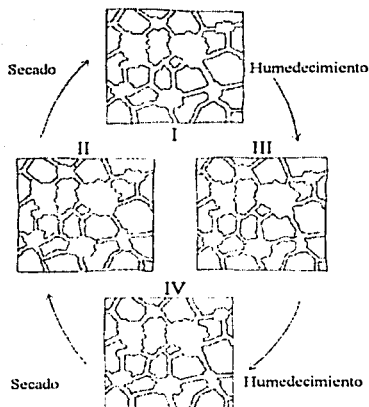


Fig. 3.11 Distribución del agua en un medio poroso hidrófilo (Torraca, 1988)

La pérdida de agua por exposición al aumento de temperatura y por contaminación con sales conduce a problemas de desecación y contracción. Se ha sugerido que el comienzo de la desecación y, por tanto, de la contracción, puede determinarse a partir de la relación del contenido de agua del suelo con su límite líquido (Whitlow, 1999):

Comienzo de la desecación:	$pF = 2$	$\omega = 0.5LL$
Contracción apreciable:	$pF = 3$	$\omega = 0.4LL$

Es importante considerar que el aumento de succión por extracción del líquido intersticial, por ejemplo por consolidación, no es equivalente al causado por desecación, donde la concentración salina del agua de poro aumenta y pueden producirse cristalizaciones que afectan la estructura del suelo (Marsal y Graue, 1969; Jiménez, 1990). Por otro lado, el esqueleto granular en la presencia de una mezcla de fluidos no miscibles experimenta los efectos de una tensión en la interfase y la generación de fuerzas capilares. Las fuerzas capilares entre partículas se agregan a las fuerzas del esqueleto lo que causa que el suelo se contraiga lo que incrementa la rigidez y la resistencia del suelo (al menos cuando se desarrollan condiciones internas homogéneas) (Di Maio *et al*, 2002).

Como ya se comentó, existen coloides hidrófilos e hidrófobos, en forma natural o por interacción con otros agentes. En la figura 3.12 se muestra la distribución del agua en superficies y poros hidrófilos e hidrófobos y el efecto correspondiente en la succión capilar.

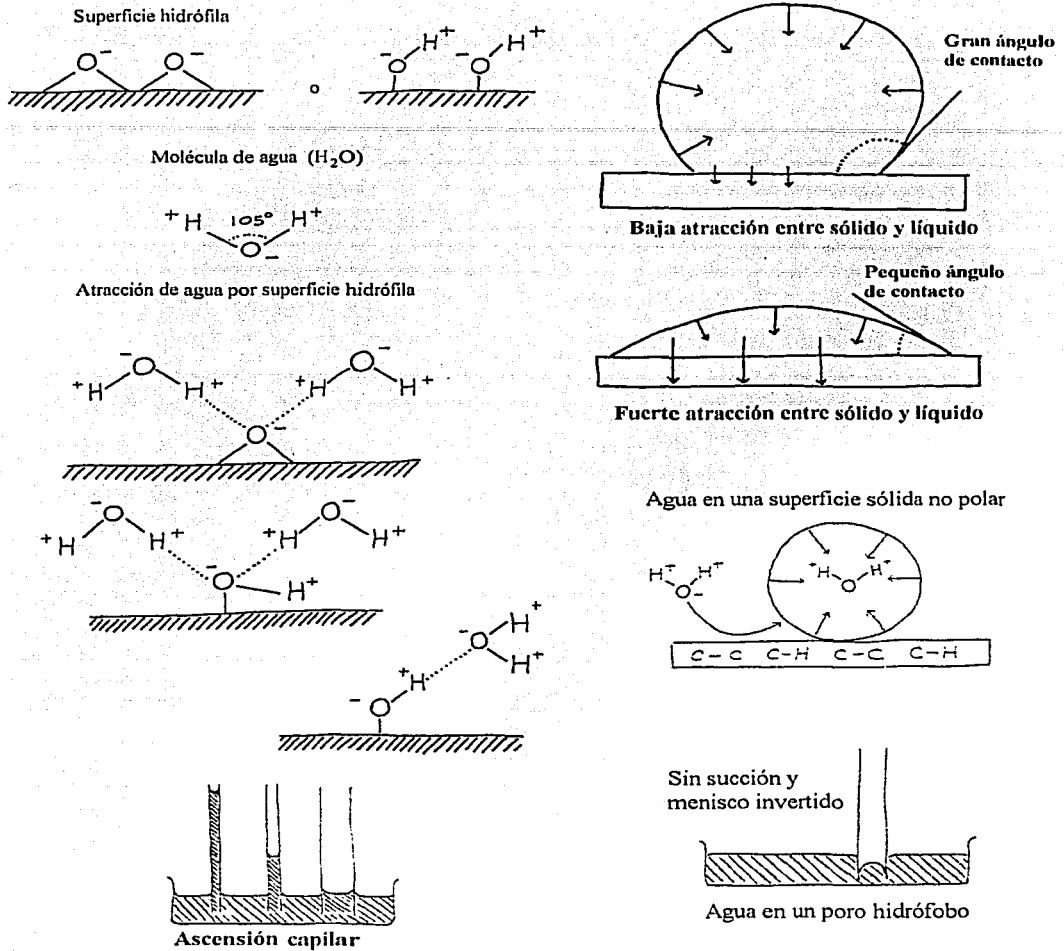


Fig. 3.12 Atracción del agua en superficies hidrófilas e hidrófobas (Torraca, 1988)

Un ajuste mutuo de las estructuras del agua y la arcilla se desarrolla durante la adsorción. Las propiedades termodinámicas e hidrodinámicas varían exponencialmente con la distancia de las partículas y los efectos de las interacciones superficiales pueden ser evidentes en distancias hasta de 10 nm. Eso corresponde a contenidos de agua de cerca de 800% en una esmectita pura completamente expandida y 15% en una caolinita pura (Mitchell, 1993).

El agua del espacio interlamilar, que aparentemente el agua toma la forma de hojas, está controlada por la naturaleza polar de las moléculas, el tamaño y carga de los cationes interlaminares, y el valor y localización de la carga laminar. El hinchamiento se da exclusivamente en la dirección (001) (Ortega, 2003). En particular, el agua de sorción y expansión se incrementa con la relación SiO<sub>2</sub>-sesquióxidos de los coloides, lo que indica que la sorción se correlaciona con la constitución de los aluminosilicatos responsables de las propiedades de los coloides. Además, la naturaleza del ion adsorbido juega una distinta función en el fenómeno de sorción de agua. La hidratación se explica en función en gran manera de la influencia orientadora de las superficies de los coloides, así como de los cationes adsorbidos sobre las moléculas dipolos. Aunque las suspensiones con Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> dispersan aproximadamente en la misma extensión, los sistemas saturados con K<sup>+</sup> se hidratan de manera similar que con Ca<sup>2+</sup> e H<sup>+</sup>. El tipo de expansión osmótica parece jugar un papel importante en coloides especiales (bentonitas y materia orgánica saturada de álcalis) (Baver y Winterkorn, 1935).

De acuerdo con conceptos teóricos relativos a la presión osmótica y datos experimentales, al incrementarse la concentración electrolítica, para una presión dada, el contenido de agua disminuye (Mitchell, 1993). Por otra parte, datos experimentales muestran que un incremento en la temperatura, que causa un aumento de la energía cinética de las moléculas de agua, produce una marcada disminución en la hidratación de las partículas. Para temperaturas cerca del punto de ebullición el coloide solamente está hidratado al 50% respecto a la temperatura ambiente. Dicha disminución fue una función uniforme del incremento de temperatura. Datos de higroscopicidad mostraron que, al incrementarse la temperatura de 30 a 40°C, la cantidad de agua adsorbida disminuye 50% (Baver y Winterkorn, 1935).

### 3.3.3 Doble capa difusa y efectos adicionales en suelos arcillosos

Los suelos están compuestos de cristales de carbonatos, silicatos, aluminatos u óxidos. Silicatos vítreos (material vídrroso, no cristalino) también están presentes ocasionalmente. Las superficies de estos cristales, o vidrios, son ricos en átomos de oxígeno, los cuales portan una carga eléctrica negativa. Por tanto, las superficies de las arcillas generalmente tienen un exceso de carga negativa. El espacio entre dos partículas arcillosas contiene agua con cationes y aniones. La densidad de cationes cerca de la superficie cargada negativamente es alta y disminuye al aumentar la distancia. A la superficie arcillosa cargada negativamente junto con la fase líquida adyacente se le llama la doble capa difusa.

Las correlaciones muestran que esta capa es sensitiva a variaciones en los parámetros del fluido de poro, que al sufrir modificaciones producen cambios en su espesor; según aumente o disminuya ésta, la estructura del suelo cambiará con tendencia a ser dispersa o floculada, respectivamente. Se debe aclarar que estos efectos son de carácter general, pudiendo presentarse comportamientos distintos en cierto tipo de mineral arcilloso en particular.

En general, a mayor grosor de doble capa menor tendencia a flocular de las partículas en suspensión, mayor presión de expansión del suelo, estructura dispersa y una menor

conductividad hidráulica. El comportamiento expansivo de la arcilla depende parcialmente de la concentración electrolítica dentro de la doble capa. Una reducción en el espesor puede ocurrir a través de desecación, intercambio iónico, e interacciones con ciertas especies químicas, lo que produce una estructura de suelo floculada, y puede causar la contracción de la arcilla y una mayor permeabilidad. Esto es un tópico importante en sitios de disposición de desechos, ya que es factible que la constante dieléctrica del lixiviado sea distinta de la del agua. El efecto del espesor de la doble capa de un suelo arcilloso en su comportamiento también depende del tamaño y del área de superficie específica de las partículas arcillosas. El comportamiento de minerales arcillosos más pequeños con gran superficie específica y carga elevada se ve más afectado por los cambios de espesor.

La teoría de Gouy-Chapman no toma en cuenta los siguientes efectos importantes sobre el espesor de la doble capa: términos de energía secundaria, campo eléctrico sobrepuesto y estructura de agua en la doble capa, tamaño del ion en la doble capa y pH (Mitchell, 1976). Dicha teoría no puede explicar completamente el comportamiento observado en los suelos naturales, debido a que éstos son en su mayoría una mezcla de diferentes minerales arcillosos, cada uno con un espesor diferente (Bagchi, 1990).

Los mecanismos de la química coloidal se usan para formular una expresión de la doble capa difusa. Tal y como es discutido por Evans (1991), la doble capa difusa es sensible a la variación de diversos parámetros. Normalmente se provoca una tendencia a la floculación al aumentar uno o varios de los siguientes parámetros del fluido de poro: concentración de electrolitos, valencia iónica y temperatura; o al disminuir uno o más de los siguientes: constante dieléctrica, tamaño del ion hidratado, adsorción de aniones en las partículas arcillosas y pH (Lambe y Whitman, 1987). En particular, el efecto del cambio de temperatura en la doble capa es difícil de predecir, debido a que la constante dieléctrica también depende de la temperatura. Para el agua, el espesor de la doble capa no será influido sensiblemente debido a un cambio de temperatura en un intervalo de 0 a 60°C (Mitchell, 1993).

Entre los factores adicionales que afectan la doble capa están los siguientes:

- 1) Efecto del tamaño del ión. La teoría de Gouy-Chapman ha sido modificada para tomar en cuenta el tamaño del ion (teoría de Stern). La capa de Stern consiste en contracciones en una densa capa próxima a la superficie, con una capa difusa adyacente. A mayor tamaño del ion hidratado, mayor es la capa requerida para acomodar cationes en la superficie y mayor será la repulsión electrostática (capa de Stern):  $Li^+ > Na^+ > K^+$ . Los potenciales de Stern aumentan en el orden:

caolinita < illita < montmorillonita < paligorskita

También se observa que los potenciales medidos experimentalmente (a través de velocidades de coagulación) son mucho menores que los calculados con la teoría, siendo consistentes con los estudios que indican que cerca del 75% de los iones de la capa difusa residen alrededor de 10 Å de las superficies de las partículas (Sposito, 1989). No obstante, los conceptos de estabilidad de la suspensión y las influencias de

la composición del agua de poro en la estructura y propiedades de expansión que se deducen de la teoría clásica, generalmente, son válidas.

- 2) Asociaciones de placas de arcilla e interferencia de partículas. La teoría de la doble capa se deriva de la condición de partículas coloidales individuales e independientes. La realidad es que placas de capas unitarias de arcilla esparcidas por capas moleculares de agua se apilan en tactoides o *cuasicristales*. Cada ion solvatado por las moléculas de agua actúa como un enlace cruzado, el cual se forma probablemente con cualquier tipo de esmectita y catión divalente o monovalente. El número de placas por cuasicristal varía de una a siete y se incrementa en el orden  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+}$ . En minerales de arcilla no expansivos, como la caolinita e illita, la situación es distinta; sus partículas individuales son de mayor espesor que las placas de esmectita y pueden consistir en varios cientos de capas de celdas unitarias. Por tanto, el espesor de la doble capa difusa y su efecto en el comportamiento de los sedimentos es comparativamente menor, mientras que la fuerza de gravedad cobra importancia en las suspensiones, donde se presentan interferencias físicas de partículas.
- 3) Efecto del pH. Las partículas de arcilla tienen hidroxilos  $(\text{OH})^-$  expuestos en sus superficies y bordes, y cuya tendencia a disociarse en el agua es fuertemente influida por el pH. A mayor valor de pH, mayor es la tendencia a entrar en solución para el  $\text{H}^+$ , y mayor será la carga negativa de cada partícula. Por otra parte, la alúmina, expuesta en los bordes de las partículas, es anfótera y se ioniza positiva o negativamente para valores bajos o altos de pH, respectivamente. Consecuentemente, se pueden desarrollar capas difusas positivas en los bordes de algunas partículas de arcilla en ambientes ácidos. Estas capas son del tipo de superficie de potencial constante, a diferencia del tipo de superficie de carga constante, con el ion  $\text{H}^+$  como determinante de potencial. El pH afecta el comportamiento de las suspensiones. Un pH bajo ocasiona una interacción borde-cara, que conduce por lo general a la floculación. Suspensiones estables o dispersiones de partículas de arcilla requieren usualmente de condiciones de pH alto.
- 4) Efectos de la adsorción de aniones. Algunos tipos de aniones pueden ser atraídos e incorporados como parte esencial de las superficies y bordes de las partículas e incrementar, por tanto, su electronegatividad, espesor de la doble capa y tendencia a la dispersión. Dentro de esta categoría están ciertos radicales cargados negativamente, similares en tamaño y geometría al tetraedro de siliceo, como el fosfato. Los aniones, como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y ciertos tenso activos, adsorbidos en los bordes de las partículas forman complejos con los iones de octaedros de alúmina, produciéndose una carga negativa en los bordes que previene la floculación por contacto entre cara y borde. Poco se sabe sobre los lugares de intercambio aniónico en las superficies basales, aunque la sustitución del  $(\text{OH})^-$  es un posible mecanismo para su existencia. Los aniones son intensamente retenidos cuando en los suelos predominan cargas positivas, como ocurre a un pH inferior al punto de carga cero. Algunos aniones son retenidos en muy alto grado y, en parte, irreversiblemente, como los ortofosfatos, mientras que la adsorción de otros aniones, como cloruros y nitratos, es mucho más débil; no obstante, se ha detectado que entre los suelos de superficie activa existen materiales como la alófana que también los adsorbe. El orden aproximado de desplazamiento de los



aniones inorgánicos más frecuentes es:  $\text{PO}_4^{-3} > \text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^{-} = \text{Cl}^{-}$  (Bornemisza, 1982). Se considera que los aniones, como cloruros y, en cierto grado, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos, se adsorben como parte del enjambre de iones de la capa difusa (Sposito, 1989). Algunos suelos volcánicos tienen cierta virtud para adsorber cloruros, la que aumenta con la acidez del suelo y la cantidad de cloro aplicado (Bornemisza, 1982). Por otra parte, la exclusión aniónica es una de las distintas características de las propiedades de suspensiones que contienen altas concentraciones de arcillas (Fletcher, 1993).

### 3.3.4 Origen y propiedades de las cargas eléctricas

El conocimiento del tipo de enlaces, estructuras cristalinas y características de superficie son importantes para conocer el tamaño, forma y estabilidad de las partículas de suelo y sus interacciones con líquidos y gases. El hecho de que los enlaces interatómicos en las partículas del suelo son del tipo de valencia primaria, más fuertes que los enlaces entre partículas, del tipo de valencia secundaria o puente de hidrógeno, implica que, en general, las masas de suelo se comportan como un conjunto de partículas donde el proceso de deformación es dominado por el desplazamiento entre partículas. De acuerdo con la teoría, las fuerzas de atracción dependen en cierta medida de la constante dieléctrica del fluido. Ya que la resistencia de los suelos depende en parte de las atracciones interparticulares, sería de esperar que la resistencia estuviera también influida por la constante dieléctrica (Mitchell, 1993).

El tipo de enlace entre las capas unitarias de los minerales de arcilla, asociado con las propiedades de adsorción de las superficies de las partículas, controlan la expansión del suelo. Los procesos de adsorción y desadsorción son importantes en las interacciones de sustancias químicas y suelos, que a su vez determinan el flujo y atenuación de dichas sustancias a través del suelo. Los enlaces que mantienen unidas a las capas unitarias pueden ser de distintos tipos, y ser lo suficientemente débiles, tal que los cambios en las fuerzas de superficie debidos a modificaciones en las condiciones del ambiente influyan en el comportamiento físico y químico de la arcilla y alteren el estado estructural de un suelo. Existen cinco tipos de enlaces entre las capas de silicatos: (1) Fuerzas de Van der Waals en capas paralelas neutras (pirofilita); (2) puentes de hidrógeno, además de fuerzas de Van der Waals, entre capas opuestas de hidroxilos, o de oxígenos e hidroxilos (caolinita, brucita y gibsitita); (3) enlace por medio de puente de hidrógeno entre capas de silicato neutras y las moléculas altamente polares de agua; (4) enlace entre capas por medio de cationes necesarios para la neutralidad eléctrica (por ejemplo, potasio en la illita); (5) unión débil entre capas por adsorción de moléculas polares y de cationes hidratados cuando la densidad de carga superficial es moderada, como en las esmectitas y vermiculitas (Sposito, 1989; Mitchell, 1993).

La reactividad superficial de la fase sólida de los suelos deriva del área superficial, resultado de la fina división de las partículas, y del comportamiento químico de los grupos funcionales de superficie de los suelos arcillosos. Un grupo funcional (parte de la molécula que le confiere las propiedades químicas) de superficie es una unidad molecular químicamente reactiva unida a la estructura de un sólido en su periferia, de tal manera que

sus componentes pueden ser bañados por un fluido. Cuando un grupo funcional reacciona con una molécula disuelta en un fluido circundante para formar una unidad estable se dice que existe un complejo superficial; en términos estructurales, se pueden distinguir dos amplias categorías: complejos superficiales de esfera interna, que implican enlaces iónicos y/o covalentes, y de esfera externa, donde al menos hay una molécula del solvente interpuesta entre el grupo funcional y la molécula enlazada, lo que implica mecanismos de enlace electrostático, y en consecuencia menos estables (figs. 3.13a y 3.14).

Se llama siloxano superficial al plano de átomos de oxígeno ligado a la hoja de tetraedros de silice en una capa de silicato de capas 2:1 (fig. 3.13b). El grupo funcional asociado con la superficie del siloxano es la cavidad hexagonal. Los cationes de esfera interna son sostenidos en dicha cavidad hexagonal. Se denominan como silanol y aluminol, respectivamente, a los grupos hidroxilo de superficie unidos al silicio y aluminio. Estos también son grupos funcionales de superficie (Van Olphen, 1963; Sposito, 1989; IGAC, 1995).

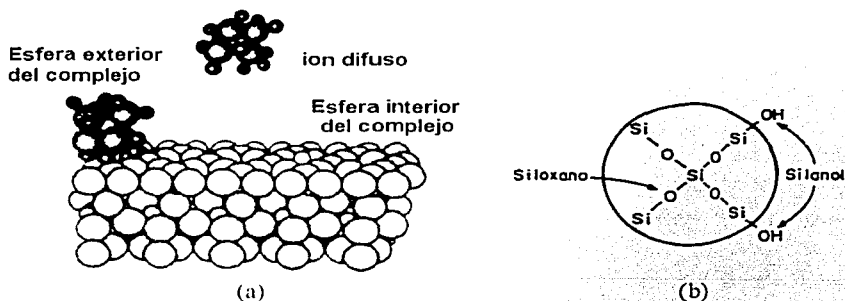


Fig. 3.13 *Mecanismos de adsorción de cationes en una superficie de siloxano (p. ej., montmorilonita) (a); condensación de grupos silanol (SiOH) mediante enlaces siloxano (Si-O-Si) (b) (Sposito, 1989; IGAC, 1995)*

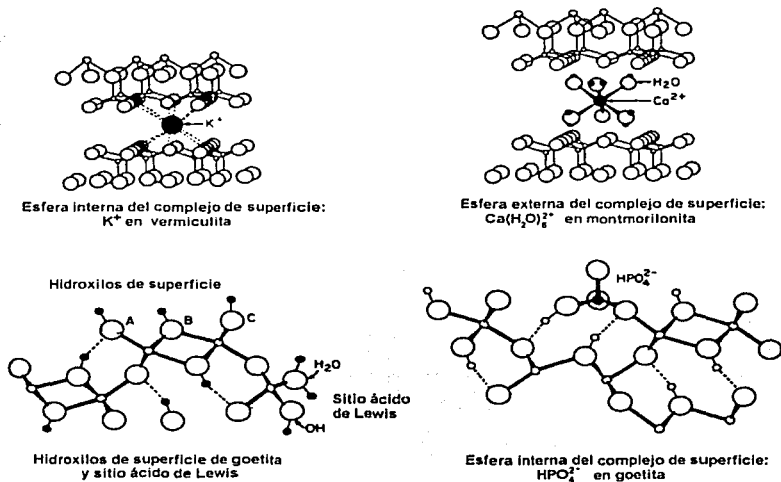
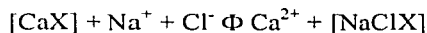


Fig. 3.14 Diversos mecanismos de adsorción (Sposito, 1989)

Los complejos de superficie de esfera externa incluyen la envolvente de solvatación del cation; otro mecanismo es el del enjambre de iones difusos, es decir, los iones que no forman complejos pero que neutralizan la carga de superficie, esto es, iones disociados de los grupos funcionales y libres de movimiento en la solución del suelo. Estos dos mecanismos reciben el nombre de adsorción no específica, por la débil dependencia de la configuración electrónica del grupo funcional y el ion que forma el complejo. Se considera que los iones fácilmente intercambiables son aquellos del complejo de esfera externa y los de la doble capa difusa, esto es, iones completamente solvatados adsorbidos de manera reversible, los cuales pueden reemplazarse fácilmente por lavado del suelo con una solución electrolítica de cierta composición, concentración y valor de pH (Brady, 1974; Sposito, 1989).

La adsorción de sal puede ser vista como la formación de un complejo de superficie. Por ejemplo, el reemplazo de sodio por calcio en la montmorillonita se acompaña de la reacción:



El complejo de superficie es la especie NaClX, que es semejante a la formación del par iónico NaCl cerca de la superficie de la arcilla (X). No es una molécula, sino una manera formal de describir iones cloruro en la interfase arcilla-agua (Fletcher, 1993).

Si la doble capa es creada por la adsorción de iones determinantes de potencial, el potencial eléctrico en la superficie de la partícula está determinado solamente por la concentración (o actividad) de estos iones en la solución (potencial de Nernst), ya que la

partícula actúa como un electrodo reversible hacia dichos iones. En los bordes de las placas de arcillas, las hojas de tetraedros de sílice y octaedro de alúmina se interrumpen y los enlaces primarios están rotos, situación similar a la de superficies de partículas de alúmina y sílice en sus respectivos soles; esto trae consigo la posibilidad de dobles capas dependientes de los iones determinantes de potencial, que serán positivas (con  $Al^{3+}$  en solución ácida) o negativas (con  $OH^-$  en solución alcalina) en la alúmina, y positivas en el caso de los tetraedros de sílice (la superficie de sílice negativa se vuelve positiva en presencia de pequeñas cantidades de iones de aluminio, por ejemplo como producto de la pequeña solubilidad de la arcilla). Se supone que iones como los cloruros no actúan como iones determinantes de potencial en partículas que tienen estructuras análogas a las de los bordes de las partículas de arcilla (Van Olphen, 1963). Por otra parte, sin embargo, se dice que una interfase es reversible (no polarizable) si las especies con carga pueden atravesarla libremente; la condición de equilibrio se alcanza cuando a través de dicha interfase la diferencia de potencial electroquímico es nula, esto es, cuando cesa el transporte de iones y, por tanto, el pH de la fase acuosa no cambia. En este sentido, en general, la interfase de un suelo es reversible, y cualquier especie con carga que sea adsorbida y que se encuentre en la solución del suelo es determinante de potencial (Sposito, 1984).

La adsorción en suelos es la acumulación neta de materia, en un arreglo bidimensional de moléculas o iones, entre las fases sólida y de solución acuosa del sistema. La adsorción se puede llevar a cabo por varios mecanismos, como se muestra en la figura 3.15. Según la naturaleza de las fuerzas de atracción que intervienen en la unión se habla de cambio iónico cuando éstas son electrostáticas; de adsorción física (particularmente en el caso de iones orgánicos), cuando son de Van der Waals o puentes de hidrógeno, y de adsorción química o quimisorción, cuando intervienen fuerzas químicas de enlace, especialmente uniones covalentes de diferentes tipos. Otro mecanismo de adsorción, común en soles hidrófobos, consiste en la adsorción de iones idénticos a los que constituyen el cristal (iones determinantes de potencial). Los suelos son sistemas muy complejos y heterogéneos, donde actúan al mismo tiempo diferentes fuerzas de retención. En ocasiones se puede determinar cuál es el proceso dominante, pero en general dicha operación es difícil y de resultados imprecisos.

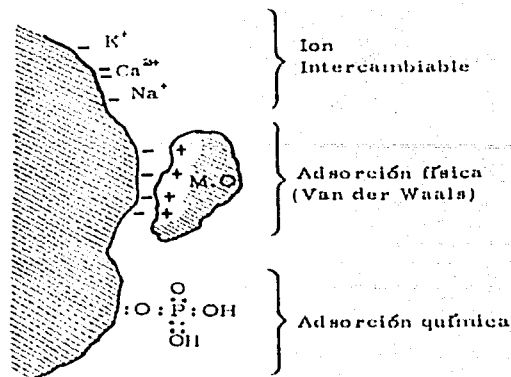


Fig. 3.15 Diferentes tipos de adsorción sobre una partícula de suelo (Bornemisza, 1982)

### 3.3.4.1 Capacidad de intercambio de iones

La carga de las partículas se obtiene por diferentes mecanismos. Uno de ellos se origina en el interior del cristal, mientras que los otros se deben a la adsorción de iones peptizantes. Por ello, existen diversas fuentes de capacidad de intercambio. Las superficies de partículas sólidas en los suelos desarrollan la carga eléctrica que genera la doble capa eléctrica principalmente de dos maneras: (1) por sustitución isomórfica entre iones de distinta valencia en los minerales del suelo, y (2) por deficiencias de carga provenientes de reacciones químicas en la superficie del mineral (Mitchell, 1976). Debido a que la contribución a la capacidad por cada una de estas fuentes depende de varios factores de ambiente y de composición, un cierto mineral de arcilla no tiene un valor único de capacidad de intercambio.

La carga de superficie negativa por causas estructurales es permanente y no es afectada por el pH, la valencia del contraión (iones con carga opuesta a la de la superficie), y el nivel electrolítico o composición de la solución del suelo de la solución que la rodea; no obstante, las cargas variables por reacciones químicas de superficie son directamente afectadas por el pH, nivel electrolítico, valencia de los contraiones, constante dieléctrica del medio y naturaleza del anión en la fase en solución. Al disminuir el pH la carga se hace menos negativa. Para una cierta solución y mineral de arcilla hay un pH característico en el cual la carga de superficie se anula; a este valor se le llama punto de carga cero (PZC), y se utiliza para caracterizar la abundancia relativa de las cargas positivas y negativas en los coloides. Si el pH disminuye más, entonces la superficie se vuelve positiva y, por tanto, actúa como intercambiador de aniones (Page, 1982; Goldman y Greenfield, 1988; Cepeda, 2002). Entonces, las superficies reaccionan como ácidos o bases con otros protones o hidroxilos, respectivamente (fig. 3.16).

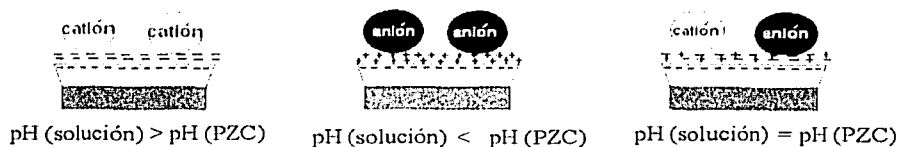


Fig. 3.16 Carga de superficie dependiente del pH  
(Di Maio et al, 2002)

Usualmente los cationes son atraídos a las superficies (001) y los aniones a los bordes (Ortega, 2003). La fuente principal de cargas dependientes del pH se basa en la ganancia o pérdida de  $\text{H}^+$  de los grupos funcionales de superficie, que incluyen al hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), carboxilos ( $-\text{COOH}$ ), fenólico y amino. Los sitios de intercambio aniónico pueden resultar a partir de grupos amino en el humus, enlaces en el borde de la partícula que terminan con un catión, iones hidroxilo provenientes de la ionización de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  o  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . La probabilidad de que se ionicen cantidades importantes de  $\text{OH}^-$  depende de los minerales que lo contengan y del pH. Por una parte, en suelos seniles muy lavados y meteorizados (caolinita) tienden a acumularse compuestos de Al y Fe, mientras que la capacidad de intercambio aniónico aumenta con la disminución de pH (Cepeda, 2002).

Los factores que regulan el poder de intercambio de cationes y de los que depende el grado hasta el cual se completan las reacciones de cambio son (1) la concentración: a mayor concentración de un catión mayor es su poder de sustitución; (2) naturaleza del ion añadido (ion reemplazante): iones de igual valencia son retenidos con mayor fuerza cuanto menor sea su hidratación; (3) la concentración y naturaleza del ion que está reemplazándose o cambiándose; y (4) de la concentración de los productos finales regulada por su solubilidad y grado de disociación (Bornemisza, 1982).

La facilidad de reemplazo depende, principalmente, de la valencia y de la relativa abundancia de los tipos de iones, en proporción directa, y es inversamente proporcional al tamaño del ion. Una típica serie de reemplazo de cationes es la siguiente:  $\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$ . Por medio de la ley de acción de masas es posible cambiar a un ion de alto poder de reemplazo por otro de menor capacidad. Asimismo, la selectividad de las superficies de arcilla para distintos iones es dependiente de la temperatura. La cantidad adsorbida, en general, disminuirá con el aumento de ésta, probablemente por la mayor movilidad de las partículas con más energía cinética.

La rapidez de intercambio varía con el tipo de arcilla, concentración de la solución, temperatura, etc. En general, sin embargo, las reacciones de intercambio son instantáneas en los minerales caoliniticos, mientras que toma más tiempo en las ilitas y aún más en las esmectitas, donde una parte de los sitios de intercambio está en las entrecapas.

El principal efecto de la concentración de sales sobre el pH no es a través de su influencia sobre el efecto en la suspensión, sino más bien a través del intercambio de cationes (Ortiz y Ortiz, 1988). Existe una relación entre el pH y el porcentaje de saturación de bases (SB) para distintos tipos de arcillas (fig. 3.17).

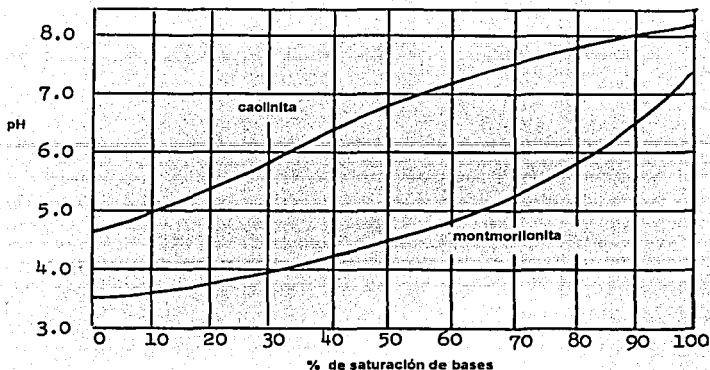
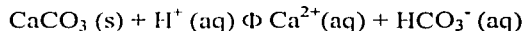


Fig. 17 Relación entre pH y porcentaje de saturación de bases para las arcillas caolinita y montmorilonita (Palmer y Troeh, 1989)

La acidez del suelo es común en todas las regiones donde la precipitación es alta, lo suficiente para lixiviar apreciables cantidades de bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos. La reacción ácida del suelo indica que el porcentaje de saturación de bases debe ser bajo. Esta acidez también es un índice de las proporciones relativas de bases.

En un suelo ácido hay dos grupos, que tienden a estar en equilibrio, de iones hidrógeno: los de la misma solución del suelo (acidez activa o real), y aquellos adsorbidos por el complejo coloidal, iones H retenidos en reserva (acidez intercambiable o potencial). El secado de los suelos, si se hace a temperaturas mayores que las usuales del terreno, provoca un marcado aumento de la acidez, probablemente por alguna transformación en la organización de la materia coloidal. La disminución del pH se debe a la liberación de la acidez de reserva por un intercambio de cationes, al liberarse calcio adsorbido, según la siguiente reacción que relaciona las fases sólidas (s) y acuosas (aq):



El transporte de los dos iones en el lado derecho de la ecuación se facilita por la formación del complejo soluble  $\text{CaHCO}_3^+$  (aq), el cual tiene menor carga que  $\text{Ca}^{2+}$ . Si el lavado es moderado y seguido del secado del suelo, la reacción es reversible y se forma calcita secundaria (Lyon y Buckman, 1956).

Si existe  $\text{H}^+$  en solución, debe estar en equilibrio con el  $\text{H}^+$  intercambiable (dentro de la doble capa difusa), y el no intercambiable (de los grupos OH) de las aristas arcillosas y compuestos orgánicos). Solamente en suelos ácidos con alto contenido de materia orgánica se presenta cierta cantidad de  $\text{H}^+$  intercambiable; sin embargo, se ha demostrado que los suelos minerales contienen muy poco, y que la acidez de cambio está relacionada con la presencia del aluminio en el complejo adsorbente, que pasa a la solución del suelo mediante el fenómeno de la hidrólisis. Los suelos también contienen pequeñas cantidades

de Fe, Mn y Zn intercambiables que, aunque en menor grado, son causantes de acidez al aceptar iones  $\text{OH}^-$  y formar compuestos insolubles. El pH disminuye al incrementarse la concentración de sales neutras en solución y con mayores cantidades de  $\text{CO}_2$  disuelto (Mitchell, 1993). Los cationes de las sales neutras se intercambiarán con el aluminio adsorbido (y quizás  $\text{H}^+$ ) y esto produce un aumento en la acidez de la solución del suelo. Los cationes divalentes usualmente tienen un mayor efecto en bajar el pH que los cationes monovalentes (Ortiz y Ortiz, 1988); asimismo, la acidez de cambio cobra importancia ante la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes industriales fisiológicamente ácidos, como el KCl (Cepeda, 2002).

La capacidad *tampón* (*buffer*) del suelo se refiere a la habilidad para mantener estable el pH de la solución del suelo cuando se añaden ácidos o bases. Las fases sólida y líquida del suelo poseen cualidades *buffer*, es decir, que pueden amortiguar el cambio brusco de acidez o alcalinidad de la solución del suelo. La acción *buffer* se explica por la presencia en el complejo coloidal de minerales con características de ácidos y bases débiles (con poca capacidad de disociación), materia orgánica, así como iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ . Una importante fuente de capacidad de neutralización de la acidez e intensidad *buffer* en la solución del suelo son las reacciones *redox* (reacción química en la que el estado de oxidación de una o más sustancias cambia), que principalmente favorecen un consumo de protones (Sposito, 1989). El principal mecanismo de que dispone el suelo para compensar los cambios y estabilizar el pH es la capacidad de intercambio catiónico; los cationes de cambio son básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.) y ácidos ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ). La capacidad de intercambio efectiva es igual a las cargas ocupadas por los cationes de intercambio y por la acidez intercambiante ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ); la capacidad de intercambio por suma de cationes es igual a la efectiva más la acidez total (incluye a la no intercambiante) (Cepeda, 2002).

#### 3.3.4.2 Tipos de cargas y de puntos de carga nula

Cuatro diferentes tipos de carga de superficie contribuyen a la carga neta total de la partícula, denotada por  $\sigma_{\text{P}}$ ; este parámetro puede ser positivo, cero, o negativo, dependiendo de las condiciones químicas del suelo. La carga estructural permanente,  $\sigma_{\text{O}}$ , es virtualmente negativa y predomina en suelos con etapas recientes de intemperismo (como las esmectitas);  $\sigma_{\text{H}}$  es la carga neta de protones, la cual es función del pH y predomina en suelos de avanzado estado de meteorización ricos en minerales que portan grupos reactivos OH, denominados suelos de carga variable (como la caolinita); el papel de la protonación (adsorción de  $\text{H}^+$ ) y desprotonación (adsorción de  $\text{OH}^-$ ) es más significativo en la cara octaédrica de minerales 1:1, así como en sitios con terminaciones  $\text{OH}^-$  de los bordes de minerales arcillosos 1:1 y 2:1.

A la suma algebraica de  $\sigma_{\text{O}}$  y  $\sigma_{\text{H}}$  se le da el nombre de carga de superficie intrínseca del suelo, para destacar que surge de componentes estructurales de los adsorbentes en el suelo, esto es, constituyentes iónicos de los minerales del suelo y grupos OH de superficie en sólidos inorgánicos y orgánicos. Además de la carga intrínseca, las partículas portan otra carga distinta y que se desarrolla solamente a partir de los constituyentes de la solución del suelo que están adsorbidos por las superficies de las partículas, y que son distintos de los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ ; entre éstos, están los iones adsorbidos específicamente en las cavidades internas de las superficies de los coloides (complejos de esfera interna) y la



capa de solvatación de los iones adsorbidos no específicamente y que forman un complejo exterior con los grupos funcionales superficiales de carga (complejos de esfera externa); a estos iones corresponden las cargas  $\sigma_{IS}$  y  $\sigma_{OS}$ , respectivamente. La carga neta de la partícula puede entonces representarse por la ecuación:

$$\sigma_p = \sigma_o + \sigma_{II} + \sigma_{IS} + \sigma_{OS} \quad (3.2)$$

donde  $\sigma_{II}$ ,  $\sigma_{IS}$  y  $\sigma_{OS}$  pueden tomar valores positivos nulos y negativos en función de la composición de la solución del suelo. Aunque las partículas de suelo portan una carga, los suelos en sí mismos son siempre eléctricamente neutros, por lo que  $\sigma_p$  debe ser balanceada por una carga que corresponde a los iones en la solución del suelo que no están ligados en complejos de superficie, pero que son también adsorbidos por las partículas, esto es, la carga de los iones de la capa difusa,  $\sigma_D$ . De esta manera se mantiene al suelo eléctricamente neutro mediante el balance de la carga superficial del suelo:

$$\sigma_p + \sigma_D = 0 \quad (3.3)$$

Los puntos de carga cero son aquellos valores de pH en los cuales uno o más de los componentes de la carga de superficie (ec. 3.2) desaparece. En la tabla 3.4 se muestran algunos puntos de carga nula y su condición (Sposito, 1989). Cabe recordar que el punto isoeléctrico (IEP) es aquél en que el potencial zeta y la movilidad se anulan, pero la carga superficial no necesariamente es nula. Específicamente, el PZC y el IEP de un sistema coloidal, en general, no son idénticos.

Tabla 3.4 Puntos de carga cero

Símbolo	Nombre	Condición
PZC	Punto de carga cero	$\sigma_p = 0$
PZNPC	Punto de carga neta de protones nula	$\sigma_{II} = 0$
PZNC	Punto de carga neta nula	$\sigma_{IS} + \sigma_{OS} + \sigma_D = 0$

El punto de carga cero más general es el valor de pH en que se anula la carga neta total de la partícula:  $\sigma_p = 0$ ; en dicho pH no existe contribución de los iones adsorbidos. Experimentalmente se obtiene midiendo el pH en el que la movilidad de las partículas es nula al aplicar un campo eléctrico (medición de movilidad electroforética), o bien, en el que ocurre la precipitación de una suspensión de partículas (medición de floculación). El PZC señala ausencia de iones adsorbidos de movimiento libre y el aumento de las fuerzas interparticulares que producen efectos coagulantes, por lo que juega un papel importante en la formación de agregados y en la retención de iones adsorbidos contra las pérdidas por lavado, especialmente en suelos de carga variable.

En el PZNPC desaparece  $\sigma_{II}$ . El valor de  $\sigma_{II}$  disminuye al aumentar el pH (la relación de variación,  $\Delta\sigma_{II}/\Delta\text{pH}$ , siempre es negativa), independientemente de la composición o fuerza iónica de la solución del suelo y de la naturaleza de las partículas (orgánicas o inorgánicas).

El PZNC es el pH donde desaparece la carga iónica adsorbida que sea distinta de  $\sigma_{II}$ ; si  $q_+$  y  $q_-$  representan los moles de carga de cationes y aniones adsorbidos, respectivamente, entonces:  $q_+ = q_-$ . Se pueden usar iones índice para medir el PZNC, el cual dependerá de

la elección de éstos, aunque dicha dependencia es pequeña si los iones escogidos no se adsorben específicamente (electrólito indiferente), como  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ; por ejemplo, si se satura el suelo con  $\text{NaCl}$  se verificaría que  $q_{\text{Na}} = q_{\text{Cl}}$ .

De acuerdo con la ecuación 3.2 y con los conceptos de adsorción mencionados anteriormente, si  $\text{pH} = \text{PZNC}$ :

$$q_+ - q_- = \sigma_{\text{IS}} + \sigma_{\text{OS}} + \sigma_{\text{D}} = 0 \quad (3.4)$$

por lo que, a diferencia del PZC, si existen iones libres adsorbidos en el PZNC, lo que trae implicaciones sobre la retención de iones en los suelos.

A partir de las ecuaciones 3.2 y 3.3, y de las definiciones de la tabla 3.4, se pueden derivar diversas correlaciones entre las densidades de carga de superficie y los puntos de carga cero; como por ejemplo, si  $\text{pH} = \text{PZC}$ :

$$\sigma_{\text{II}} = -(\sigma_{\text{O}} + \sigma_{\text{IS}} + \sigma_{\text{OS}}) \quad (3.5)$$

Ya que  $\sigma_{\text{II}}$  varía inversamente con el  $\text{pH}$ , para que se satisfaga la ecuación 3.5 el  $\text{pH}$  debe variar en la misma dirección que  $\sigma_{\text{IS}} + \sigma_{\text{OS}}$ , por lo que si esta suma aumenta, por ejemplo a través de la adsorción de  $\text{K}^+$  adicional en complejos de superficie interna (fig. 3.14), entonces,  $\sigma_{\text{II}}$  disminuirá en el PZC, y éste a su vez aumentará. Por tanto, la regla general será: la formación de complejos de superficie cambiará el PZC en la misma dirección que cambie la carga neta de complejos de superficie.

La adsorción adicional de cationes y aniones en complejos de superficie elevará o disminuirá el PZC, respectivamente. Los cambios en el PZC no requieren de adsorción específica, sino sólo de formación de complejos de superficie, en conformidad con la ley de balance de carga.

### 3.3.5 Discusión de las fuerzas interparticulares y estabilidad del sol

La competencia entre las fuerzas de repulsión electrostáticas y las fuerzas de atracción de Van der Waals, junto con los movimientos térmicos aleatorios, en gran medida determinan el comportamiento de dos superficies de arcillas que se aproximan a una separación mayor de 10 nm. Las interacciones de partículas a distancias asociadas con las dobles capas eléctricas y fuerzas de Van der Waals controlan el comportamiento de la floculación-desfloculación de las partículas arcillosas en suspensión, y son importantes en suelos que contienen minerales de arcilla de red expansible. En masas de suelo más densas, otras fuerzas de interacción de partículas llegan a ser importantes para mantener el equilibrio, ya que influyen en los esfuerzos intergranulares y controlan la resistencia en los contactos entre partículas. En una masa en equilibrio debe existir un balance entre todas las fuerzas entre partículas, la presión del agua y los esfuerzos de frontera aplicados.

Los factores importantes al tratar la interacción de partículas en sistemas de arcillas corresponden a los siguientes:

#### 3.3.5.1 Fuerzas de repulsión entre partículas

- 1) La principal fuente de repulsión es la interacción de las dobles capas de las partículas, la cual es muy sensible a la valencia del catión, concentración electrolítica y

propiedades dieléctricas del fluido de poro; la repulsión de la doble capa eléctrica es generada por la presencia de iones en sistemas acuosos. Las grandes partículas, donde las fuerzas de atracción de Van der Waals son fuertes, por lo general requieren de la repulsión a larga distancia de la doble capa para lograr la estabilidad. La fuerza de repulsión es una función exponencial decreciente con el espacio entre partículas y aumenta al disminuir la concentración de electrólitos.

- 2) Las fuerzas de repulsión por hidratación de iones y de superficies, son de corto alcance y disminuyen rápidamente con la distancia de separación, variando inversamente con el cuadrado de la distancia.

Cuando las partículas adsorben moléculas del solvente, en una extensión de una o dos monocapas, el trabajo requerido para desorber estas moléculas cuando las partículas se aproximan por la atracción de fuerzas de Van der Waals se manifiesta como una repulsión, conocida como *fuerza de solvatación*; se vuelve apreciable a separaciones entre partículas del orden de 10 Å o menores (Van Olphen, 1963). Cuando dos superficies de siloxano colapsan en una configuración de cuasicristal, la fuerza requerida para que esto se lleve a cabo debe depender en cierta proporción de la estructura del complejo de solvatación en la escala molecular (Mitchell, 1993; Sposito, 1989). Datos de mediciones experimentales muestran que la fuerza neta por radio unitario entre dos superficies opuestas de moscovita es función de la separación interplanar, y que para distancias menores de 5 nm es significativa una fuerza adicional a la electrostática y de Van der Waals (fig. 3.18).

La fuerza de solvatación se define como la diferencia entre fuerza neta observada y la fuerza neta de la suma de la fuerza de Van der Waals y electrostática. La fuerza de solvatación parece tener baja dependencia de la temperatura en el intervalo de 20 a 65°C. Los cationes intercambiables de los complejos de superficie de esferas externas y de la capa difusa determinan la naturaleza de la fuerza de solvatación; en la presencia de soluciones electrólitos 1:1 dicha fuerza se exhibe para un cierto umbral de concentración, cuyo valor depende del catión metálico en el electrólito, y disminuye en el orden  $\text{Li} > \text{Na} > \text{Cs} > \text{K}$ . Si el protón es el principal catión intercambiable, por ejemplo, cuando el pH o la concentración de electrólito es baja ( $< 0.1 \text{ mol/m}^3$ ), la fuerza de solvatación disminuye, por lo que la desolvatación requiere sólo de la fuerza de Van der Waals.

## TELOS CON FALLA DE ORIGEN

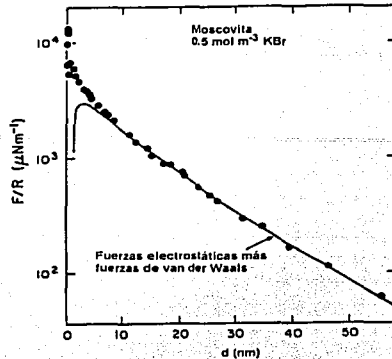


Fig. 3.18 Fuerza de solvatación (Sposito, 1989)

La hidratación por formación de la orientación de dipolos del agua en el campo eléctrico alrededor de la partícula, formando una envoltura de solvatación, no es suficientemente grande para afectar el balance de energía a gran distancia, por lo que la contribución a la estabilidad coloidal y a la gelificación de los soles no es alta; no obstante, es una fuerza importante en la interacción de partículas a corta distancia.

La energía de hidratación de la superficie de las partículas y de los cationes entre capas produce grandes fuerzas de repulsión para pequeñas distancias entre capas unitarias (distancias libres entre superficies de 20 Å). La energía neta para remover las capas de agua entre superficies paralelas de partículas de arcilla es muy alta, por lo que la sola presión puede no ser suficiente para eliminarla, a menos que el área de contacto entre partículas sea pequeña, como en el caso de aristas, esquinas y asperezas superficiales. La experiencia muestra que el calor y/o el alto vacío son necesarios para remover el agua en suelos finos (Mitchell, 1993).

- 3) Repulsión de Born, que resulta de la superposición de nubes de electrones y evita la interpenetración de la materia. Es una fuerza de muy corto alcance.
- 4) Repulsión por entropía: se refiere a la interferencia debida a una capa de moléculas superficialmente activas o polímeros adsorbidos, y que probablemente es efectiva sólo para pequeñas partículas, donde las fuerzas totales de atracción de Van der Waals no son tan grandes. Al aproximarse entre sí, la entropía de las partículas originalmente dispersas disminuye, por lo que éstas tienden a separarse de nuevo, ya que un sistema cambia espontáneamente en la dirección de mayor entropía, efecto que se manifiesta como una repulsión.

### 3.3.5.2 Fuerzas de atracción entre partículas

- 1) Fuerzas de Van der Waals: que son atracciones electromagnéticas por la interacción de dipolos. Dichas fuerzas son de significativo alcance en las arcillas; en sistemas acuosos su magnitud tiene escasa dependencia de la concentración electrolítica. Depende del

tamaño y composición (densidad del arreglo de átomos), tanto de las partículas, así como de la posible envoltura de moléculas adsorbidas, ya sea de solvente o soluto. También influye la forma de las partículas; en caso de ser asimétricas, la atracción dependerá de sus posiciones. En general, la fuerza de atracción varía con una potencia entre -3 y -7 de la distancia entre partículas. Particularmente, las fuerzas de dispersión de London son de significativo largo alcance en arcillas y varían inversamente a la cuarta potencia de la separación entre partículas. Experimentalmente se ha mostrado que la constante de Hamaker, que interviene en la medida de la magnitud de la energía de Van der Waals para cualquier separación entre las superficies de los coloides, tiene cierto valor característico para los suelos arcillosos, independiente del tipo de electrólito (Sposito, 1989). No obstante, según otros autores (Di Maio *et al.*, 2002), las fuerzas de atracción de Van der Waals no dependen de la hidratación de los iones, pero sí reflejan el cambio en las propiedades del fluido (constante dieléctrica) y, en general, los fluidos orgánicos producirán una menor atracción interparticular que el agua.

- 2) Atracción electrostática: en dispersiones de dos clases de partículas, éstas se atraen electrostáticamente si portan dobles capas de carga contraria. Dicha aglomeración se llama *mutua floculación*. En sistemas acuosos de arcilla, la mutua floculación ocurre debido a la presencia de dobles capas de signo opuesto en los bordes y superficies de las partículas.

Las fuerzas de atracción electrostáticas entre superficies, presentes en la interacción de dobles capas de signo opuesto, son también sugeridas como la causa de que las partículas de suelo fino se adhieran al secarse. Dichas fuerzas son independientes del tamaño de partícula y son significativas para distancias de separación menores de 25 Å.

- 3) Uniones interatómicas por enlaces principales (de valencia) y secundarios (puentes de hidrógeno) que actúan en espacios cortos.
- 4) Enlaces de partículas por medio de compuestos de cadena larga poli funcionales.
- 5) Enlaces de partículas por un segundo componente líquido inmiscible.
- 6) Cementación, la cual involucra un enlace químico y puede tratarse como una atracción química de corto alcance que puede ocurrir naturalmente por precipitación de calcita, sílice, alúmina, óxidos de hierro, así como posiblemente otros compuestos orgánicos o inorgánicos.
- 7) Esfuerzos capilares, considerados como responsables de cohesión aparente en los suelos.

### 3.3.5.3 Energía neta de interacción

Al combinar las correlaciones para las energías de repulsión de la doble capa difusa con aquéllas para las de atracción se obtienen curvas de la energía neta de interacción en función de la distancia. La energía de repulsión es sensitiva a cambios en la concentración electrolítica, valencia iónica, constante dieléctrica del disolvente y pH, tamaño del ion hidratado y adsorción de iones; mientras que la energía de atracción es sensitiva solamente a cambios en la constante dieléctrica y temperatura.

En sistemas donde la curva neta de interacción exhibe barreras altas de repulsión, las partículas permanecen alejadas y la suspensión es estable. En casos donde no existe dicha barrera, las partículas pueden fácilmente acercarse y flocular, lo que se representa por un mínimo en las curvas de energía. Debido a su pequeño potencial electrocinético, la caolinita flocula más rápidamente que la montmorilonita. En estos sistemas, los flóculos o agregados de varias partículas se sientan juntos de la suspensión. El carácter de la curva neta de interacción también tiene una gran influencia en el arreglo de partículas y estabilidad en depósitos de arcilla sedimentados, consolidados o compactados. Los cambios en la química del sistema, que en consecuencia producen cambios en la curva neta de interacción pueden tener importantes consecuencias en términos del comportamiento del suelo cuando se somete a la acción del flujo del agua.

En la figura 3.19 se grafican las energías de atracción ( $V_A$ ) y repulsión ( $V_B$ ) en función de la distancia de separación entre partículas. En las primeras tres figuras se muestran las curvas potenciales de interacción que resultan de la suma de las correspondientes a la atracción y repulsión para tres concentraciones de electrolitos: (a) baja, (b) intermedia y (c) alta. Las dos primeras curvas muestran un valor mínimo (mín.), con predominio de atracción a cortas distancias, y un máximo con superioridad de repulsión a mayor separación; para la curva correspondiente a altas concentraciones no aparece el máximo citado. En estas curvas se ha incluido una fuerza de interacción adicional, a la que contribuyen la repulsión de Born y la fuerza de solvatación; la creciente importancia de esta fuerza de repulsión de corto alcance sobre la interacción neta, está representada por la pronunciada elevación de las curvas potenciales para separaciones mínimas. Asimismo, En la última figura (d) aparecen tres curvas potenciales de repulsión válidas para las mismas partículas, pero para diferentes concentraciones de electrolitos; en ella se observa que la curva potencial de atracción prácticamente no cambia.

Cuando las concentraciones de electrolitos son bajas ( $< 0.01 \text{ mol/m}^3$ ), las fuerzas de dispersión de Van der Waals y de hidratación son despreciables y la fuerza electrostática es suficientemente poderosa para ordenar a las partículas de montmorilonita, por ejemplo, en un apilamiento paralelo a lo largo de la dirección perpendicular a su eje cristalográfico *c*. Dicho arreglo de partículas arcillosas se conoce como tactoide. Las separaciones relativamente grandes y la fuerza de repulsión que los produce distingue a los tactoides de los cuasicristales, los cuales son producto de fuerzas de atracción que actúan a muy corta distancia.

Para una alta concentración de electrolitos en la cual la curva de energía no muestra repulsión a ninguna distancia, la aglomeración de partículas ocurre a una máxima velocidad y el proceso se llama coagulación rápida (Van Olphen, 1963). La más pequeña concentración de electrolito, en  $\text{mol/m}^3$ , para la cual una suspensión coloidal se vuelve inestable y comienza a sufrir una coagulación rápida se denomina la concentración crítica de coagulación (ccc).

En la figura 3.20 se muestra el comportamiento característico de la energía potencial por unidad de área por la interacción de dos superficies paralelas de filosilicatos con carga,  $\phi(d)$ , donde un marcado valor mínimo (mínimo principal) ocurre para muy bajos valores de separación entre planos,  $d$ , seguido de un máximo y de al menos un extremo mínimo

relativo más. Si ocurren dos o más extremos, aquél a una distancia finita,  $d$ , es un mínimo poco pronunciado (mínimo secundario). Algunas veces la floculación está asociada con el mínimo secundario y la agregación con el principal (Sposito, 1989).

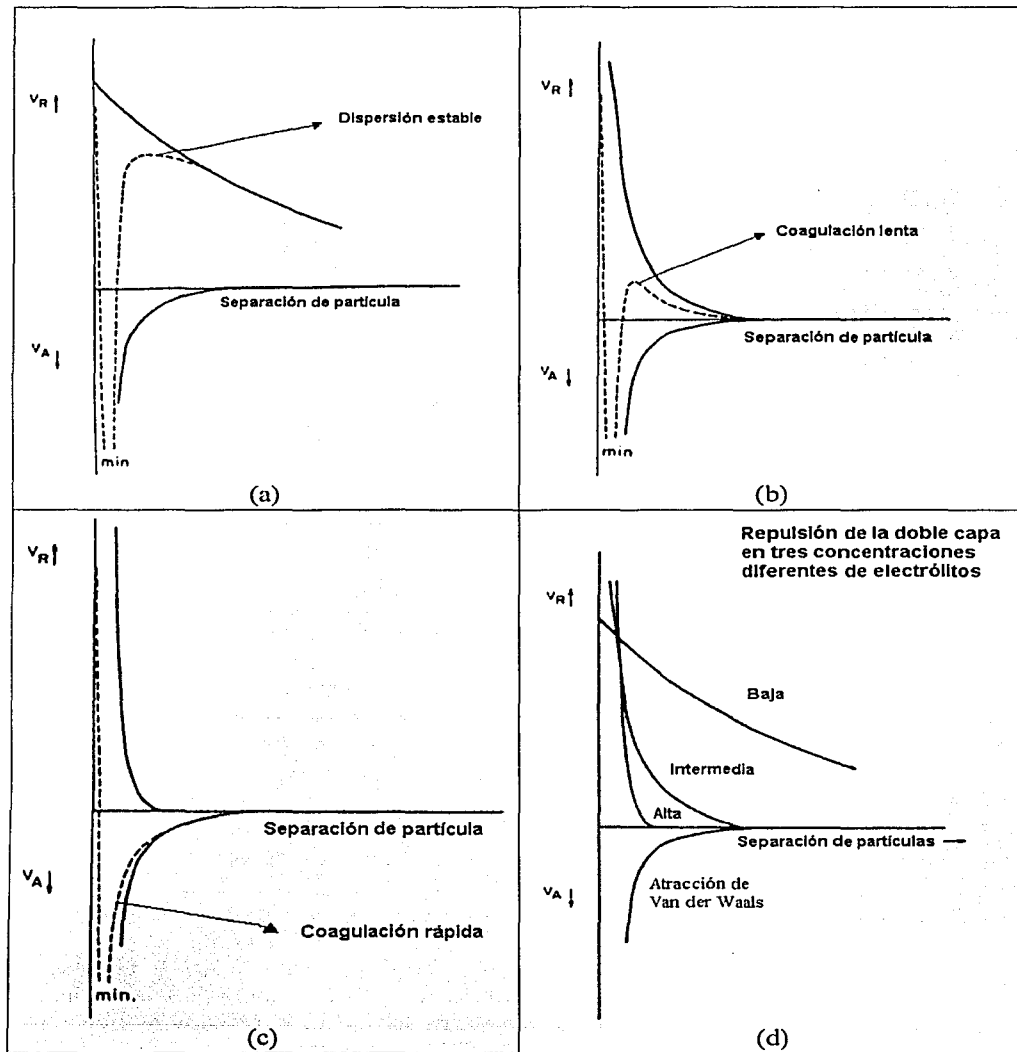
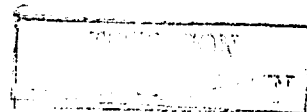


Fig. 3.19 Curvas potenciales de interacción (Van Olphen, 1963)



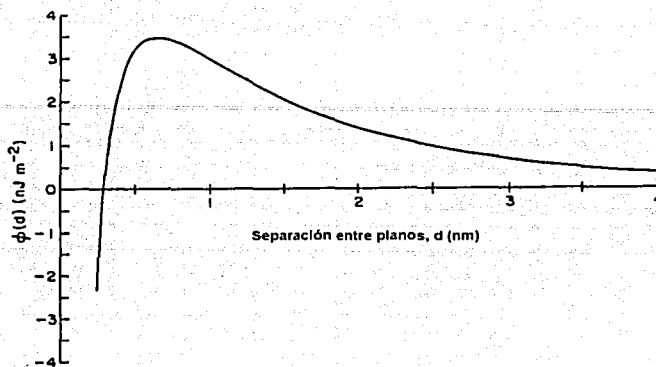


Fig. 3.20 Floculación y agregación (Sposito, 1989)

De acuerdo con las hipótesis de una teoría de estabilidad coloidal (DLVO), una suspensión coloidal se vuelve rápidamente inestable si el valor máximo de  $\phi(d)$  es pequeño en relación con la energía térmica aleatoria de las partículas coloidales. La rápida coagulación de la suspensión coloidal es inducida por una reducción tanto de la magnitud como del intervalo de las fuerzas de repulsión electrostáticas al incrementarse la concentración del electrólito. En el modelo DLVO se desprecia la fuerza de solvatación; la coagulación rápida de una suspensión coloidal es inducida por una reducción tanto en la magnitud como en el intervalo de la fuerza de repulsión electrostática al incrementarse la concentración electrolítica del medio. Este modelo se vuelve menos apropiado cuando los iones coagulantes tienen valencia distinta de uno, o en general, cuando los iones se comprometen significativamente en reacciones de complejos con grupos funcionales de superficie. La formación de complejos de superficie altera la densidad total de carga de la partícula,  $\sigma_p$ , directamente, mientras que la formación de una doble capa difusa compacta, inherente al modelo DLVO, solamente oculta indirectamente la densidad total de carga de la partícula para reducir su efecto de largo alcance.

Si el grupo funcional de superficie es la cavidad de siloxano, la formación de complejos de esfera interna con cationes metálicos monovalentes puede reducir bruscamente la carga total de la partícula. La probabilidad de este tipo de formación de complejo de superficie se incrementa en proporción directa con el radio iónico  $R$  del catión metálico (para una valencia dada.  $Z$ , el potencial iónico,  $Z/R$ , disminuirá al aumentar  $R$ , por lo que el campo eléctrico del catión es pequeño y éste se solvatará menos, además de tender a formar enlaces covalentes por ser más fácil de polarizar); el  $K^+$  es más efectivo que el  $Na^+$ , por ejemplo, para reducir  $\sigma_p$  y facilitar la coagulación. El menor valor de ccc ocurre porque se forman un mayor número de complejos de superficie de esfera interna por unidad de área, lo que ocasiona que el valor por encubrir de  $\sigma_p$  sea menor.



Cuando el principal grupo funcional de superficie es el grupo hidroxilo orgánico o inorgánico, la estabilidad coloidal puede ser afectada fuertemente por el valor de pH, ya que se pueden formar esferas internas con protones. Una suspensión de suelo coloidal que contenga partículas que porten grupos hidroxilo de superficie (por ejemplo, óxidos hidratados o caolinita) tenderá a coagular en el PZC (punto de carga cero), independientemente de la concentración electrolítica del medio. En la ausencia de complejos de superficie que involucren otros iones distintos de  $H^+$  o  $OH^-$ , el PZC coincide con el punto de carga neta nula de protones (PZNPC), y la coagulación dependerá del balance de la carga de superficie entre grupos funcionales protonados y disociados según queda expresado a través de  $\sigma_H$ .

En la presencia de iones formadores de complejos de superficie,  $\sigma_p$  es la propiedad determinante para una rápida coagulación. La existencia de iones que pueden formar complejos de superficie puede detectarse al examinar el valor de ccc en función de la concentración coloidal en la suspensión. Si el mecanismo descrito por el modelo DLVO es la principal causa de coagulación, el ccc será independiente de la concentración coloidal, mientras que si la principal causa es la formación de complejos, el valor de ccc tenderá a incrementarse con la concentración coloidal, ya que la capacidad para la formación de complejos superficiales también se incrementará.

La adsorción de iones multivalentes, como el  $Al^{3+}$ , puede cambiar el signo de  $\sigma_p$ , y entonces los iones que eran de igual carga que la partícula se vuelven iones coagulantes. El mecanismo de cualquier coagulación posterior inducida por estos iones puede ser por encubrimiento o adsorción. Los iones de polímeros forman complejos de superficie con las partículas coloidales y la estabilidad depende de la estereoquímica (es decir, de la disposición espacial) así como de la densidad de carga.

Los principales factores químicos de superficie que determinan la estabilidad de suspensiones coloidales de suelo se resumen en la tabla 3.5. Las reacciones de superficie afectan la estabilidad coloidal a través de cambios en la magnitud de las fuerzas de repulsión electrostática y de solvatación y, si están involucradas macromoléculas adsorbibles, a través de cambios en los mecanismos de repulsión electrostática. La coagulación es el resultado de una reducción en las fuerzas electrostáticas y de solvatación, ya sea a través del encubrimiento, formación de complejos superficiales, o enlaces de partículas inducidos *estereoquímicamente* (Sposito, 1989).

Tabla 3.5 Factores que afectan la estabilidad de suspensiones coloidales de suelo

Factor	Efectos	Promueve coagulación	Promueve estabilidad
Concentración electrolítica	Extensión de la doble capa difusa	Cuando se incrementa	Cuando disminuye
Valor de pH	Cambia $\sigma_p$	pH = PZC	pH $\neq$ PZC
Adsorción de iones pequeños	Cambia $\sigma_p$	$\sigma_p = 0$	$\sigma_p \neq 0$
Adsorción de iones de polímeros	Cambia $\sigma_p$ y/o asociación de partículas	Con puentes de polímeros	Por repulsión electrostática

### 3.4 Resumen y conclusiones

En este capítulo se discuten los conceptos teóricos relativos a las diversas clases de soluciones, en especial las coloidales, así como las distintas fuerzas entre partículas con carga, neutras y de polaridad variable. Se describen los electrólitos, en especial las sales inorgánicas, que al aumentar de concentración pueden incrementar la tensión superficial (solutos inactivos de superficie); es decir, su efecto en un líquido es que éste *moje* menos. Asimismo, ciertas sales no modifican el pH, por lo que se llaman neutras.

Se trata también sobre los tipos de asociación que existen y la estabilidad coloidal, coagulación, floculación, defloculación y dispersión. Además, se analizan las fuerzas que tienden a atraer y a repeler a las partículas entre sí y más adelante se explica esto mediante gráficas de energías de interacción en función de la distancia entre partículas. A mayores concentraciones empiezan a ser más importantes las fuerzas de atracción, de solvatación, así como los procesos de floculación y agregación, posiblemente por enlaces hidrófobos. En condiciones de alta salinidad existen fenómenos importantes como la electrorestricción; las propiedades coligativas cambian y la actividad, en vez de la concentración iónica, cobra mayor importancia.

Se hace un resumen del tipo de arcillas y sus características principales, donde se aprecia que pueden formar varias clases de sistemas coloidales, como hidrosoles, higrógeles y xerógeles, y que los conceptos de coloides reversibles e irreversibles, hidrófilos e hidrófobos son relativos, pero que permiten hacer comparaciones y establecer ciertos criterios generales para su estudio. Las arcillas se clasifican como tensoactivos no iónicos, que tienen grupos de polaridad variable: una parte de sus moléculas son hidrófilas, pero la mayoría son hidrófobas, con tendencia a la propia asociación por enlace hidrófobo. Forman sistemas relativamente irreversibles. El comportamiento como gel y la variación de su rigidez con el tiempo y la temperatura es muy importante para entender fenómenos como la sinéresis en suelos compactados. Altas concentraciones de sales reprimen el espesor de la capa doble difusa. Con esto disminuyen el potencial, la hidratación, el hinchamiento y la tendencia a la dispersión y el material coloidal se flocula. En casos extremos, esto ocasiona la transformación de la bentonita en un material del tipo ilitico, mientras que en las del grupo de la caolinita puede ocurrir el fenómeno de intersalación.

En particular se menciona el modelo de la doble capa difusa y tipos de adsorción de iones, y los distintos parámetros que intervienen en ellos, entre los que figura la concentración, tipo y temperatura de la solución. Para altas concentraciones el modelo de doble capa, que puede estar presente en suelos compactados deja de ser aplicable para predecir el flujo. El desarrollo de la carga eléctrica en el suelo se debe a la sustitución isomórfica y a la reacción de grupos funcionales. De los cuatro tipos de matriz de cargas sólo uno es permanente e independiente del pH. Los tres restantes tipos de carga variable cambian su magnitud en función del pH. Un aspecto muy importante es la formación de complejos de superficie, en forma reversible o irreversible y el empleo de electrólitos indiferentes o no inertes para determinar los distintos puntos de carga nula que juegan un papel importante en la formación de agregados y en la movilidad y retención de iones adsorbidos.

## 4. FILTRACIONES EN REVESTIMIENTOS CON SUELOS

"Time and tide flow wide "

Herman Melville: *Moby Dick*

### 4.1 Tejido del suelo y permeabilidad

El término *fábrica* o *tejido* del suelo (*soil fabric*, en inglés), es una expresión adaptada de la petrología para caracterizar la ordenación de los componentes del suelo, o sea, el arreglo de las partículas primarias y secundarias (agregados) en ciertos modelos o patrones estructurales que incluyen el espacio de poros. Además, algunos autores utilizan el término *esqueleto* para designar al conjunto de granos de mineral y materia orgánica resistente con tamaño mayor que el coloidal; asimismo, dan el nombre de *plasma* al material que ha sido móvil en el suelo (Baver *et al.*, 1980). Mitchell (1993), sugiere que el término fábrica o tejido se reserve para referirse sólo al arreglo entre las partículas, aisladas y en grupos, y los espacios porosos entre ellas, mientras que la palabra *estructura* (*structure*) se emplee para expresar, además de lo anterior, los efectos del conjunto de fuerzas entre partículas y de la composición química del sistema, y se aplique para explicar las diferencias entre las propiedades del suelo en su estado natural y las de éste tras ser desestructurado (*destructured*). Tanto en los suelos transportados y residuales, así como en los compactados, los factores originales de composición y ambiente de formación determinan su estructura inicial, mientras que los procesos químicos y físicos posteriores la transforman y definen su estado final (Mitchell, 1993). Conforme a resultados experimentales la microestructura afecta los valores de succión; estructuras floculadas desarrollan mayor succión (Romo, 1990). Por tanto, la permeabilidad de un revestimiento constituido por suelos arcillosos dependerá de la estructura final del material, por lo que para predecir su comportamiento a corto y largo plazo es menester familiarizarse con los factores que pueden afectar a las partículas arcillosas, tales como cambios en la estabilidad coloidal.

La estabilidad coloidal juega un importante papel en el mantenimiento de las estructuras agregadas del suelo, de las que depende la penetrabilidad de la superficie del suelo y la permeabilidad de su perfil. Las suspensiones estables conducen a la erosión e *iluvación* de la arcilla (movimiento hacia capas subyacentes y concentración en ellas), ya que las partículas atrapadas por la solución del suelo permanecen con alta movilidad. Las suspensiones estables tienen también un efecto secundario en la movilidad de los iones o moléculas orgánicas o inorgánicas adsorbibles que pueden llegar a enlazarse fuertemente a los coloides del suelo. Por tanto, la estabilidad coloidal está muy relacionada con las partículas y el transporte químico en los suelos (Van Olphen, 1963; Sposito, 1989). Asimismo, las dos clases de coagulación (floculación y agregación) son muy importantes para la formación de la estructura del suelo, pero son fenómenos complejos que dependen de la química y geometría de la superficie de los coloides involucrados, así como del

potencial hidrógeno (pH), fuerza iónica y composición de la solución del suelo (Sposito, 1989).

Las partículas planas de minerales arcillosos se pueden unir entre sí cara a cara, cara a arista o arista a arista, formando agregados (conjuntos paralelos) o aglomerados, coagulados o floculados (conjuntos tridimensionales) (Van Olphen, 1963).

Las asociaciones de partículas en suspensiones de arcilla se pueden describir de la siguiente manera (Mitchell, 1993) (fig. 4.1):

1. Dispersa: nula asociación cara a cara de partículas de arcilla
2. Agregada: asociación cara-cara (CC) de varias partículas de arcilla
3. Floculada: asociaciones de agregados borde-borde (BB) o borde-cara (BC)
4. Defloculada: nula asociación entre agregados.

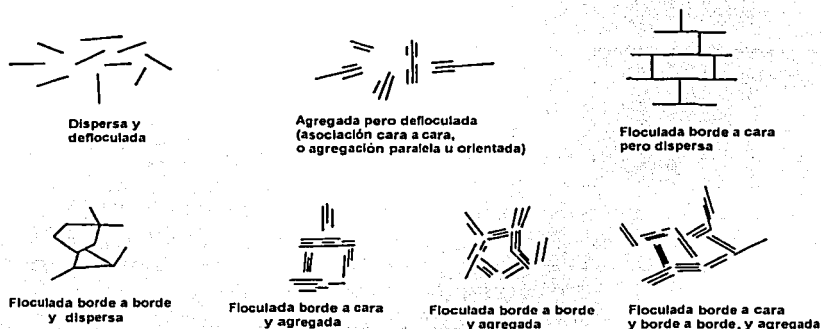


Fig. 4.1 Diversas asociaciones posibles (Van Olphen, 1963)

La asociación CC da como resultado partículas más largas y anchas, mientras que las asociaciones CB y BB pueden producir voluminosas estructuras de castillos de naipes. Los términos floculado y agregado se usan como sinónimos al referirse, en general, a los arreglos de múltiples partículas, mientras que defloculado y dispersado se utilizan para referirse tanto a partículas individuales como a grupos de partículas que actúan independientemente.

Existen diversos términos para describir las mismas o similares características de diversas clases de fábricas del suelo. El castillo de naipes es un arreglo borde-borde que forma un tejido abierto similar a la disposición de la suspensión floculada borde-cara pero dispersa. Un dominio, paquete o libro, es un agregado de placas de arcilla paralelas (Mitchell, 1993).

Las asociaciones de partículas en sedimentos, suelos residuales y arcillas compactadas adquieren una variedad de formas, no obstante, la mayoría de ellas están relacionadas con la combinación de las distintas configuraciones mostradas en la figura 4.1, y reflejan la diferencia en contenido de agua entre una suspensión y una masa de suelo densa. Generalmente, los suelos finos están compuestos de agregados de múltiples partículas,

distinguiéndose tres elementos del tejido del suelo: arreglos de partículas elementales, ensamblaje entre partículas y espacio poroso.

Existen diferencias entre las arcillas y las arenas uniformes y algunos limos en cuanto a la dependencia de la permeabilidad en la relación de vacíos, pues la mayoría de las arcillas no contienen tamaños de poro uniformes. En las arcillas, las partículas forman grupos o agregados, con pequeños poros dentro de los agregados, y grandes poros entre los grupos que dominan el flujo a través de dicho sistema (Mitchell, 1993).

La prueba de límite líquido es análoga a una prueba de corte. Estudios recientes indican que el LL para todos los suelos finos corresponde a una resistencia al corte de 1.7 a 2.0 kPa y a una succión del agua de poro de 6 kPa (Mitchell, 1993). Aun cuando los contenidos de agua y relaciones de vacíos en el LL para distintas arcillas varían en amplios intervalos, la conductividad hidráulica es aproximadamente la misma para todos ellos. Esto significa que los tamaños efectivos de poro que controlan el flujo deben ser aproximadamente iguales para todas las arcillas. Esta microfábrica es consistente con el modelo de grupos (clusters) para la conductividad hidráulica, como se aprecia en la figura 4.2 (a). En dicho modelo, las partículas individuales de arcilla se asocian en agregados o flóculos (grumos). En la figura 4.2 (b) se muestra esquemáticamente una microestructura que incluye partículas de limo (m) y arena (s), así como (1) poros dentro de los agregados, (2) poros entre los agregados, y (3) grandes poros contenidos dentro de un grupo de agregados. En ambos modelos, el flujo es controlado por el tamaño de vacíos entre los agregados.

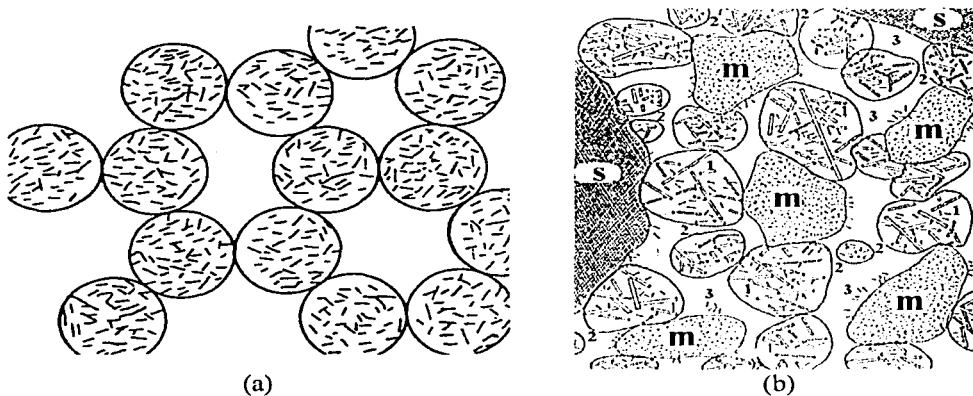


Fig. 4.2 Modelo de grupos (a), y agregados y poros (b) (Mitchell, 1993)

Las mismas resistencias, succiones y conductividades hidráulicas para todas las arcillas en el LL pueden ser explicadas basados en los conceptos de que (1) los agregados son las unidades básicas que interactúan para desarrollar la resistencia, esto es, actúan solas como partículas, (2) el espesor del agua adsorbida es la misma para todas las superficies de partículas, y (3) el tamaño promedio de los espacios entre grupos es el mismo. Debido a que la mayoría de las arcillas tienen las mismas estructuras de superficie, las fuerzas de interacción de dichas superficies y el agua adsorbida debe ser la misma, así como la cantidad de agua adsorbida por unidad de área para una cierta tensión o succión. Esto

significa que a mayor superficie específica mayor será la cantidad de agua requerida para satisfacer las condiciones del Límite Líquido.

En suelos de grano fino, arcillosos, la fábrica se puede referir al arreglo de plaquetas individuales de arcilla o de grupos orientados de plaquetas, y la relación entre las plaquetas y granos minerales mayores (limo y arena). La fábrica de un suelo determina su tamaño de poro. La porosidad y la conductividad hidráulica (o de fluidos) son las dos propiedades fundamentales para el transporte del fluido. Se pueden describir dos tipos de porosidad: primaria y secundaria. La porosidad primaria es la porosidad de la masa o matriz de suelo y es controlada por la fábrica del suelo, la cual es influida por la distribución de tamaños de partículas y el arreglo de los granos de mineral.

La porosidad secundaria es controlada por la macroestructura del suelo y comprende las heterogeneidades de los depósitos de suelo, que incluyen juntas, fisuras, agujeros de raíces o animales y otros defectos de la masa de suelo. Las juntas, fisuras y agujeros pueden ocurrir como resultado de esfuerzos en el suelo, desecación, disolución, o la acción de organismos. En suelos compactados, la porosidad secundaria puede resultar de un pobre control de calidad en el proceso de compactación o de la desecación del revestimiento después de la compactación. La porosidad secundaria afecta la conductividad hidráulica de la masa entera de suelo y generalmente rebasa el efecto de la primaria.

En sistemas con tamaños de poros desiguales el flujo es casi totalmente a través de los miniporos y macroporos; éstos comprenden la *porosidad efectiva*, o sea, la fracción del volumen total a través del cual ocurre el flujo, la cual puede ser mucho menor que la porosidad total. Si todos los poros y espacios vacíos contribuyen al flujo, la porosidad efectiva es igual al volumen de vacíos dividido por el volumen total. No obstante, algunos poros están aislados o están cerrados; además, el agua fuertemente adsorbida a la pared de los poros conductores del flujo también disminuye la porosidad efectiva. Los intervalos comunes de porosidad total para arcillas varían de 0.2 a 0.5, mientras que los correspondientes a la porosidad efectiva son del orden de 0.01 a 0.1 (Goldman y Greenfield, 1988).

#### 4.1.1 Agregación

Se denomina estabilidad estructural a la capacidad que tienen los granos de suelo de retener su forma cuando se humedecen y de permitir el paso del agua a través del suelo. La estabilidad de los agregados, no según el concepto de la estabilidad coloidal, sino de la estabilidad del terrón en un suelo, en el sentido de su capacidad de resistir la desintegración mecánica, es un factor importante para evaluar la erosión de los suelos (Van Olphen, 1963). Floculación y formación de agregados estables no son sinónimas. La primera es de naturaleza electrocinética. La formación de agregados estables requiere que las partículas primarias estén tan firmemente unidas entre sí que no se dispersen en el agua. La formación de agregados requiere la cementación o el enlace mutuo de las partículas floculadas. Así, la floculación ayuda al proceso de agregación, pero ella misma no es agregación. El secado de las arcillas previamente humedecidas produce efectos de cementación suficientemente fuertes para mantener la agregación, aun si el suelo es rehumedecido. La estabilización de agregados después de la deshidratación es el resultado de la floculación debida a la mayor

concentración de sales, al secado irreversible de materiales orgánicos, a la precipitación del  $\text{CaCO}_3$ , o a la deshidratación irreversible de los hidróxidos de Fe y Al (Ortiz y Ortiz, 1988).

Los factores que afectan la formación de agregados son (Baver *et al.*, 1972; Gavande, 1982; Besoain, 1985; Bornemisza, 1982; Ortiz y Ortiz, 1988):

- 1) Arcilla: el efecto agregante de la arcilla se debe a su acción cementante y a su propiedad de hinchamiento y contracción con los cambios de humedad
- 2) Iones intercambiables: los cationes intercambiables afectan la estructura del suelo. El  $\text{Ca}^{2+}$ , y en menor grado el  $\text{Mg}^{2+}$ , son iones divalentes pequeños que neutralizan la carga negativa en la arcilla y favorecen la floculación, mientras que iones altamente hidratados, como el  $\text{Na}^+$ , dejan con carga negativa a los coloides que se repelen entre sí y tienden a deflocular los agregados
- 3) Precipitación de agentes cementantes químicamente estables: constituidos a partir de ciertos agentes químicos solubles, como materia orgánica, carbonatos, yeso, aluminio y óxidos deshidratados de aluminio y hierro, cuyo efecto está limitado a reforzar las ligas estructurales de la arcilla.

Existen varias clasificaciones respecto a la salinidad y alcalinidad de los suelos, dos de los más importantes factores en la formación de agregados. Los parámetros a considerar son el porcentaje de sales (% sales), la conductividad eléctrica (CE), la relación de adsorción de sodio (RAS), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y el pH. En la tabla 4.1 se observa una clasificación donde, además de dichos parámetros, se establecen ciertas relaciones de proporción entre los iones principales.

Tabla 4.1 Clasificación de suelos (Richards, 1954; Aguilera, 1989; IGAC, 1995)

No salino - sódico (alcalino)	Salino - sódico (alcalino)
% Sales < 0.15; RAS > 13; PSI > 15; CE < 4.0 mS/cm; pH > 8.5 Na + Mg >>> Ca $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} \gg \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ El yeso es raro; pH < 8.5 si no hay carbonatos alcalino-térreos, o si PSI no excede mucho de 15	0.65 > % Sales > 0.15; RAS > 13; PSI > 15 CE > 4.0 mS/cm; pH ≤ 8.5 $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+} \gg \text{Ca}^{2+}$ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} \gg \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$
Normal	Salino
% Sales < 0.15; RAS < 13; PSI < 15 CE < 4.0 mS/cm; pH < 8.5 Carbonatos alcalino-térreos y yeso pueden o no estar presentes	% Sales > 0.65; RAS < 13; PSI < 15 CE > 4.0 mS/cm; pH < 8.5 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \gg \text{Na}^+$ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} \gg \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ Carbonatos alcalino-térreos y yeso son comunes

Los iones comunes en los suelos residuales y sedimentarios no marinos son el calcio, magnesio, sodio y potasio, usualmente en dicho orden decreciente de abundancia. Las

arcillas marinas y los suelos salinos contienen como catión dominante al sodio. Los aniones más comunes son sulfato, cloruro, fosfato y nitrato (Mitchell, 1993).

En contraposición a las sales de sodio que se lavan fácilmente del terreno, los compuestos de potasio son sujetados fuertemente por este último (a cuenta de la sorción por las arcillas). Esta circunstancia determina la relativa pobreza de las aguas naturales en sales potásicas, mientras que los compuestos de sodio se concentran en los mares (Nekrásov, 1981).

#### 4.1.2 Suelos dispersivos

El transporte de partículas en suspensión es otra manera en la que la masa se mueve en un sistema suelo-agua. Las partículas de interés son de tamaño coloidal. Las partículas que cesan su movimiento también son de interés; como ejemplos de filtración física que limita la migración de partículas están la formación de una capa superficial o pastilla de concentrado filtrado, conocida como pastilla de filtrado (*filter cake*), el tamizado (*straining*), y la sorción de partículas en el medio poroso. El primer tipo de filtración ocurre cuando las partículas son mayores que los poros del suelo, mientras que en el segundo las partículas pequeñas penetran en el medio poroso y son atrapadas en espacios pequeños (Domenico y Schwartz, 1990).

Los suelos donde las partículas de arcilla se separan espontáneamente entre sí y de la estructura del suelo, y quedan en suspensión en agua tranquila, se denominan *dispersivos*. La defloculación o dispersión de partículas individuales de arcilla coloidal que se repelen entre sí en la presencia de agua relativamente pura distingue a estos suelos de limos no cohesivos y arenas muy finas que también pueden ser erosionadas por el agua. La exposición de arcillas dispersivas al agua puede ocasionar la erosión superficial de taludes, túneles en revestimientos y diques de control, y fallas por *tubificación* en presas homogéneas (Fang, 1991; Mitchell, 1993). Mucho se ha hablado en la literatura de los efectos adversos de las arcillas dispersivas, pero hay problemas geotécnicos que son aliviados por medio de ellas, al emplearlas adecuadamente para reducir las filtraciones de almacenamientos y canales (Decker y Dunnigan, 1977).

Respecto del origen geológico y topografía, no son bien conocidos los diversos orígenes de las arcillas dispersivas. La mayoría de las encontradas han sido arcillas aluviales en la forma de depósitos de planicies de inundación, pendientes lavadas, depósitos en fondos de lagos y de *loes*. En algunas áreas, se ha encontrado que rocas arcillosas y esquistos, yacentes como depósitos marinos tienen las mismas sales del agua de poro que las arcillas dispersivas, y sus suelos residuales son dispersivos. Con pocas excepciones, todos los suelos de grano fino que se sabe fueron derivados del intemperismo *in situ* de rocas ígneas y metamórficas, así como todos los suelos derivados de calizas, han sido clasificados como no dispersivos. Las arcillas dispersivas han sido rojas, cafés, grises (algunas ligeramente blancas), amarillas y todas las transiciones entre ellas. Ningún suelo de color negro, con obvio alto contenido de materia orgánica, se ha clasificado como dispersivo. Los primeros estudios indicaban que los suelos dispersivos que ocasionaban problemas en la agricultura y estructuras hidráulicas se encontraban regularmente en zonas áridas y semiáridas, y con agua de poro comúnmente alcalina ( $\text{pH} > 8.5$ ); no obstante, en estudios más recientes de



proyectos de ingeniería, que incluyen presas dañadas, se han detectado arcillas dispersivas en zonas húmedas y algunas con pH ácido (Sherard y Decker, 1977).

Históricamente, se ha observado que los suelos dispersivos son, por lo general, solonetz o suelos sódicos (Sherard y Decker, 1977). Asimismo, el magnesio puede causar efectos similares al sodio (solonetz magnésicos) (IGAC, 1995); esto puede deberse a que esta especie es capaz de permanecer en solución a mayores valores de pH que el calcio, lo que explica su presencia en suelos con pH mayor de 8.5. Por otra parte, la importancia del componente osmótico en la dispersión de arcillas ha quedado ya de manifiesto en situaciones de campo (Jiménez, 1990).

Existen en la literatura varias pruebas para estimar la *dispersividad* de una arcilla. Las pruebas de flujo, como la de *pinhole*, intentan simular las condiciones de campo, mientras que las pruebas químicas sirven para proporcionar correlaciones empíricas; asimismo, los diversos métodos usados para identificación se pueden catalogar en cualitativos, como la prueba de doble hidrómetro, y cuantitativos, como las pruebas de expansión libre.

El comportamiento dispersivo de un suelo particular es el resultado de una compleja interacción que involucra propiedades del suelo (tipo de minerales arcillosos, porcentaje de sodio intercambiable, PSI, y pH) y propiedades de la solución (pH y concentración de sales). De los estudios fisicoquímicos del agua de poro se generan parámetros como: el total de sales disueltas (TDS), la relación de adsorción de sodio (RAS), el porcentaje de sodio (%Na) y el carbonato de sodio residual (CSR, en meq/L), que sirven de índices de correlación. La fuerza iónica (I) tiene una relación directa con la conductividad eléctrica y también afecta el pH. A mayor concentración de sales se puede inhibir el efecto dispersante del ion sodio. La relación RAS/TDS es una posible medida química de potencial de dispersión. Para bajas concentraciones de sales y valores altos de RAS la presencia de dispersión depende menos de la mineralogía; al incrementarse el pH disminuye la relación crítica para que ocurra dispersión (Sherard y Decker, 1977). Asimismo, los resultados pueden verse afectados por la cementación y el arreglo estructural de las partículas. Ya que la dispersión es un fenómeno coloidal producto de fuerzas interparticulares, las pruebas químicas deben ser consideradas en la evaluación de la dispersividad.

El sodio debe su efectividad como dispersante a su única carga positiva, con lo que las fuerzas de atracción coulombicas son menores, y los enjambres de iones pueden actuar a mayor distancia de la superficie de la partícula. El potasio también es univalente, solo que éste puede ser fácilmente incorporado en estructuras de cristal cuasiestables y entonces no está usualmente en cantidad suficiente para influir en la dispersión. Ya que la ósmosis exhibe una relación de primer orden con el número de iones presentes, los potenciales osmóticos son mayores en sistemas sódicos (Holmgren y Flanagan, 1977). El sodio por tanto promueve dispersión al crear un mayor potencial osmótico para el movimiento del agua dentro del espacio entre partículas y al incrementar la interacción repulsiva de largo alcance de las partículas a través de la película de agua resultante.

El sodio tiene un mayor radio hidratado que ocasiona un mayor espacio interlamina y dispersión de la arcilla. Las partículas de arcilla dispersada son libres de migrar con el lixiviado, alojándose eventualmente en los poros y obstruyéndolos, reduciendo efectivamente la permeabilidad. Sin embargo, si la concentración de sal en una arcilla fuera mayor que el agua libre para hidratar las sales, el radio hidratado efectivo del sodio y el

espacio interlamilar entre las partículas arcillosas podría disminuir. Entonces, mientras una arcilla saturada de sodio generalmente tendrá baja permeabilidad, dicha arcilla podría no dispersarse si la concentración de sales en el suelo fuera suficientemente alta. Sin la obstrucción de poros por la arcilla dispersada, los suelos con exceso de sales pueden exhibir mayores permeabilidades que un suelo saturado con sodio pero con menor contenido total de sales (Quirk y Schofield, 1955). Por tanto, la permeabilidad de un suelo puede depender más de la concentración total de sales que de la composición de cationes intercambiables.

Una explicación para la dispersión para bajos niveles de Na es la de la formación de paquetes o tactoides en las montmorilonitas. lo que justifica la gran sorción de agua y las altas presiones de expansión. La mayor preferencia por el calcio ocasiona que el sodio de las entrecapas sea desplazado y se acumule en una concentración equivalente en las superficies de los tactoides, que es proporcional a la cantidad de hojas que formen a los paquetes. La superficie externa de un tactoide de cinco hojas se satura para un 20% de Na, y al exceder dicha cantidad penetra a las capas internas y puede ocurrir la expansión interna o separación de los paquetes en unidades más pequeñas, lo que explica que se pierda la superposición de capas en las montmorilonitas sódicas.

La vermiculita y la mica son similares a la montmorilonita, pero a diferencia de ella, la expansión es muy limitada y no pueden dispersarse y reconstituirse a partir de láminas individuales. La caolinita es otro mineral principal entre las arcillas. Estructuralmente es muy distinto de la montmorilonita, y en consecuencia forma hojas más gruesas; esto produce una mayor relación de superficie borde-cara. Las cargas de superficie dependientes del pH, incluyendo las cargas positivas, están localizadas en estos bordes. La caolinita tendrá por tanto una mayor abundancia relativa de cargas positivas en un pH bajo y será en consecuencia menos dispersiva bajo estas condiciones. Además, debido a que la caolinita no puede formar estructuras de tactoides se podría esperar dispersión solamente en valores altos de sodio, mayores que los efectivos para las montmorilonita. Para pasar de un estado floculado a otro disperso en suelos que contienen caolinita y pH ácido se requiere un mayor valor relativo de sodio adsorbido, para la misma concentración de sales, que en otro tipo de arcillas y pH básico, respectivamente.

El secado al aire de algunas arcillas induce una reducción del porcentaje de sodio, usualmente por una disminución acompañante del contenido de sodio y un incremento en el contenido de calcio y magnesio. Esto puede significar que el secado ocasione que parte de los cationes de sodio se adhieran más firmemente a las partículas arcillosas y, por consiguiente, su migración hacia el agua libre de poro no sea instantánea, o bien, que el secado haga que el calcio y magnesio se adsorban menos a las partículas arcillosas y que su incorporación a la solución del suelo sea más rápida; ambos fenómenos pueden ser simultáneos. La dispersividad de una arcilla puede deberse en mayor grado a los cationes (valores altos de sodio o bajos de calcio más magnesio) que se adhieren a las partículas de arcilla, que a los cationes disueltos en el agua de poro libre. Este fenómeno podría explicar el hecho de que en la naturaleza, los suelos sujetos a largos periodos de secado y exposición a lluvias repentinas comúnmente son más erosionables que los suelos que están continuamente húmedos, no obstante que estén sujetos a lluvia más intensa (Sherard y Decker, 1977). Al disminuir el sodio respecto de la suma de calcio y magnesio, por equilibrio químico se produce una disminución en el pH, lo que indicaría que el bicarbonato estaría en un estado de ácido carbónico.

Muchos suelos alcalinos de textura fina a media, examinados en laboratorio, han resultado más permeables de lo esperado con base en sus altos porcentajes de sodio intercambiable. En algunos casos, la permeabilidad es tal que los suelos se pueden lavar fácilmente con grandes cantidades de agua de irrigación y remover el exceso de sodio intercambiable sin el uso de *mejoradores* químicos (cal, por ejemplo). Los suelos tienen varias características en común que incluyen un valor alto de pH (9 o mayor) un alto porcentaje de potasio intercambiable (25 a 40%) y un apreciable contenido de silicato soluble. En estos suelos se ha encontrado que la concentración de silicato (sal correspondiente del ácido silícico) varía de 5 a 40 meq/L, y cantidades adicionales de este anión, así como de sodio, se remueven por lavado. Como se muestra a través de la retención de etileno-glicol, la saturación de arcillas montmorilonitas con potasio, seguidas del secado, disminuye la expansión entrecapas. Más aún, por medio de estudios de difracción de rayos X se determinó que cuando las arcillas montmorilonitas se secan en la presencia de silicato de potasio, éstas se transforman en arcillas del tipo de las micas o ilitas, que tienen menor tendencia a expandir y dispersarse bajo la influencia de sodio intercambiable. Las determinaciones de retención de etileno-glicol hechas en algunos suelos alcalinos que tienen altos porcentajes de potasio intercambiable y que contienen apreciables cantidades de silicato soluble dan valores relativamente bajos para la expansión entrecapas. Mientras que se requiere mayor investigación para aclarar el papel del potasio intercambiable y silicato soluble, existe una indicación clara de que estos constituyentes son menos susceptibles a desarrollar en el suelo condiciones físicas de dispersión, como el sodio (Richards, 1954).

Los aniones, particularmente el bicarbonato, parecen ser importantes en la dispersión seguida por erosión de algunos suelos con cierto contenido de sodio entre bajo y medio. Por otra parte, los bicarbonatos son considerados importantes agentes para la migración de calcio, lo que explicaría la dispersión de algunos suelos citada por Ingles (Mitchell, 1993; IGAC, 1995). Asimismo, estadísticamente se ha observado que aguas con bicarbonatos dan lugar a suelos con mayores valores de PSI que aguas con cloruros (Richards, 1954).

El potencial zeta o electrocinético según se determina por electroósmosis se correlaciona bien con la sensibilidad. Dicho potencial es una medida del potencial de la doble capa, cuyos valores altos están asociados con mayores espesores de la doble capa y mayor sensibilidad. Para arcillas de baja salinidad (< 1 g de sal por litro de agua de poro) la sensibilidad se correlaciona bien con el porcentaje de cationes monovalentes en el agua de poro. Existe, por tanto, una dependencia de la sensibilidad en cuanto a la relación de cationes monovalentes respecto del total de cationes; un análisis en términos del RAS conduce a resultados similares (Mitchell, 1993). Por tanto la medida de sensibilidad puede servir para evaluar el grado de agregación del material y el de su estabilidad ante la desintegración mecánica y posible erosión (Silva y Callejas, 2002).

Queda entonces como una propuesta que, además del RAS, el RAP y la proporción de magnesio, bicarbonatos solubles y aniones como el cloruro, podrían ser otros parámetros que permitan proporcionar correlaciones empíricas para estimar la dispersividad a partir de pruebas químicas convencionales, mientras que la sensibilidad puede ayudar a evaluar el grado de agregación y resistencia a la erosión. El tipo de expansión osmótica podría evitar la dispersión en coloides del tipo de la bentonita y materia orgánica saturada con bases, ya que, aun cuando esté saturado, el material puede extenderse continuamente a través de los poros hasta obstruirlos.

## 4.2 Flujo de agua y transporte de sales

Diversos factores influyen en el comportamiento de un revestimiento de tierra arcillosa: tipo de mineral arcilloso y su textura (tamaño de partícula de suelo y distribución del tamaño de partícula), contenido de agua de moldeo, esfuerzo y tipo de compactación, esfuerzo efectivo, tipo de líquido permeante, su concentración, temperatura y tiempo de exposición. Esta obra geotécnica involucra deformación del suelo, estabilidad volumétrica y flujo de fluidos, sustancias químicas y energía en varias formas. Existen consideraciones que tienden a complicar el análisis de flujo y presiones en el suelo, como la posible existencia de tensiones en el agua de poro, diferencias de composición y campos de fuerza adsorbente de las superficies de las partículas, diferencias en fuerzas entre partículas y en el estado de energía del fluido de poro de un punto a otro debido a gradientes térmicos y químicos. Tales gradientes causan flujo de fluidos, deformaciones y cambios de volumen (Mitchell, 1993). El diseño tradicional de revestimientos, se ha basado principalmente en el flujo saturado y en la minimización de la conductividad hidráulica saturada (permeabilidad) del material usado como barrera. En los enfoques no tradicionales se pone mayor interés en la consideración de flujo no saturado, reacciones fisicoquímicas y transporte de contaminantes (Shackelford y Nelson, 1996).

Las propiedades mecánicas de los suelos dependen directamente de interacciones de las fases y de los potenciales aplicados (esfuerzo, carga hidráulica, potencial químico y eléctrico, y diferencias de temperatura). Debido a ello no basta conocer sólo las partículas del suelo, aun cuando su estructura nos indique las características de superficie y potenciales interacciones con otras fases.

### 4.2.1 Permeabilidad y su relación con la estructura del suelo

La permeabilidad es la propiedad de un material poroso que permite el paso o infiltración de un fluido a través de espacios vacíos (poros) interconectados.

El flujo del agua en el suelo es un caso especial del movimiento de fluidos en medios porosos. En condiciones de saturación, es posible tratar el flujo del agua como un fenómeno de condición estable, y despreocuparse de las fuerzas de inercia o aceleraciones; el flujo de agua es proporcional al gradiente hidráulico y a la conductividad. En el análisis del flujo del agua en suelos parcialmente saturados el principal efecto es el de la succión del suelo, la cual tiene como componentes a la matricial y osmótica. Si el agua del suelo está en condiciones de presión negativa o de potenciales negativos (suelo no saturado), se produce una fase de aire y el canal de flujo se modifica notablemente. La frontera del líquido consta de una superficie sólida con cierta configuración y de una interfase aire-agua. Ahora, las fuerzas que generan el flujo residen en la atracción del agua por las superficies sólidas y en la tensión superficial en la interfase aire-agua. A medida que disminuye el contenido de agua, el camino de ésta se hace más tortuoso, por cuanto el líquido fluye a lo largo de superficies y pequeños poros que retienen el agua bajo el potencial hidráulico existente (Baver *et al.*, 1980).

El movimiento del agua ocurre cuando hay diferencias de potencial entre diferentes puntos del sistema. El agua tiende a moverse en la dirección de menor potencial. Teóricamente, a cada fuerza que obra sobre el agua corresponde un potencial; se consideran varios

potenciales y combinaciones de ellos según el fenómeno que se estudie. El potencial total del agua,  $\Psi_T$ , se define como:  $\Psi_T = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_\pi + \Psi_M + \Psi_\Omega$ , donde  $\Psi_g$ ,  $\Psi_p$ ,  $\Psi_\pi$ ,  $\Psi_M$  y  $\Psi_\Omega$  son, respectivamente, los potenciales de gravedad, de presión, de sobrecarga, de la matriz del suelo y osmótico; usualmente, el potencial de sobrecarga se incluye como parte implícita del potencial de presión, aunque de esta manera los potenciales de gravedad y de presión dejan de ser iguales y opuestos. Ya que la componente de succión (consistente sobre todo en gradientes matricial, osmótico o termal) puede exceder el componente gravitacional, el agua puede moverse verticalmente hacia arriba y hacia abajo, o permanecer sin movimiento cuando el gradiente de succión balancea la fuerza de gravedad (Baver *et al.* 1980; Gavande, 1982).

Se ha observado que el agua avanza en el suelo como un frente de humedad (frente de mojadura). Dicho frente es más pronunciado en un suelo seco y abarca mayor distancia en un tiempo dado; en esta zona el gradiente de succión puede ser tan grande que constituye una fuerza de movimiento más intensa que la gravedad. Un suelo húmedo transmite agua mucho más rápidamente que uno seco, por lo que el movimiento descendente del frente es más gradual. En un tiempo dado de drenaje, el frente de mojadura se extiende más en suelos con poros más grandes que en un suelo fino, con poros más pequeños (Gavande, 1982); un ejemplo de esto en el campo se puede apreciar en los surcos representados en la figura 4.3, donde puede notarse un movimiento rápido y especialmente hacia abajo.

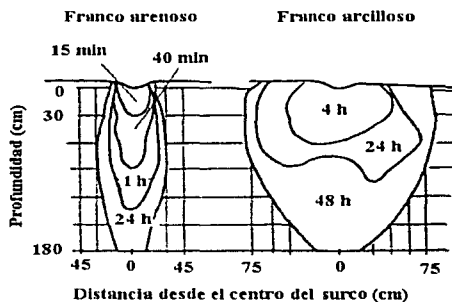
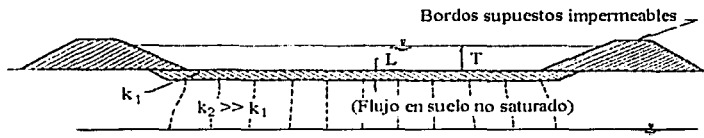
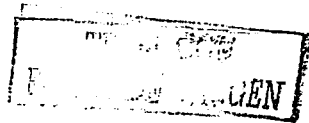


Fig. 4.3 Velocidad relativa de flujo de agua (Gavande, 1982)

La presencia de un revestimiento con baja permeabilidad en el fondo de un estanque conduce a un cierto mecanismo de filtración (fig. 4.4). Para estimar las filtraciones en un estanque, es usual considerar que el flujo a través del revestimiento está regido por la ley de Darcy. El gradiente de carga hidráulica actuante en el revestimiento se considera aproximadamente igual al tirante dividido entre el espesor del mismo. Debe subrayarse que esta consideración es discutible, puesto que abajo del revestimiento puede presentarse una zona de flujo no saturado en la que el fenómeno se vuelve más complejo debido en particular a la existencia de fuerzas de succión. La experiencia muestra sin embargo que, por lo menos para revestimientos de suelos compactados, el flujo es de hecho aproximadamente proporcional al tirante, como lo prevé la ley de Darcy (Auvinet y Esquivel, 1986).



Gasto de infiltración ( $m^3/s$ ) =  $Q = k_1 A i$  (Ley de Darcy)  
donde:  
 $k_1$ : coeficiente de permeabilidad (m/s)  
 $L$ : espesor del revestimiento (m)  
 $T$ : tirante (m)  
 $h$ : pérdida de carga hidráulica (m) =  $L + T$   
 $i$ : gradiente hidráulico =  $\frac{h}{L}$   
 $A$ : área del fondo del almacenamiento ( $m^2$ )

Fig. 4.4 Estanque con revestimiento impermeable (modificada de Auvinet y Esquivel, 1986)

La ley de Darcy establece una relación directamente proporcional entre el gasto de infiltración  $Q$  y el gradiente hidráulico  $i$  en los análisis de flujo y consolidación, es decir,  $Q = kiA$ ; donde  $k$  es el coeficiente de permeabilidad y  $A$ , el área de la sección transversal a la dirección del flujo. Existe evidencia de que dicha ley se cumple exactamente en arcillas saturadas, pero que pueden surgir aparentes desviaciones como resultado de la migración de partículas, efectos electrocinéticos y gradientes químicos de concentración (Mitchell, 1993).

El coeficiente de permeabilidad tiene las mismas unidades que la velocidad. El término coeficiente de permeabilidad generalmente es usado por los ingenieros geotécnicos; cuando se trata con la sola fase de agua, los geohidrólogos expresan la misma idea como conductividad hidráulica. El término *permeabilidad* se emplea en la industria del petróleo, donde los fluidos de interés son el aceite, gas y agua. Para considerar las propiedades del fluido se estableció el concepto de *permeabilidad intrínseca o absoluta* ( $K$ ), que está relacionada con la conductividad hidráulica  $k$  de la siguiente manera:  $K = (\eta/\rho g) \cdot k$ , donde  $\eta$ ,  $\rho$  y  $g$  son, respectivamente, la viscosidad dinámica, densidad y aceleración gravitatoria; de esta manera  $K$  tiene unidades de área; en general, la variación de la viscosidad en los líquidos usualmente presentes en el agua subterránea es pequeña, excepto cuando hay contrastes de temperatura; por ello, es usual emplear indistintamente los términos anteriores. En hidrogeología se emplea el concepto de *transmisividad* ( $transmissivity = kt$ ), para medir la efectividad de una unidad geológica como acuífero, y equivale a la conductividad hidráulica  $k$  multiplicada por el espesor productor  $t$ . Esta misma expresión y sus unidades se adoptaron en geotecnia para evaluar la función de drenaje de un geotextil. Asimismo, el término *permisividad* ( $permittivity = k/t$ ), se adoptó en geotecnia para referirse a la permeabilidad en el sentido transversal a la dirección del flujo gobernado por el gradiente hidráulico, por ejemplo, a través del tejido del geotextil de espesor  $t$  (Domenico y Schwartz, 1990; Das, 1994, Price, 2003).

Existen diferencias básicas en la naturaleza y comportamiento físico entre un suelo saturado y uno no saturado; este último consta de tres fases (sólida, líquida y gaseosa), y la presión

del agua de poro es negativa respecto de la presión de aire de poro. El proceso de excavar, remoldear y recompactar un suelo da como resultado un material no saturado. La caracterización del coeficiente de permeabilidad es una función de la presión de agua de poro negativa y es, por tanto, una variable en el análisis de flujo, por lo que debe considerarse esto en el procedimiento y equipo por utilizar para caracterizar dicho coeficiente en laboratorio (Fredlund y Rahardjo, 1993).

Los revestimientos se preparan compactando las arcillas del lado húmedo del contenido óptimo para alcanzar la mínima conductividad hidráulica posible para ese grado de compactación. Dicha compactación causa que las partículas de arcilla adquieran un arreglo más o menos paralelo entre sí y formen, por tanto, una estructura dispersa. La compactación de las barreras de arcilla que elimina los grumos y agregados, tiene la ventaja adicional de modificar la proporción de la porosidad efectiva, incrementando a su vez el tiempo de tránsito, ya que una fábrica dispersa incrementa la tortuosidad y reduce el tamaño de poro.

Para trabajar con valores mínimos de permeabilidad y disminuir diferencias en los mismos debido a la saturación incompleta de las muestras, en general el contenido de humedad correspondiente al óptimo Proctor se incrementa en un 3%; con esto se logran mayores grados de saturación (Bjerrum y Huder, 1957; Auvinet y Esquivel, 1986). Asimismo, se asegura que trabajando del lado húmedo de la curva de compactación el comportamiento es más similar al de suelos cohesivos que al de los granulares (Auvinet y Bouvard, 1989). El material se prepara previamente a la compactación, proporcionando el contenido de humedad adecuado, homogeneizándolo por mezclado y dejándolo curar en un cuarto húmedo durante un cierto tiempo para que el contenido de humedad se uniformice por difusión.

Cuando se exponen a especies químicas agresivas, las arcillas de alta plasticidad con gran contenido de agua, como pantallas de lodos bentoníticos y mezclas de suelo-bentonita, son más susceptibles a contracciones y agrietamientos que los suelos densamente compactados con bajo contenido de agua (Mitchell, 1994). Esto se debe a la mayor movilidad de las partículas y a la facilidad para cambios de fábrica en sistemas de alto contenido de agua.

Las investigaciones muestran que la permeabilidad de los GCL a soluciones salinas utilizadas por para deshelar es dependiente, en grado decisivo, del contenido de agua o grado de expansión de la bentonita. Si el revestimiento no se seca, y presenta contenidos de agua de aproximadamente 100 a 150%, las permisividades determinadas en las investigaciones, de  $1 a 4 \times 10^9 s^1$ , están dentro del mismo margen que en otras investigaciones de permeabilidad (Koerner *et al.*, 1995).

Un gran esfuerzo de compactación o un esfuerzo efectivo de confinamiento mayor de 70 kPa pueden hacer que una arcilla adecuadamente compactada sea invulnerable al ataque de químicos orgánicos concentrados (Broderick y Daniel, 1990). Los esfuerzos efectivos refuerzan al suelo, lo que implica la estabilización de enlaces y fuerzas entre partículas y disminución del efecto de otros factores, como el contenido de agua y la constante dieléctrica del fluido. Resultados de pruebas de conductividad hidráulica con moderados esfuerzos efectivos ( $0.70 \text{ kg/cm}^2$ ) indican que algunas cargas de cobertura o sobrecargas serían suficientes para restringir los cambios de estructura anticipados al diseñar revestimientos (Shaktour y Daignault, 1996). No obstante, no siempre es posible asegurar

altas densidades de compactación o mantener elevadas presiones de confinamiento, por lo que es útil conocer los efectos generales de distintos compuestos químicos.

Los parámetros importantes respecto a sustancias químicas inorgánicas son: concentración y tipo de solutos, pH y conductividad eléctrica de la solución, temperatura y tiempo de exposición. Las soluciones diluidas de compuestos inorgánicos pueden tener efectos significativos en la permeabilidad, como resultado de su influencia en la floculación y dispersión de partículas arcillosas (Evans, 1991; Mitchell, 1993). Incrementos significativos en la conductividad hidráulica pueden resultar de la floculación de las partículas arcillosas debido a interacciones con soluciones de electrólitos; altas concentraciones de sales pueden causar contracción de la matriz del suelo y agrietamiento de las arcillas con el consecuente aumento de permeabilidad.

Se han realizado varias investigaciones con relación a la interacción de sales con arcillas, pero en general sólo contemplan muy bajas concentraciones (~ 1% respecto a la saturación, o menores) (Quirk y Schofield 1955, Reeve y Bower 1960, Reeve y Tamaddoni 1965, McNeal y Coleman 1966, Mesri y Olson 1971, Hardcastle y Mitchell 1974, Mitchell y Madsen 1987). Por otra parte, en un estudio hecho por Alther *et al* (1985) con diferentes sales y concentraciones hasta del 8% en peso, específicamente con bentonita, se midió el coeficiente de permeabilidad de lodos (bentonita-salmuera). Otro experimento del mismo estudio consistió en mezclar el lodo con KCl en diferentes concentraciones (hasta 10%, en peso) y ver el patrón de agrietamiento. El coeficiente de permeabilidad se incrementó, dependiendo del electrólito usado, hasta en un orden de magnitud: con KCl al 10%, en peso, ocurrió cierto agrietamiento. Asimismo, en otra investigación, muestras de arcilla lavadas con soluciones de NaCl presentaron un incremento de permeabilidad al aumentar la concentración. El coeficiente  $k$  aumenta por un factor de 10 y de 50 al cambiar agua destilada por NaCl 1 M y 3 M, respectivamente. El aumento de permeabilidad puede atribuirse a una disminución en las fuerzas de repulsión interparticulares debido al incremento de la concentración de cationes en el fluido de poro. Además, la alta concentración previene la expansión libre desarrollada por esmectitas homiónicas sódicas en bajas concentraciones de electrólitos, restringiendo el espaciamiento entrecapas de 15 a 17 Å (dos a tres capas hidratadas) cuando la concentración (NaCl) alcanza valores arriba de 1.5 a 2 M (Slade *et al*, 1991).

Los efectos de sustancias químicas en la permeabilidad de arcillas pueden estar causados por los siguientes factores (Koerner, 1995):

- a) Contracción de la montmorilonita sódica expandida causada por intercambio iónico con cationes de mayor valencia ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) o cationes orgánicos. Reducción del volumen de expansión en la dirección de la expansión interna de los cristales, o como resultado de una adsorción específica en casos extremos al intervalo base (pérdida irreversible de la capacidad de expansión).
- b) Contracción causada por la reducción del espesor de la doble capa eléctrica (reducción en la repulsión electrostática de las partículas, expansión de la porción del espacio poroso que influye en el flujo, y en casos extremos reorientación y/o re-direccionamiento causado por soluciones de electrólitos (sales) o por un medio no polarizado de baja constante dieléctrica.



En agua, las sales neutras se disocian en cationes y aniones, y tanto unos como otros contribuyen al aumento del contenido electrolítico de la solución, de lo que resulta la compresión de la doble capa y afecta al volumen de expansión. Las sales alcalinas y alcalinotérreas producen un intercambio catiónico, fenómeno que está relacionado con la concentración y capacidad de intercambio, así como también influyen la electronegatividad y el radio iónico. Debido a su tamaño, algunos cationes (K y  $\text{NH}_4$ ) son de especial interés pues son adsorbidos específicamente, y cuando saturan la capacidad de intercambio provocan la contracción de las entrecapas de las esmectitas, lo que produce la contracción y pérdida de capacidad de expansión (Koerner *et al.*, 1995).

La composición de los cationes intercambiables y la concentración de equilibrio resultante de los cationes en el agua del suelo afectarán de manera importante la permeabilidad de un suelo arcilloso compactado (Marshall, 1959). En general, una arcilla saturada con cationes divalentes (como el calcio) es más permeable que una saturada con cationes monovalentes, como el sodio (Yong y Warkentin, 1975).

Las características más importantes del fluido son la constante dieléctrica, el momento dipolo y la viscosidad. Pruebas en suelos naturales indican un incremento de permeabilidad de  $5 \times 10^9$  a  $1 \times 10^4$  cm/s al disminuir la constante dieléctrica del líquido permeante de 80 (agua) a 2. Los valores calculados de la permeabilidad intrínseca mostraron la misma tendencia que la conductividad hidráulica debido a que los efectos de la constante dieléctrica en la doble capa de la arcilla opacaron completamente los correspondientes a la densidad y viscosidad del fluido (Fernández y Quigley, 1985). Dado que la adsorción de los fluidos no polares es despreciable y a que no se forman dobles capas difusas, los mecanismos que controlan los coeficientes de permeabilidad en las arcillas al utilizar fluidos no polares parecen ser sólo mecánicos. El hecho de tener prácticamente la misma permeabilidad en distintos minerales arcillosos implica la existencia de vacíos de similar tamaño y forma (Evans, 1991).

#### 4.2.2 Transporte de sales

La masa presente en el agua como iones, moléculas o partículas sólidas no solamente es transportada sino que también puede reaccionar, las reacciones redistribuyen la masa entre iones o fases líquida y sólida. El transporte de masa puede ser por dos mecanismos: advección y dispersión hidrodinámica. El primero se refiere al transporte del soluto a una velocidad equivalente a la del líquido en movimiento. Hay situaciones donde la velocidad lineal del agua es diferente de la velocidad advectiva de la masa; las cargas eléctricas de los minerales de arcilla pueden forzar a los aniones a permanecer en el centro de los poros, donde la velocidad microscópica es máxima; por otra parte, se puede producir una reducción en la velocidad advectiva cuando el medio poroso adquiere propiedades de membrana semipermeable, de tal manera que los solutos no pueden penetrarla por restricciones electrocinéticas o de tamaño. El segundo mecanismo se refiere a la propagación del frente de concentración de un soluto, más allá de la región que normalmente ocuparía debido sólo a la advección, como resultado de la variación espacial de la permeabilidad del medio poroso, la mezcla del fluido y la difusión molecular; esta extensión produce dilución de la concentración del soluto al ser transportada la sustancia

disuelta a través de un medio poroso. Por tanto, la dispersión hidrodinámica tiene dos componentes: difusión y dispersión mecánica.

La difusión molecular es un fenómeno fisicoquímico que se origina por el mezclado causado por el movimiento molecular aleatorio producto de la energía cinética termal del soluto. Los coeficientes de difusión en un medio poroso son menores que en líquidos puros, reducción causada por las colisiones con los sólidos del medio; la difusión se detiene sólo cuando el gradiente de concentración se anula. Entre tanto, la dispersión mecánica es un mezclado que ocurre como consecuencia de variaciones locales de velocidad respecto de una velocidad media de flujo, por lo que este mecanismo es una especie de proceso advectivo donde hay dilución. La principal causa de las variaciones en la dirección y proporción de transporte son las no idealidades del medio poroso en todas las escalas. La dispersión puede ocurrir en una dirección longitudinal o transversal. La longitudinal se da en la dirección del flujo y es causada por diferentes velocidades macroscópicas cuando parte del fluido se mueve a través de poros más amplios y menos tortuosos. La dispersión transversal se debe a la repetida división y deflexión del flujo por las partículas sólidas y solamente es efectiva en los extremos de la fuente de contaminación (Domenico y Schwartz, 1990).

No hay evidencia de una viscosidad del agua anormal o falla de la ley de Darcy en arcillas del tipo de las usualmente encontradas en la práctica geotécnica. Las propiedades de viscosidad y difusión son, para fines prácticos, las mismas que para el agua pura. Esto significa que en arcillas con alta plasticidad son aplicables relaciones lineales fuerza-flujo para el análisis de problemas de flujo hidráulico y difusión química, tales como la ley de Darcy y de Fick, respectivamente. Mientras que el flujo advectivo se basa en la ley de Darcy ( $q = ki$ ), el flujo por difusión sigue la ley de Fick, cuya ecuación está dada por:  $J_D = Di_c$ , donde  $i$  e  $i_c$  son los gradientes hidráulico y químico,  $q$  y  $J_D$  las velocidades de flujo hidráulico y químico,  $k$  la conductividad hidráulica y  $D$  el coeficiente de difusión, que es el parámetro de control en el flujo químico (Mitchell, 1993).

Básicamente, existen dos mecanismos de transporte químico en arcillas compactadas: la advección, donde las especies disueltas suspendidas se transportan por el flujo del líquido y que es función del gradiente hidráulico, y la difusión, donde el flujo es impulsado por gradientes de potencial químico, pero para la mayoría de las aplicaciones pueden usarse en el análisis gradientes químicos de concentración. El coeficiente de difusión se mide y expresa en términos de gradientes químicos (Mitchell, 1993).

Como resultado de evidencia de campo así como de modelos analíticos, dos conclusiones importantes de lo significativo de la difusión son que 1) la mejor barrera de confinamiento que puede construirse es una de control de difusión y 2) a menor permeabilidad el análisis basado sólo en la conductividad hidráulica (advección pura) es menos conservador. En suelos de grano fino, donde los valores de conductividad hidráulica son muy pequeños, esto es,  $k$  menor de  $1 \times 10^9$  m/s, el transporte químico puede controlarse por difusión. La importancia relativa de la advección y difusión al transporte químico total para suelos de distintas conductividades hidráulicas  $k$  son:  $k > 1 \times 10^8$  m/s: domina advección;  $1 \times 10^7 < k < 1 \times 10^8$  m/s: ambas son importantes;  $k < 1 \times 10^7$  m/s: domina difusión.

Los coeficientes de difusión química están típicamente en el intervalo de  $2 \times 10^{10}$  a  $2 \times 10^9$  m<sup>2</sup>/s para difusión a través de suelos y en el orden de  $3 \times 10^{14}$  m<sup>2</sup>/s correspondiente a la

difusión a través de geomembranas. En materiales con bajas conductividades hidráulicas, la difusión molecular de contaminantes puede ser importante relativa a la advección. Aun con difusión, no obstante, el transporte químico total a través de barreras de suelo y geomembranas será mínimo para sistemas de barreras de conductividad hidráulica baja, dado que la diferencia de carga a través de la barrera es pequeña. No hay un tipo de barrera que sea totalmente impermeable al transporte químico a través de él. Sin embargo, las barreras disponibles actualmente pueden construirse para cumplir las exigencias de conductividad hidráulica y ser suficientemente resistentes al flujo por advección y difusión, por lo que son seguras para la protección ambiental (Mitchell, 1994).

La difusión a través del suelo es más lenta y compleja que a través de una solución libre, especialmente si están presentes arcillas adsorbentes, debido a diversas razones, entre las que se mencionan: la reducida área para el flujo y la tortuosidad de las rutas, la influencia de campos de fuerza eléctrica producidos por la distribución de cargas de las dobles capas difusas, la retardación de algunas especies como resultado de intercambio iónico y adsorción mediante arcillas y materia orgánica o por precipitación, *contraflujo* osmótico y desequilibrio eléctrico, posiblemente por la *exclusión aniónica* (Mitchell, 1993).

Es posible que el coeficiente de difusión se incremente con el tiempo de flujo a través del suelo como resultado de procesos tales como (1) la fijación del  $K^+$ , la cual podría disminuir la capacidad de intercambio iónico (CIC) e incrementar el espacio de agua de poro libre; (2) desequilibrios eléctricos que podrían actuar para atraer cationes o aniones; (3) la consecución del equilibrio de adsorción y la consecuente supresión de la retardación de algunas especies (Mitchell, 1993).

A través de los revestimientos de arcilla compactada ocurre un transporte advectivo y difusivo de los lixiviados, por lo que para un diseño efectivo se requiere estimar la velocidad de dichos transportes. Usualmente, el lixiviado está compuesto de diversos cationes y aniones. Sin embargo, si el lixiviado es rico en cationes de una valencia en particular, ocurrirá entonces un canje en los sitios de intercambio de las partículas arcillosas, comenzando por los centímetros superiores en un corto tiempo y, a largo plazo, el revestimiento entero se volverá homoiónico, y su conductividad controlará el flujo a través de él (Achari *et al*, 1999).

Para predecir la conductividad hidráulica de líquidos permeantes de composición conocida se han desarrollado modelos de arcillas consolidadas que representan revestimientos de arcilla compactados con mayor humedad respecto del contenido óptimo basados en el modelo de grupos (Olson, 1962) y de la doble capa eléctrica, proponiendo una relación empírica para obtener el número de partículas por grupo en función de la presión de consolidación y de la concentración del soluto, desarrollándose ecuaciones que predicen razonablemente los datos experimentales para lixiviados que se comportan como soluciones homoiónicas. No obstante, las formulaciones que consideran el desarrollo de la doble capa son válidas sólo para bajas concentraciones, entre 0.1 y 1.0 mol/L (Achari *et al*, 1999).

Por otra parte, la teoría de la percolación trata sobre la conectividad entre arreglos de grupos de partículas y densidad de pequeñas grietas, discontinuidades entre grupos de suelo y cualquier otro defecto hidráulico. El grado de conectividad de los poros determina la permeabilidad, esto es, la facilidad con la cual el fluido puede moverse a través del

cuerpo poroso (Domenico y Schwartz, 1990). En la figura 4.5 se observa un conjunto conectado de fracturas (A) y otro con baja densidad de fracturas y desconectadas (B; 1 y 2).

En ingeniería, la permeabilidad es una de las propiedades asociadas con los materiales de construcción que más varían. La percolación es el modelo más sencillo para un número considerable de fenómenos físicos en los que el desorden está presente. La palabra *percolación*, del inglés *percolation*, está originada por el modelo de comportamiento de un fluido (agua) cuando atraviesa un medio poroso (suelo), es decir, cuando se infiltra. Debido a la naturaleza fractal del proceso de precolación, las propiedades del medio se vuelven dependientes del tamaño del espécimen. Cuando un fluido invade el suelo desplaza el fluido de poro y se infiltra a través de la red de porosidad interconectada siguiendo la ruta del mayor tamaño de poro según un patrón fractal (Di Maio *et al.* 2002).

En el modelo se propone una malla cuadrada, cuyos nodos ocupados, que se colorean de negro, se supone que corresponden a propiedades físicas diferentes de las de los nodos desocupados. Cada nodo puede, o no, estar ocupado de acuerdo con una probabilidad dada  $p$ . Si  $p = 0$ , no hay nodos ocupados, y el número de los que exhiben dicho estado crece con el valor de  $p$  (fig. 4.6).

Si  $p=0$ , no hay nodos ocupados, y el número de los que exhiben dicho estado, crece con el valor de  $p$ . Suponemos que los nodos ocupados corresponden a propiedades físicas diferentes a las de los nodos desocupados.

Por debajo de un valor crítico  $p < p_c$ , los nodos ocupados forman pequeños grupos o *clusters*, construidos con nodos vecinos ocupados. En un arreglo finito de grupos de fracturas, éstas pueden estar interconectadas, pero las conexiones entre varios grupos finitos puede no existir. Para un valor crítico  $p = p_c$ , se forma una agregado grande que conecta dos lados opuestos de la malla. Si  $p$  aumenta, el espesor del agregado se hace mayor.

Cuando una estructura cambia de una colección de muchas partes desconectadas a un gran conglomerado, se dice que tiene lugar un fenómeno de percolación. Simultáneamente, el tamaño medio de los agregados de tamaño finito que no están conectados al cluster principal decrece. Al incrementarse la densidad de fracturas, los grupos aislados llegan a ser menos frecuentes.

En el umbral de precolación,  $p = p_c$ , el cluster resultante es un objeto *fractal*, cuya dimensión puede ser calculada experimentalmente y, en algunos casos, teóricamente. Un umbral de percolación se define como la densidad de fracturas, o bien discontinuidades, que se intersecan lo suficiente para promover el flujo.

El cluster o agregado que aparece en el umbral de percolación, se denomina cluster infinito de percolación, porque su tamaño diverge cuando las dimensiones de la malla se incrementan indefinidamente. Por arriba del umbral de percolación, un grupo llega ser *infinito*, de tal forma que el flujo toma lugar a través del medio; sin embargo, muchos otros grupos pueden no estar conectados al infinito.

La posibilidad de que se forme una red interconectada de fracturas está en función de la densidad de éstas. Se dan varios ejemplos donde el umbral de percolación ha sido relacionado con el número promedio de intersecciones de una fractura aislada con las demás fracturas, así como con la densidad y longitud de éstas. Otros resultados están basados en esta última relación e indican que, cuando el producto de la densidad de

fracturas por el cuadrado de su longitud media promedio es igual a 1.5, se alcanza el umbral de percolación y el flujo comienza. Por debajo de dicho valor, las fracturas son insuficientemente conectadas para promover el flujo. Los resultados obtenidos son consecuencia de experimentos numéricos donde los patrones de fracturas (conectividad) son generados de forma aleatoria con computadora, conocidas las interacciones individuales. Es evidente que existen diferentes clases de fracturas y que los estudios de conectividad para estas clases, así como cualquier posible reunión de clases podría dar resultados que pudieran ser menos abstractos y más aproximados a los problemas de flujo reales. Esto es, si pueden identificarse las clases de fracturas de mediante representaciones (planos, sondeos) del lugar, quizá se podría dar información de naturaleza cualitativa o semicuantitativa a cerca del potencial de conectividad y del grado de conectividad que podría existir con base en estudios teóricos (Domenico y Schwartz, 1990).

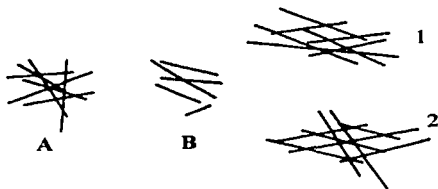


Fig. 4.5 Conjunto de fracturas (Domenico y Schwartz, 1990)



Fig. 4.6 Ocupación de la malla con distintas probabilidades (orden creciente de izquierda a derecha)

### 4.3 Efectos de flujo de calor y conductividad térmica

#### 4.3.1 Temperatura del suelo y transferencia de calor

Un sistema material posee cierta energía interna. La transferencia de calor hacia un cuerpo origina un aumento en la energía de agitación de sus moléculas y átomos, o sea, en su energía interna, lo cual, generalmente, produce una elevación de su temperatura. La temperatura es la condición de un cuerpo que determina la transferencia de calor a/o de otros cuerpos (Gavande, 1982). El calor se mueve espontáneamente en la dirección de la menor temperatura, debido al incremento de entropía, y lo hace mediante diversos mecanismos (radiación, convección, macro y micro destilación, conducción) (Fang, 1991). El flujo de calor a través de los suelos es principalmente por *conducción* (fenómeno molecular). Por tanto, la *conductividad térmica* es la propiedad esencial que controla el flujo de calor.

La transferencia de calor en los suelos es a través de las partículas sólidas, del agua y aire de los poros del suelo. La conductividad térmica dependerá de las relaciones volumétricas de estos componentes, del tamaño y ordenación de las partículas sólidas y de las relaciones de interfases. Como la conductividad térmica de los minerales del suelo es de aproximadamente  $2.9 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ , en tanto que para el agua y el aire de  $0.6$  y  $0.026 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ , respectivamente, la transferencia de calor se hace principalmente a través de la fase sólida

de la masa de suelo (Mitchell, 1993). Además, ya que el agua tiene más alta conductividad térmica que el aire, un suelo húmedo tiene una mayor conductividad térmica que un suelo seco. De acuerdo con esto, a menor relación de vacíos mayor será el número y área de contactos entre partículas, y a mayor grado de saturación mayor la conductividad térmica.

La conductividad térmica depende de la textura y composición del suelo. La conductividad térmica decrece al disminuir el tamaño de las partículas; en diferentes suelos tiene el siguiente orden: grava o arena > margas > cuarzo > silicatos de aluminio > humus (Gavande, 1982; Baver *et al* 1991). Por otro lado, las arenas cuarzosas tienen mayor conductividad térmica que las que tienen alto porcentaje de mica, plagioclasa, feldespato y piroxeno (Mitchell, 1993; Fang, 1991). Como la conductividad de los compuestos minerales de la fase sólida es del mismo orden de magnitud, las diferencias de conductividad provienen de las diferencias de conglomeración y porosidad del sistema. La compactación del suelo aumenta la densidad y, por consiguiente, la conductividad térmica del arreglo.

Las propiedades térmicas relevantes para el diseño de barreras son el calor específico de los fluidos y de los sólidos, e inversamente la relación de la cantidad de calor requerido para cambiar la temperatura de una masa de material en un grado, y la cantidad de calor requerido para elevar la misma masa de agua en un grado. Suele usarse el término de *capacidad térmica* para esta cantidad y considerar un término de capacidad térmica tanto de masa como de volumen. Entre los elementos que más influyen en la velocidad de enfriamiento o calentamiento de un suelo está el contenido de agua ( $\omega$ ), principal factor a considerar para calcular la capacidad térmica (Xanthakos, 1994).

El aumento de la conductividad térmica del suelo por elevación de la densidad es pequeño en comparación con el efecto de añadir agua al suelo. Las películas de agua que se forman en los puntos de contacto entre las partículas no sólo mejora el contacto térmico, sino que, además, el aire del espacio poroso es reemplazado por el agua, cuya conductividad térmica es 20 veces mayor que la del aire. La máxima rapidez de aumento en la conductividad ocurre para bajos contenidos de agua; el efecto de la densidad en la conductividad térmica es mayor para altos contenidos de agua. La difusividad térmica, que expresa la velocidad con la que un cuerpo se calienta, crece al principio rápidamente con el aumento de humedad hasta un máximo; esto se explica por el mayor aumento de la conductividad en los bajos valores de humedad comparado con el aumento de la capacidad térmica del sistema. El valor de la capacidad térmica aumenta al crecer la humedad y la conductividad se acerca al valor del agua, por lo que la difusividad ya no aumenta, e incluso disminuye si no se considera la transferencia térmica del agua (Baver *et al*, 1991).

Una de las principales propiedades del suelo empleado como revestimiento en un estanque solar es su conductividad térmica, pues de ella dependerán las pérdidas de calor al subsuelo, lo que afecta en parte la eficiencia del estanque. A menores valores de conductividad térmica se minimizarán las pérdidas térmicas. La conductividad térmica típica de un suelo probablemente está en el intervalo de 0.5 a 3 W/(m°C); asimismo, todos los minerales cristalinos en los suelos muestran una disminución en la conductividad térmica al incrementar la temperatura (Mitchell, 1993). En estudios anteriores (Almanza, Martínez y Segura, 1989; Almanza y Lozano, 1990) con una caolinita y una bentonita se obtuvieron conductividades menores de 0.6 W/(m°C), después de que muestras compactadas de estas arcillas interactuaron con salmueras calientes de NaCl por varios meses.

#### 4.3.2 Relaciones Temperatura-Volumen

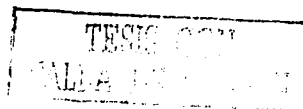
Los cambios de temperatura generan cambios de volumen y/o esfuerzos efectivos en suelos saturados, por lo que los efectos térmicos deben ser considerados con relación a sus influencias en el comportamiento del suelo, tanto en campo como en laboratorio.

Debido a que el nivel de energía del agua adsorbida es diferente del agua normal, puede haber consecuencias en términos de las presiones de poro medidas, mientras que los cambios de la estructura del agua que dependen del tiempo pueden influir en las propiedades físicas. El agua adsorbida fuertemente por los minerales de arcilla tiene consecuencias importantes en el comportamiento de expansión y compresión del suelo. La estructura del agua adsorbida y sus propiedades termodinámicas influyen en el flujo de calor y la acción de congelamiento de los suelos.

El efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de los suelos ha recibido relativamente menos atención que otros aspectos del comportamiento del suelo, excepto en términos del congelamiento y deshielo de los suelos. La temperatura influye en el resultado de ciertos estudios más de lo que generalmente se considera. Los cambios de volumen y el comportamiento de la presión de poro observados en suelos arcillosos sometidos a pruebas triaxiales con incrementos de temperatura pueden estar relacionados con las fuerzas de repulsión entre partículas en la doble capa de Gouy-Chapman, tal como lo discute Mitchell (1969). Sin embargo, se esperaría que la efectividad de este mecanismo dependería de la estructura de la arcilla. Una estructura orientada de láminas paralelas de arcillas sería probable que respondiera a la temperatura en una forma más aproximada a las predicciones hechas a través de la teoría de la doble capa difusa, de lo que se esperaría con una estructura de arcilla orientada al azar (Scott y Ko, 1969).

La explicación de los cambios en las propiedades de los suelos por efecto de la temperatura está basada en diferentes mecanismos, entre los que se mencionan como probables la variación del espesor de la doble capa difusa de Gouy-Chapman, la modificación de la viscosidad del agua y los efectos acompañantes en los arreglos geométricos de las partículas de suelo. El incremento en la energía térmica produce una disminución de la resistencia de la unión entre partículas, pero al mismo tiempo hay una reducción de la relación de vacíos. Es posible que en ciertas muestras la disminución de la relación de vacíos compense a la de resistencia de unión entre partículas. En el caso de un suelo con bajo coeficiente de permeabilidad puede favorecerse la acumulación de presiones de poro uniformes y no uniformes con altas temperaturas ( $> 40^{\circ}\text{C}$ ) que no pueden disiparse fácilmente y, por tanto, resultan menores resistencias y densidades. Para verificar y sustentar resultados es necesario extenderse más en estudios de densidades y otros factores, como la actividad, pH y iones adsorbidos, adicionalmente al tipo y cantidad del mineral de arcilla, que permitan explicar el comportamiento de las arcillas (Laguros, 1969).

Según una interpretación mecanicista, un suelo cohesivo puede considerarse como compuesto por plaquetas de arcilla, de varias formas y tamaños, empacadas de una forma que depende de su manera de depositarse (o preparación artificial) y de su ambiente. Las cargas externas son aplicadas al material a través del sistema en los puntos de contacto entre las partículas. De acuerdo con este concepto, la estructura de la arcilla puede imaginarse como una compleja armadura tridimensional, con los puntos de contacto como



nudos o articulaciones. Las fuerzas en los contactos son producidas por las fuerzas de atracción de Van der Waals, fuerzas de repulsión debidas a la interacción de las dobles capas eléctricas de las superficies de la arcilla, y una porción de las fuerzas externas. Si las dobles capas eléctricas se expanden y, en consecuencia las fuerzas repulsivas se incrementan, puede esperarse un reajuste de la estructura del suelo bajo las cargas aplicadas. En función de este modelo mecanicista de comportamiento de suelo y de las fuerzas entre partículas, la expansión de la doble capa eléctrica disminuye los esfuerzos efectivos, lo cual permite fallas al corte en los contactos entre partículas. La disminución de volumen (consolidación) es una manifestación de tales fallas (Plum y Esrig, 1969).

En arcillas activas, como la montmorilonita sódica, y a bajas presiones de consolidación, el contacto entre partículas es pequeño; consecuentemente, la expansión de la doble capa eléctrica por calentamiento podría causar un incremento de volumen, similar al que ocurre por lavado de sales. En el caso de arcillas menos activas los contactos entre partículas son más importantes. La expansión de la doble capa podría, en este caso, reducir los esfuerzos efectivos en los puntos de contacto y permitir que ocurran deformaciones por cortante y consolidación. El argumento anterior sugiere que, cuando un suelo cohesivo con un significativo número de contactos se somete a calentamiento, esto conduce a un incremento en la compresibilidad observada a bajas presiones en diversas pruebas reportadas. Asimismo, algunos autores encontraron experimentalmente que los límites líquido y plástico de los suelos decrecen al incrementar la temperatura (Yossef *et al.*, 1961), y lo atribuyeron exclusivamente a la disminución de la viscosidad del agua; no obstante, las pruebas de límites son una medida de la resistencia al corte del suelo y, por tanto, los resultados se explican mejor con referencia al modelo anteriormente discutido (Plum y Esrig, 1969). A este respecto, la disminución del límite líquido e índice de plasticidad implicarían una reducción de la compresibilidad, como puede comprobarse al observar la variación de las propiedades físicas en la Carta de Plasticidad (Juárez y Rico, 1986), por lo que podría entenderse que, al ser calentado, el material pierde resistencia y sufre una disminución de volumen, para luego pasar a un estado de mayor estabilidad. De acuerdo con lo anterior, factores como el tipo de arcilla, arreglo geométrico final de las partículas, remoldeo y adición de soluciones acuosas, así como cambios inducidos por la temperatura, son importantes para relacionar las variaciones de plasticidad, compresibilidad y permeabilidad.

Las variaciones de volumen y presión de poro desarrolladas en suelos saturados debido a cambios de temperatura pueden expresarse en términos de la expansión térmica y compresibilidad de los componentes del suelo (minerales del suelo y agua de poro) y de los efectos fisicoquímicos (cambios inducidos térmicamente en la estructura del suelo, específicamente en las fuerzas interparticulares de cohesión y/o resistencia a la fricción, que requiere de una reorientación de partículas que permita a la estructura del suelo soportar el mismo esfuerzo efectivo). En condiciones drenadas y con presión de confinamiento constante, un cierto volumen de agua drenará de un suelo saturado como resultado del incremento de temperatura.

Resultados de pruebas triaxiales drenadas mostraron que una permanente disminución de volumen puede ocurrir durante un incremento inicial de temperatura. Durante el primer ciclo de calentamiento se drena de la muestra un cierto volumen de agua. Los datos sugieren también que un incremento de temperatura en condiciones drenadas con esfuerzos

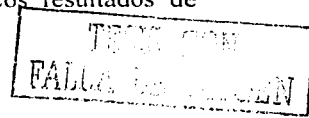


efectivos constantes seguido de un enfriamiento puede tener el mismo efecto que la preconsolidación que resulta de aplicar un incremento de presión seguido de una descarga (Mitchell, 1969).

En condiciones no drenadas, un aumento de temperatura causa una disminución en el esfuerzo efectivo. El criterio establecido para la condición no drenada es que los cambios volumétricos de los constituyentes del suelo debidos tanto a cambios de temperatura como de presión, sumados individualmente, deben ser iguales a la suma de los cambios de volumen de la masa de suelo por cambios de temperatura y presión. Los factores que controlan los cambios de presión de poro son la magnitud del incremento de temperatura, la porosidad, la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica de los granos de suelo y agua, la deformación volumétrica debido a efectos fisicoquímicos, la compresibilidad de la estructura de suelo y los esfuerzos efectivos iniciales. Por cada grado de cambio en la temperatura, la presión de poro varía del 0.75 al 1% del esfuerzo efectivo inicial, y para materiales menos compresibles el efecto es mayor. La variación de temperatura desde el instante de la formación de un depósito de suelo hasta un cierto momento posterior puede dar lugar a una variación en el comportamiento del suelo. Cuando se extrae una muestra y se lleva a laboratorio para realizar pruebas puede sufrir variación de propiedades debido a la diferencia de temperatura entre el terreno y el laboratorio. La reducción de temperatura en un suelo cohesivo suele causar un hinchamiento del suelo y que parte del aire ocluido en el fluido intersticial pase al estado gaseoso (Lambe y Whitman, 1987). Lo anterior resalta la importancia tanto de controlar la temperatura en laboratorio para evitar resultados ambiguos, así como de prever posibles diferencias en las propiedades entre suelos *in situ* y laboratorio por diferencias de temperatura.

La cantidad de consolidación inducida por incrementos de temperatura está relacionada con la compresibilidad; a mayor compresibilidad mayor consolidación para un cierto incremento de temperatura. Plum y Esrig (1969), y Laguros (1969), intentan explicar la sensibilidad a la temperatura basados en cambios en fuerzas de repulsión causadas por los gradientes térmicos. Una disminución de volumen asociado con el calentamiento del suelo es debido a una expansión de la doble capa, que implica un aumento de las fuerzas de repulsión y una disminución del esfuerzo efectivo y de la resistencia en los contactos entre partículas. No obstante, un incremento de temperatura trae consigo una disminución de la constante dieléctrica por lo que las presiones de repulsión son invariables en un intervalo de 0 a 100°C. En vista de estas consideraciones no parece que el aumento de las fuerzas de repulsión de la doble capa sea el mecanismo principal en la compresión (a través de la reducción de los esfuerzos efectivos entre partículas) que ocurre por calentamiento. Es más probable que la propia estructura de contacto entre partículas se debilite debido a un incremento en la energía térmica de los átomos que las constituyen (Mitchell, 1969).

En cuanto a resistencia, datos experimentales sugieren que para todos los demás factores constantes (estructura y contenido de agua), menores resistencias están asociadas con mayores temperaturas. No obstante, Laguros indica un progresivo aumento en la resistencia con la temperatura (1.7 a 40.5°C). Sin embargo, las muestras probadas fueron compactadas a la temperatura de prueba, en consecuencia las muestras compactadas a mayores temperaturas adquirieron mayores densidades (y posiblemente diferentes estructuras) en comparación con las preparadas a menores temperaturas. Como resultado de esto, los valores de resistencia reflejan la variable adicional de la densidad. Los resultados de



Laguros de LL muestran consistentemente una disminución con el incremento de temperatura, como sería de esperar dado que el LL es también una medida de resistencia y para los altos contenidos de agua asociados con el LL la estructura inicial y la densidad son de limitada consecuencia. Otros resultados confirman que a mayor temperatura de consolidación mayor es la resistencia al esfuerzo cortante a cualquier temperatura de prueba, lo que confirma lo anterior; no obstante, para una temperatura dada de consolidación, la resistencia disminuye al incrementar la temperatura de prueba. Por tanto, la preponderancia de los datos disponibles indica que, para otros factores constantes, un incremento en la temperatura conduce a una disminución en la resistencia (Mitchell, 1969).

Los minerales arcillosos son sustancias resistentes a la acción de la temperatura y algunos de ellos se consideran materiales refractarios (caolinita, crisolito). Sin embargo, su calentamiento produce cambios estructurales y reacciones de deshidratación, deshidroxilación y síntesis de nuevas fases cristalinas dentro de las formas deshidratadas resultantes. Los procesos de deshidratación tienen lugar a bajas temperaturas (entre 20 y 350°C), y consisten en la pérdida de moléculas de agua que se encuentran sobre las capas minerales o en los espacios entrecapas (IGAC, 1995). El calentamiento del suelo a altas temperaturas puede producir una marcada mejora de sus propiedades esfuerzo-deformación. La estabilización de suelos, en el sentido de la modificación permanente de propiedades como la resistencia y estabilidad volumétrica, puede realizarse por diversos métodos. La estabilización térmica por calentamiento se basa en la observación de que el calor aumenta la resistencia de cualquier arcilla; dicho efecto es irreversible sólo para temperaturas para las cuales la rehidratación de la arcilla no sea posible. Por tanto, el calentamiento es particularmente útil para reducir el potencial de expansión de los suelos arcillosos (Rico y del Castillo, 1984).

De todo lo anterior se puede concluir que los cambios de volumen totales que resultan de cambios en la temperatura suelen no ser grandes; no obstante, el debilitamiento estructural y los cambios en la presión de poro que surgen pueden ser significativos en términos de sus efectos en la deformación por cortante y resistencia (Mitchell, 1993).

#### 4.3.3 Flujo impulsado térmicamente

Se sabe que el agua se mueve de un suelo caliente a uno frío, esto se ha comprobado al medir un potencial del agua más alto (succión más baja) en suelos fríos; no obstante, según el criterio de la velocidad de producción de entropía, en un sistema cuya temperatura no está en equilibrio puede darse flujo de calor, acompañado de agua, en respuesta a una transferencia de calor y sin que exista una diferencia de potencial del agua en el sentido usual; un suelo caliente retiene menos agua cualquiera que sea su potencial. Los gradientes térmicos causan directamente el flujo de agua de las partes frías del suelo, tanto de la fase líquida como de vapor. Esta transferencia puede existir con cualquier contenido de humedad, pero se vuelve más importante a medida que el suelo se seca, por lo que en un sistema en equilibrio los gradientes térmicos son cada vez más importantes que el potencial gravitatorio para mover el agua en suelos húmedos con potenciales de agua bajos (succión alta), y aumenta conforme los suelos se tornan más secos. La influencia de la temperatura es distinta en diferentes suelos y con distintos contenidos de humedad, por lo que debe tomarse en cuenta al evaluar el potencial del agua de cada material (Gavande, 1982).

Los análisis teóricos del acoplamiento de flujos de calor y agua a través del suelo se han basado en la termodinámica irreversible, y se han medido corrientes termoeléctricas. Los efectos térmicos en suelos saturados son muy pequeños, midiéndose corrientes termoeléctricas y presiones termoosmóticas muy pequeñas. Se han estudiado redes de flujo en diferentes direcciones debido a las diversas dependencias térmicas de los coeficientes de actividad química. No obstante, no se sabe si estos pequeños efectos termoeléctricos y termoosmóticos son de importancia práctica en problemas geotécnicos. Por otra parte, los flujos producidos térmicamente en suelos parcialmente saturados pueden ser grandes, siendo importantes en problemas de estabilidad del subsuelo y de suelos expansivos, así como en diversos problemas de transferencia de calor y almacenamiento (Mitchell, 1993).

Varios autores han demostrado una relación lineal entre el gradiente de temperatura y el flujo osmótico; en particular, en una investigación empleando una membrana de celofán con tamaño muy pequeño de poros, se notó que la conductividad térmica de la membrana generalmente disminuyó al incrementar la temperatura en un intervalo de 40 a 52°C, y aumentó entre 52 y 60°C (Domenico y Schwartz, 1990). Por lo anterior, es importante investigar para estar seguros si pueden darse situaciones similares en ciertas arcillas coloidales especiales, antes de afirmar de manera absoluta que la conductividad es inversamente proporcional, en cualquier intervalo, a la temperatura, como ya se mencionó.

Se ha tratado de explicar cuál es el efecto de la temperatura en la transferencia simultánea de masa y calor a través del suelo mediante modelos teóricos; sin embargo, este problema es muy difícil de resolver debido a que los coeficientes y parámetros varían fuertemente con el contenido de humedad y la temperatura, además de que la mayoría de ellos se tienen que determinar experimentalmente para cada fluido y tipo de suelo. Respecto del flujo impulsado térmicamente, la teoría más ampliamente usada para el flujo de calor y humedad a través de los suelos es la de Philip y DeVries; en ella se considera el flujo de las fases de vapor y líquida (Mitchell, 1993). Los cambios de temperatura pueden causar flujo de aire y agua y, como consecuencia, cambios volumétricos dentro de la masa de suelo. Por tanto, en un suelo no saturado debe formularse un flujo unidimensional que incorpore los gradientes de temperatura, así como el flujo de vapor de agua, ya que éste puede ser un factor significativo en condiciones no isotérmicas.

Se han hecho varios experimentos tratando de modelar las condiciones para el confinamiento de desechos radiactivos que producen un incremento de temperatura en las proximidades de los dispositivos para contenerlos. Los resultados obtenidos sobre el comportamiento de mezclas compactadas de bentonita con arena, a través de pruebas triaxiales a temperaturas y presiones de hasta 100°C y 10 MPa, respectivamente, muestran que al mantener constantes los esfuerzos efectivos los incrementos de temperatura producen una compresión; asimismo, las altas temperaturas disminuyen la resistencia al corte. El incremento de la temperatura causa algunos cambios en el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo, pero el efecto de éstos es pequeño. Aunque la compresibilidad, rigidez y generación de presión de agua de poro están afectadas por la temperatura, los efectos del calentamiento con drenaje no son marcados (Lingnau *et al.*, 1995). Por otro lado, como resultado de pruebas con bloques compactados de bentonita, que han sido hidratados y calentados hasta 100°C en celdas de acero inoxidable durante periodos de hasta 2500 h, se obtuvo como resultado que los procesos de hidratación no son afectados por el gradiente térmico, siendo la alta succión de la bentonita el factor crítico en

la hidratación de la barrera arcillosa. Un marcado ambiente salino se detectó cerca del calentador, debido a la migración de sal cerca de aquél, lo que a su vez se atribuye a la migración de sal cerca de las áreas secas, fenómeno que depende también del tipo de la movilidad del anión y que debe ser considerado en las investigaciones sobre el comportamiento mecánico y geoquímico de las barreras arcillosas. El desarrollo de un gradiente de concentración salino se desarrolla inmediatamente después del emplazamiento del revestimiento según se va saturando. La existencia de un ambiente salino cerca del calentador podría facilitar la corrosión del recipiente y probablemente causa una mayor permeabilidad (Villar *et al.* 1995).

El efecto de la temperatura en la interacción suelo-agua, que puede suponerse a partir de apropiadas consideraciones fisicoquímicas, se estudió en arcillas naturales en un intervalo de temperaturas entre 30 y 99°C por Baver y Winterkorn (1935), quienes dividieron el agua de interacción total (de expansión) correspondiente a altos contenidos de agua en: 1) agua de hidratación, cuya unión está asociada con un considerable calor de humedecimiento, y 2) osmótica, agua relativamente no restringida entre los cationes hidratados en lo que muchos llaman la doble capa difusa. Ambos tipos de agua están intrínsecamente relacionados con la constante dieléctrica. Ya que dicha constante disminuye al aumentar la temperatura, y más rápidamente de lo que la energía cinética de los iones intercambiables se incrementa con la temperatura, tras una elevación de ésta en un sistema de suelo saturado puede esperarse una disminución, tanto en el agua de hidratación como osmótica. Esto significa que para un contenido total de agua constante, un incremento de temperatura disminuye la porción que está restringida e incrementa la porción que es libre, en tanto que también disminuye la viscosidad de la última. Este efecto de temperatura es completamente lineal en sistemas arcilla-agua relativamente puros dentro de un intervalo limitado de temperatura, pero se vuelve más complicado aun en estos sistemas cuando temperaturas altas pueden causar marcados efectos de dispersión o floculación en función del mineral de arcilla y tipo de ion de intercambio. La complejidad es todavía mayor con la presencia de minerales no arcillosos de tamaños de limo y mayores. El fenómeno básico, no obstante, es una disminución del agua de interacción ante un aumento de temperatura. Dicha disminución normalmente causa un incremento de permeabilidad; sin embargo, la permeabilidad puede disminuir por un fuerte efecto de dispersión, especialmente si la arcilla está contenida dentro de los intersticios de un esqueleto granular grueso (Winterkorn y Fang, 1991).

#### *4.4 Flujos asociados*

El agua se mueve a través del suelo en respuesta a varias fuerzas que actúan sobre ella. Entre éstas están el gradiente de presión y las fuerzas gravitatoria, adsorbente y osmótica. Además, los gradientes térmico y eléctrico pueden imponer fuerzas sobre el agua del suelo y causar su movimiento bajo ciertas circunstancias (Hutcheson, 1958). Estos procesos son parte de una serie más numerosa de fenómenos denominados *acoplados* o *asociados* (*coupled*), en el sentido de que el movimiento no puede ser descrito como una relación simple entre el flujo y una sola fuerza impulsora (Domenico y Schwartz, 1990).

Los fenómenos de acoplamiento de energía pueden fundamentarse en dos principios, el de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica) y el de Le Châtelier (Di Maio

*et al*, 2002). El primer principio establece que, aun cuando la energía se transforme de una forma a otra y se transfiera de un cuerpo a otro, la cantidad de energía es una constante del sistema; según el principio de Le Châtelier, en un sistema que está en equilibrio, físico o químico, cualquier perturbación proveniente del exterior (alrededores del sistema), que afecte cualquiera de los factores de que depende el equilibrio, hará que éste se desplace de manera que se disminuya el efecto causado, por ejemplo, por el cambio de presión, la adición o eliminación de calor, de un reactivo, o de un producto (cambio de concentración). Ahora bien, es imposible que un cambio real sea reversible, ya que ningún proceso puede estar en estado de equilibrio y a la vez cambiando; por tanto, los procesos reversibles deben considerarse como un caso límite de cambios reales que siempre son irreversibles, al igual que los efectos de acoplamiento mecánico-químicos. La tixotropía es un claro ejemplo de asociación de un efecto inverso e irreversible, donde el resultado de someter un sistema a una excitación mecánica es un proceso químico, donde los iones que inicialmente rodean a la arcilla son desplazados de su configuración de mínima energía durante el proceso de carga y deformación del esqueleto, y que posteriormente se difunden de nuevo hacia posiciones de menor energía (Fletcher, 1993; Di Maio *et al*, 2002).

De acuerdo con la revisión de la literatura, pueden señalarse algunos hechos válidos acerca del transporte de agua a través del suelo en respuesta a gradientes de solutos y de temperatura en las condiciones de campo. Variaciones normales, ya sea en temperatura o en concentración de solutos, pueden alterar la conductividad hidráulica del suelo por lo menos al doble. El potencial de agua parece depender de la temperatura, la presión, el contenido de agua y la composición del sistema. Cada uno de estos términos influye en el potencial de agua independientemente de los demás. Los cambios térmicos y osmóticos afectan tanto al potencial de agua como a la conductividad hidráulica. También el flujo de calor y el de solutos a lo largo de gradientes de temperatura y de concentración, respectivamente, afectan el flujo neto del agua (Gavande, 1982).

Virtualmente, todos los problemas geotécnicos involucran la deformación y estabilidad de suelos o rocas, estabilidad volumétrica, así como el flujo de fluidos, sustancias químicas y energía en varias formas. Incluso, los diversos flujos comúnmente juegan un rol importante en la deformación, cambio de volumen y la propia estabilidad; por ello, es importante su descripción, la predicción de sus magnitudes y variaciones con el tiempo, y el cambio en las propiedades y composición, tanto de la sustancia que fluye como de la masa a través de la cual lo hace.

La aplicación prolongada de campos de potenciales hidráulicos, químicos, eléctricos o térmicos a través de la masa de suelo puede causar cambios significativos en el estado y propiedades del suelo, así como flujo dentro y a través de él. Dichos cambios pueden ser benéficos, como en la consolidación por electroósmosis, o perjudiciales, como en el agrietamiento por contracción de barreras de arcilla resultado de una prolongada exposición a líquidos orgánicos no polares. Entre los efectos que pueden observarse están:

- Hidroconsolidación; esto es, consolidación por fuerzas de filtración
- Consolidación electroosmótica; esto es, consolidación debida al drenaje de agua en un campo eléctrico de corriente directa

- Reacciones electroquímicas, como generación de gas, descomposición de electrodo, intercambio iónico, y cambios de pH
- Secado térmico
- Cambio de volumen inducido químicamente mediante los cuales las diferencias de concentración química en las fronteras y cambios en la composición del fluido de poro causan expansión o contracción del suelo.

Las magnitudes de dichos efectos dependen de varios factores, como:

- Magnitudes y tipos de gradientes de potencial que actúan en el suelo
- La composición del suelo y del fluido de poro
- El estado inicial del suelo, especialmente su contenido de agua, saturación, densidad y compresibilidad
- Ambiente químico, por ejemplo, composición de electrodos, concentraciones y composición de los fluidos en las fronteras de la masa de suelo.

Mientras más fino sea el suelo, más activos son los minerales de arcilla; a menor relación de vacíos, más importante es el efecto de membrana; esto es, más importante son los flujos inducidos química y eléctricamente a través del suelo relativos a los hidráulicos, y más efectiva es la arcilla en términos de prevenir el paso de algunos iones y moléculas a través de él. Por otro lado, a mayor contenido de agua y relación de vacíos, y a mayor compresibilidad, más importantes son los cambios en el estado del suelo que son causados por los distintos campos de potencial.

El flujo de agua ha sido intensamente estudiado por su papel en el análisis de problemas de filtraciones, consolidación y estabilidad. Los flujos químico, térmico y eléctrico en suelos tienen gran importancia en relación con contaminación del subsuelo, almacenamiento y disposición de desechos, remediación de sitios contaminados, corrosión, fenómenos de lixiviación, efectos osmóticos en estratos de arcillas y estabilización de suelo. El flujo de calor encuentra aplicaciones en acciones de congelamiento, construcción en áreas de *permafrost* (terreno permanentemente helado), aislamiento, almacenamiento subterráneo, contaminación térmica, estabilización térmica temporal y permanente por congelamiento y calentamiento, respectivamente, transmisión de electricidad subterránea. Los flujos eléctricos son importantes en el transporte de agua y estabilización de tierra por electroósmosis, de aislamiento y corrosión, e investigaciones del subsuelo.

En adición a los cuatro tipos de flujo, cada uno impulsado por su propio gradiente de potencial, los flujos asociados pueden ser importantes bajo ciertas circunstancias. Un flujo asociado es un flujo de cierto tipo, por ejemplo hidráulico, impulsado por un gradiente de potencial de otro tipo, tal como el eléctrico. Debido a la heterogeneidad interna de distribución de iones, restricción en los movimientos de iones causados por las atracciones y repulsiones electrostáticas y la dependencia de estas interacciones con la temperatura, pueden observarse una variedad de efectos micro y macroscópicos en una masa de suelo sujeta a gradientes de flujo de diversos tipos. Particularmente, se ha observado que un tipo de gradiente puede causar un flujo de otro tipo, de acuerdo con la expresión:  $J_i = L_{ij}X_j$ , donde  $J_i$  y  $X_j$  se refieren a cierto tipo de flujo y gradiente, respectivamente y  $L_{ij}$  corresponde a los coeficientes de acoplamiento.

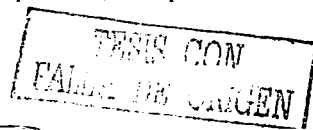
En la tabla 4.2 se muestran los tipos de flujo asociados que pueden ocurrir y los términos usuales para describirlos. Adicionalmente a los procesos hidráulicos, térmicos, eléctricos y químicos listados en dicha tabla, también pueden ocurrir un tipo de asociación mecánica en suelos y rocas. Una manifestación común de ello en aplicaciones geotécnicas se da en el desarrollo de un exceso de presión de poro y del flujo de fluido que acompaña a un cambio en los esfuerzos aplicados, que usualmente es más fácilmente manejado por los métodos tradicionales de mecánica de suelos.

Tabla 4.2 Flujos asociados (Mitchell, 1993)

Flujo $J$	Gradiente $X$			
	Carga hidráulica	Temperatura	Eléctrico	Concentración química
Fluido	Conductividad hidráulica (ley de Darcy)	Termoósmosis	Electroósmosis	Ósmosis Química
Calor	Transferencia de calor isotérmica	Conductividad térmica (ley de Fourier)	Efecto Peltier	Efecto Dufour
Corriente	Corriente de filtración	Termoelectricidad (efecto Seebeck)	Conductividad eléctrica (ley de Ohm)	Potenciales de difusión y de membrana
Ion	Corriente de filtración	Difusión térmica de electrolito (efecto Soret)	Electroforesis	Difusión (ley de Fick)

Un ejemplo de acoplamiento de procesos mecánico-químicos que modifican la estructura de una arcilla se ilustra en la figura 4.7, donde la transformación de fase de una montmorilonita en una illita comienza en temperaturas de 60 a 70°C (Domenico y Schwartz, 1990).

En un planteamiento para analizar el acoplamiento eléctrico, químico y mecánico, una arcilla saturada, químicamente activa, se considera como un medio poroso deformable y continuo, que consiste en fases que se traslapan, cada una de las cuales contiene especies; la fase sólida está compuesta de partículas de arcilla, agua absorbida y sales disueltas, mientras que la fase acuosa o líquida está constituida por agua de poro y sales disueltas. Para arcillas homoiónicas es factible tratar a las fases como eléctricamente neutras, ya que tanto aniones como cationes ( $Cl^-$  y  $Na^+$ ) se mueven juntos; en arcillas heteroiónicas el anterior esquema se extiende mediante la introducción de potenciales electroquímicos y la coacción de la electroneutralidad en ambas fases. La fase sólida está rodeada por una membrana semipermeable; ésta es impermeable a las partículas de arcilla, tal que no se considera la existencia de suspensiones y la masa de arcilla de un volumen representativo es constante, y que además puede estimarse perfecta (permeable sólo al agua) o imperfecta (permeable al agua y sal en diversos grados) (fig. 4.8). Los parámetros involucrados son calibrados experimentalmente; ciclos de cargas y descargas mecánicas, químicas y mecánico-químicas son aplicadas. El incremento de salinidad en el agua de poro produce una disminución de volumen, lo que viene siendo una consolidación química; la subsecuente exposición a soluciones de agua destilada favorece la expansión, aunque ésta



es pequeña respecto de la consolidación química, de tal suerte que el ciclo de carga química produce una contracción neta cuya cantidad se incrementa con el confinamiento. Aunque se presta mayor atención a las ecuaciones constitutivas elastoplásticas, éstas están inmersas en una formulación general, donde tanto la transferencia de masa como los procesos de difusión pueden ser considerados en problemas de valor inicial y de frontera a ser tratados a través del método del elemento finito (Di Maio *et al*, 2002).

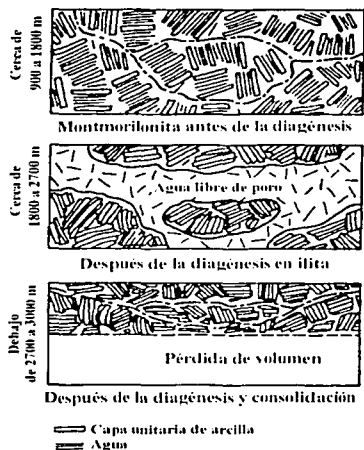


Fig. 4.7 *Diagénesis*

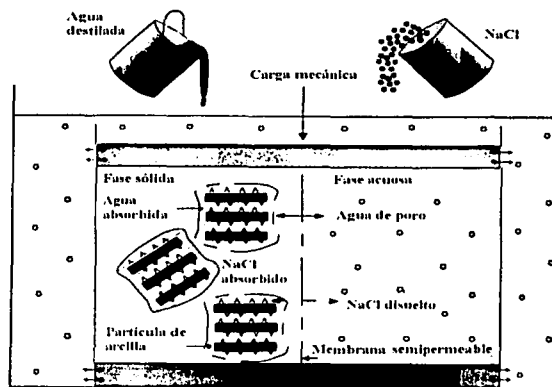


Fig. 4.8 *Esquema de experimento mecánico-químico*

Pueden existir simultáneamente flujos de agua, corriente eléctrica y sales a través del suelo, lo que resulta complicado de describir debido al número de fuerzas impulsoras y al número de diferentes incrementos de flujo. Aunque la termodinámica irreversible se utiliza para la descripción de flujos asociados, el problema de su aplicación se vuelve progresivamente más complicado según aumenten el número de fuerzas impulsoras y se incremente el número de flujos, debido a la necesidad de una adecuada especificación de los coeficientes de asociación y de métodos independientes para su medición, por lo que el análisis del sistema sujeto simultáneamente a varios tipos de flujo se simplifica analizando parejas de flujos.

Los gradientes de concentración de sales pueden originar que el agua se mueva a través del suelo, en la fase líquida y en la de vapor. El movimiento del vapor resulta porque existen gradientes en la presión de vapor de la solución. En estado líquido, el efecto de solutos en el flujo del agua es más significativo al reducirse el potencial de agua (mayor succión) (Gavande, 1982).

La termoósmosis es un movimiento del agua bajo gradientes térmicos, debido al cambio en la interacción eléctrica del mineral del suelo y el agua; es importante en suelos parcialmente saturados, pero de influencia limitada en suelos saturados. En sistemas saturados de baja porosidad el flujo es del tipo de una película, mientras que en suelos no saturados, con una significativa fase de aire, el movimiento del agua puede ser por difusión y microdestilación.



En suelos de áreas áridas o semiáridas, suelos susceptibles de congelamiento y suelos expansivos se encuentran efectos significativos de flujo de agua impulsado térmicamente (Fang, 1991; Mitchell, 1993). Por otro lado, se han observado transferencias de humedad importantes asociadas con cambios de temperatura y no siempre ha sido posible explicarlas por las leyes de la termoósmosis del agua, pero sí al considerar las influencias de la temperatura sobre la presión osmótica de las sales disueltas (Jiménez, 1990).

La electroósmosis ha sido utilizada desde hace tiempo para control de flujo de agua y consolidación de suelos. La ósmosis química, donde el flujo de agua es causado por un gradiente químico ha sido más estudiado recientemente debido a su importancia en sistemas de confinamiento.

El flujo de agua impulsado osmóticamente respecto del hidráulico puede ser significativo en arcillas fuertemente preconsolidadas, donde la relación de vacíos y la conductividad hidráulica son bajas, siendo importantes tales flujos en procesos geológicos. Las barreras de arcilla densamente compactadas para el confinamiento de desechos pueden poseer propiedades osmóticas de membrana, de tal manera que cuando las concentraciones dentro de un dispositivo revestido son mayores que en el exterior, puede ocurrir entonces un flujo osmótico hacia el interior (Mitchell, 1993).

La electroósmosis es un fenómeno electrocinético utilizado como un método para mejoramiento del terreno, para la consolidación de depósitos de suelos blandos, desecación de suelos, inyección de lechadas, desalación de tierras agrícolas y limpieza en general de suelos y agua subterránea. No obstante, hay factores que requieren ser estudiados para la mejor comprensión del fenómeno y una mayor aplicación en ingeniería de suelos. Algunos de los factores identificados como de mayor influencia en la electroósmosis son: el potencial eléctrico, densidad de corriente, solvatación de iones, cambio en la viscosidad y constante dieléctrica del fluido de poro, pH y temperatura del sistema y sus respectivos gradientes, conductancia superficial y capacidad de intercambio catiónico del suelo. Es deseable un desarrollo que involucre a dichas variables; no obstante el proceso real es muy complejo por lo que es difícil proponer una ecuación generalizada. La teoría de la doble capa provee de una aproximación sencilla, aunque escasa en cuanto a la generalidad deseada. Con una mayor información sistemática de la influencia de la combinación de factores será posible modificar la teoría para una mejor descripción del fenómeno (Winterkorn y Pamukcu, 1991).

La transferencia de calor isotérmica, originada por el flujo de calor junto con el del agua, ha causado dificultades en la creación de barreras de suelo congelado en la presencia de flujos de agua subterránea. Los flujos de calor generados eléctrica y químicamente, efectos Peltier y Dufour, respectivamente, son considerados como no significativos en los suelos; sin embargo, parece que no han sido estudiados con detalle en relación con problemas geotécnicos. Asimismo, no ha sido evaluado si la difusión térmica de electrólitos, el efecto Soret, es importante en suelos, pero puede ser significativo en algunos sistemas ya que la actividad química depende de la temperatura.

Cuando el agua fluye a través del suelo bajo un gradiente hidráulico, las cargas de las dobles capas son desplazadas en la dirección del flujo, forzando el movimiento del fluido a través del sólido poroso (membrana). El resultado es una diferencia de potencial eléctrico entre los extremos opuestos de los capilares de la masa, proporcional a la velocidad de

flujo, denominado *potencial de filtración*; en cierto sentido, este fenómeno es el inverso de la electroósmosis (Crockford y Knight, 1983). El término *corriente de filtración* se aplica al flujo de iones y de corriente eléctrica impulsado hidráulicamente, y tiene importancia en el flujo químico a través del suelo (advección) y en el desarrollo de potenciales eléctricos, los cuales pueden a su vez influir en el flujo tanto del líquido como de iones, como resultado de efectos de acoplamiento adicionales. Los roles de la termoelectricidad y potenciales de membrana y difusión no son conocidos; no obstante, los potenciales eléctricos generados por gradientes químicos y de temperatura son importantes en problemas de corrosión y de flujo de agua, así como de estabilidad. Finalmente, la electroforesis, movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico, se ha empleado para la concentración de desechos mineros y arcillas con alto contenido de agua (Mitchell, 1993).

#### 4.5 Resumen y conclusiones

En este capítulo se comentan la estructura del suelo y su importancia en la permeabilidad; para ello es importante conocer la clase de suelo con que se cuenta, si es o no salino, alcalino o ambos, pues de ello dependerá su estabilidad. En ciertas circunstancias, las propiedades dispersivas de los suelos pueden ser aprovechadas cuando el objetivo es emplearlos como impermeabilizantes; los criterios de identificación y clasificación basados en correlaciones de pruebas químicas para conocer las condiciones en que se favorece el fenómeno de dispersión, también pueden servir para identificar el caso contrario, que se convertiría entonces en una condición adversa para un revestimiento.

Asimismo, se comentan los efectos de las sales y de la temperatura en el comportamiento del suelo, especialmente en el cambio de volumen y resistencia. Ya que la resistencia de los suelos depende en parte de las atracciones interparticulares, sería de esperar que la resistencia estuviera también influida por la constante dieléctrica. Al aumentar la temperatura en cierto intervalo se disminuye el volumen. Esto podría ser acrecentado por un secado enérgico a través de altas concentraciones de sales. Generalmente se habla de compatibilidad química, pero se requiere también de pruebas que tomen en cuenta la compatibilidad térmica. La mayoría de las pruebas de compatibilidad se basan en pruebas que detectan cambios de volumen, a veces apreciables a simple vista.

Se describen los distintos tipos de flujos asociados que pueden ocurrir, de algunos de los cuales se desconoce su efecto potencial en campo. La aplicación instantánea o prolongada de potenciales térmicos, eléctricos, químicos e hidráulicos a través de la masa del suelo puede causar cambios significativos en el estado y propiedades del suelo así como provocar flujos a través de él. Por tanto, el problema de la aplicación de suelos arcillosos como material de revestimiento requiere del análisis de varios factores a considerar y de una infraestructura que permita la simulación en laboratorio de las condiciones reales de operación. Por ejemplo, las pruebas de permeabilidad son pruebas directas de compatibilidad, donde más que un valor absoluto de conductividad hidráulica lo que se pretende obtener es un valor relativo que permita comparar diversos materiales.

La posibilidad de que se forme una red interconectada de fracturas está en función de la densidad de éstas; falta incluir parámetros como potenciales fisicoquímicos y térmicos, así como la variación espacial de la permeabilidad del medio poroso.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYES DE LABORATORIO

"Quien nada hace, no yerra, y quien no yerra no aprende"

Monje franciscano Paciolo

### 5.1 Materiales utilizados

En este trabajo se reportan diversas muestras probadas como revestimientos compactados, con el fin de contar con tal variedad de suelos arcillosos que permita comparar sus comportamientos, y entre los cuales se encuentran suelos nativos y comerciales con ilita, montmorilonita, haloisita, caolinita, así como bentonitas, atapulgita y zeolita mezclada con bentonita sódica. Bentonitas sódicas en polvo y granulares, activadas y/o tratadas con polímeros, se probaron en ambas condiciones: como revestimiento compactado y como impermeabilizante geosintético de arcilla. Tanto para su descripción como para la presentación de resultados, los materiales se clasificaron en tres grupos: muestras nativas, muestras comerciales sin capacidad apreciable de expansión y bentonitas; en este último grupo se incluyen las combinaciones con zeolita y con geosintéticos.

#### 5.1.1 Propiedades físico-químicas de materiales probados

Es de primordial importancia conocer las principales características de los minerales que componen nuestras muestras, pues ello ayudará a comprender los diversos comportamientos. A continuación se reportan las propiedades físico-químicas investigadas por diversas fuentes de información, así como las determinadas experimentalmente:

##### 5.1.1.1 Información recabada

###### A) Muestras nativas

A continuación se presenta la información de acuerdo con la clasificación edafológica (INEGI, 1980, 1982, 1983 y 1990):

###### + Zamora

Se clasifica como un vertisol pélico. Los vertisoles son suelos que se presentan en climas templados y cálidos, en zonas en las que hay una marcada estación seca y otra lluviosa. Se caracterizan por las grietas anchas y profundas que aparecen en ellos en la época de sequía. Son suelos muy arcillosos, frecuentemente negros o grises en las zonas del centro y oriente de México; y cafés rojizos en el norte. Son pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. A veces son salinos. Con frecuencia presentan problemas de inundación y drenaje.

#### + Blanquizza y Café

Se encuentran dentro del grupo de los xerosoles, con características del tipo lúvico, cálcico y háplico. Estos suelos se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y muy pobre en humus. Debajo de ella puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien muy semejante a la capa superficial. Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, polvo o aglomeraciones de cal, y cristales de yeso, o caliche, de mayor o menor dureza. A veces son salinos. Los xerosoles son suelos con baja susceptibilidad a la erosión, salvo cuando están en pendientes y sobre caliche o tepetate, donde sí presentan un problema.

El término caliche se aplica a ciertos estratos de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonatos calcáreos. Particularmente, la arcilla marga es un material impermeable y frágil, con un contenido de caliza de entre 20 y 60%, aproximadamente.

Según la literatura los suelos áridos están caracterizados por acumulaciones superficiales de sales por movimientos ascendentes del agua, y usualmente consisten en varios centímetros de suelo sobre un material parental calcáreo. Los suelos pueden ser alcalinos, con altas concentraciones de sales solubles de calcio, magnesio y sodio cerca de la superficie. Ialitas y esmectitas son comunes en estos suelos.

La arcilla blanquizza de Coahuila procede de un depósito de caliche. Dicho depósito, rico en carbonato de calcio, se forma en regiones semiáridas por la acción capilar y la evaporación, lo que permite un flujo vertical precipitando el carbonato hacia la superficie. En esta región el caliche se encuentra asociado con el conglomerado Sabinos-Reynosa, formando un cuerpo irregular en su parte superior. Para su caracterización se emplearon técnicas ASTM; las muestras se trataron por vía húmeda y se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos (Salas, 1988):

Tabla 5.1.a Blanquizza

Humedad total	Densidad relativa	Pérdida por ignición	Residuo insoluble	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
0.71%	2.6	35%	13.2%	77%	1.7%	0.57%	2.6%	17.2%	0.27%

#### + Morelos

Se trata de un suelo del grupo de los andosoles. Son suelos que se encuentran en aquellas áreas donde ha habido actividad volcánica reciente, puesto que se originan a partir de cenizas volcánicas. Se caracterizan por tener una capa superficial de color negro o muy oscuro (aunque a veces es clara), por ser de textura esponjosa o muy sueltos, y porque retienen mucho el fósforo. Son muy susceptibles a la erosión. En la fracción arcillosa de los andosoles predomina la alófana, acompañado de la especie paracrystalina imogolita, además de diversos gels de aluminio, hierro, silicio y titanio. Junto a los aluminosilicatos amorfos (alófanas), en los suelos volcánicos también se encuentra la hisingerita (silicato de hierro amorfo).

Las arcilla ferruginosas contiene en su composición diferentes cantidades y tipos de óxido de hierro; las arcillas rojas contienen, por lo general, un óxido conocido como hematita, lo cual incide en el color rojizo de la cerámica que se fabrica a partir de estos materiales (Domínguez y Schifter, 1992), como es el caso del suelo de la zona.

#### B) Muestras comerciales

+ Caolinita: no se cuentan con datos del proveedor.

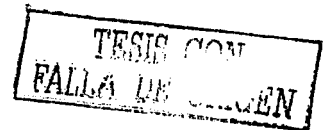
+ Haloisita: se adquirió en una tienda de productos veterinarios, donde estaba clasificada como zeolita.

#### + Atapulgita

La muestra clasificada como GEL 540-P es una atapulgita explotada selectivamente cerca de Attapulgis, Georgia, también clasificada como "Tierra de Fuller". Tiene una exclusiva forma de partícula que la provee de características excepcionales como gel y espesante sin expansión: partículas planas a espiciformes, alta porosidad con alta actividad decolorante y capacidad neutralizadora. Sus propiedades tixotrópicas lo hacen un excelente ingrediente estabilizador en suspensiones y emulsiones. GEL 540-P puede ser usado para gelificación de líquidos orgánicos así como de agua media, como agente suspensorio, emulsor, absorbente y neutralizador de alta calidad. La muestra de Gel 540-P fue proporcionada por la compañía Milwhite Inc., en Houston, Tx., EUA. El costo de una muestra de 5 kg fue de \$80.00 USD (09/05/1996). A continuación se presenta información técnica relativa a dicho producto comercial:

Tabla 5.1.b Propiedades físicas y análisis químico típicos (GEL 540-P)

Propiedades físicas		Análisis químico	
Densidad de sólidos, g/cm <sup>3</sup>	2.30-2.40	% SiO <sub>2</sub>	55.06
% humedad al elaborarse (104.44°C)	10-15	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.89
% de materia volátil (982.22°C)	10-13	% MgO	8.53
pH (solución al 20%)	7.5-9.5	% CaO	3.47
Color (visual)	Color de ante	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.39
Análisis de cribado en húmedo: % retenido, malla 400	< 0.01	% K <sub>2</sub> O	1.96
Tamaño medio de partícula, en micras	11-15	% Na <sub>2</sub> O	1.75
Absorción de aceite, mL/100 g	83	% TiO <sub>2</sub>	0.72
Densidad aparente, kg/m <sup>3</sup>		% MnO	0.03
Suelta	384.4	% Pérdida por ignición (1000°C)	16.20
Compacta	720.8		



### C) Bentonitas

#### + Bentonitas nacionales (BCa-1, BCa-2, BCa-3 y BNa):

No se cuenta con datos del proveedor; no obstante, se sabe que las muestras son bentonitas en polvo que proceden de Durango. En Durango están los depósitos más importantes de México; en su mayor parte la calidad de la arcilla es superior, del tipo montmorilonita expansible, 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. La alteración de rocas piroclásticas 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 arcillas color verde y rosa típicas de la región de Cuencamé (Domínguez y Schifter, 1992).

#### + Mezcla Zeolita-BNa

Se probó una muestra de zeolita, proveniente de Oaxaca, proporcionada por la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería; dado que el material no tenía las características de plasticidad adecuadas se mezcló con una bentonita sódica (BNa) en una proporción en peso de 80-20, respectivamente.

#### + Bentonitas importadas

Las muestras Volclay CG-50 y Volclay CRC fueron proporcionadas de manera gratuita por CETCO (Colloid Environmental Technologies Company), subsidiaria de American Colloid Company, en Arlington Heights, IL, EUA.

Volclay CS 50 es una bentonita sódica granular no tratada, no recomendada ante la presencia de altas concentraciones de sales disueltas (densidad de sólidos = 2.5).

Volclay CRC es una bentonita sódica granular especialmente extraída, procesada y tratada con polímeros del tipo de poliacrilamidas catiónicos. Se puede utilizar en revestimientos ambientales y cualquier construcción impermeable para la contención de líquidos contaminados, con niveles significativos de cationes metálicos y/o sustancias químicas orgánicas. También puede ser usado en la presencia de agua salina o salobre, aunque no se asegura su completa eficiencia en todos los casos; es especialmente resistente a la degradación por calcio y magnesio. En la tabla 5.1.c se muestra información del proveedor.

Tabla 5.1.c Volclay CRC (CETCO, 1994a)

Datos del proveedor	Método	Volclay CRC
Composición		90% montmorilonita dioctaédrica * (AlFe <sub>1.67</sub> Mg <sub>0.33</sub> )Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> Na+Ca <sup>2+</sup> <sub>0.33</sub> .
Relación de cationes intercambiables (meq/100 g de Na <sup>+</sup> /Ca <sup>++</sup> /Mg <sup>++</sup> )		57/15/5
Densidad en seco (kg/m <sup>3</sup> )		1040
Tamaño de partícula	ASTM D 421	96% mínimo < malla # 20 (0.85 mm) 4% máximo pasa malla # 50 (0.30 mm)
Expansión libre	ACC 1010	26 mL mínimo en 1 000 ppm CaCl <sub>2</sub>
Expansión libre	USP NF XVII	27 mL
Contenido de humedad	ACC 1009	10% máximo al empacar
Pérdida de fluido	API 13 B	9.0 mL máx. en agua desionizada 9.0 mL máx. en 1000 ppm CaCl <sub>2</sub> 11.0 mL máx. en 10 000 ppm de sal de agua de mar

5.1.1.b) Propiedades determinadas experimentalmente por diversos procedimientos

Se hicieron microanálisis en el microscopio electrónico de barrido (MEB) de dos muestras de suelo nativos, Blanquiza y Morelos, donde se pudo detectar cualitativamente la presencia de Si y K, como se aprecia en la tabla 5.1.2. Esta técnica se realizó en el ININ, bajo la asesoría de Leticia Carapia y el Mtro. Gilberto Mondragón (Botello, 1997).

Tabla 5.1.2 Resultados de microanálisis en el MEB

Elemento	Muestra	
	Blanquiza	Morelos
Porcentaje en peso		
C	27.22	23.31
O	34.42	37.91
Na	-	0.71
Mg	0.34	-
Al	1.28	8.86
Si	5.14	19.68
K	0.43	0.34
Ca	29.64	1.62
Ti	-	0.76
Fe	1.52	6.82

En la tabla 5.1.3 se muestra en la primer columna las especies mineralógicas identificadas mediante difracción de rayos X, en la segunda columna se propone el mineral arcillosos predominante, principalmente con base en análisis de rayos X, así como en pruebas

adicionales; algunas muestras se sometieron a algún tratamiento, como el calentamiento, para confirmar la identificación de ciertas arcillas por medio de los difractogramas.

Estos estudios fueron realizados e interpretados por diverso personal del Laboratorio de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM, en varias etapas, siempre bajo la dirección del Dr. Octavio Cano Corona, y se contó además con la asesoría del Dr. Adolfo Cordero del IFUNAM. Se empleó un difractómetro Philips PW1130/96 y ánodo de CuK $\alpha$  en condiciones de 30 kV y 20 mA.

Por otro lado, la última columna de la tabla corresponde al color determinado en seco por medio de las cartas de Munsell (Munsell, 2000).

En la tabla 5.1.4 se presentan datos correspondientes al equivalente de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>, %) (Richards, 1954), reacción con HCl diluido, pérdida en peso por calcinación a 450°C (Pc) y porcentaje de materia orgánica (MO) y de carbono (C) (Silva, 1991); los números entre paréntesis a la derecha de los respectivos valores corresponden a una clasificación decreciente. La presencia de yeso se determinó cualitativamente por medio de precipitación con acetona (Richards, 1954).

La identificación de las arcillas se hace generalmente en el espacio basal paralelo a la estructura laminar; en los espectros de DRX, diferentes zonas de diagnóstico dan máximos característicos de difracción; los primeros máximos son las reflexiones basales de primer (001) y segundo (002) orden, seguidas por una zona de reflexiones (hkl) más o menos complejas, que dependen del grado de orden del apilamiento de las láminas o capas básicas de las estructuras en los cristalitas. El pequeño tamaño de partícula y limitado dominio coherente de un cristal implica una reducción en la fuerza de difracción de los planos atómicos en la mayoría de las direcciones cristalográficas, por lo que habrá un máximo de difracción débil, y otros máximos podrán ser visibles sólo parcialmente, o invisibles. Este problema de identificación se acentúa debido a que las arcillas tienen esencialmente una estructura laminar bidimensional, que tiende a presentar una orientación preferencial (Ortega, 2003).

Tabla 5.1.3 Identificación por rayos X

Muestra	Especies mineralógicas identificadas por rayos X	Mineral arcilloso predominante	Color (en seco)
Zamora*	Albita (plagioclasa), sist. triclinico (P) cuarzo sist. hexagonal (A) haloisita (s), esmectita (s)	Haloisita-esmectita	10YR 5/1 gris
Calentada a 550°C / 2.5 h	Albita, cuarzo y mica dioctaédrica (moscovita ?)		
Blanquizca**	Calcita, cuarzo, Feldespatos ?, ilita ?	Ilita	5Y 8/1 blanco
Café **	Cuarzo, calcita, haloisita, feldespatos ?, hematita ?	Ilita – haloisita	10YR 6/3 café pálido



Tabla 5.1.3 (continuación)

Morelos***	ilita, sist. ortorrómbico (s) Interestratificados (s)	Haloisita ? Alófana ? Interestratificados	2.5Y 5/4 café olivo claro
Calentada a 550°C / 2.5 h	Albita		
Caolinita	Caolinita, cuarzo, cristobalita	Caolinita	10YR 8/2 café muy pálido
Haloisita	Haloisita, sist. monoclinico (m) anortita, sist. triclinico. (m) dolomita, sist. romboédrico (hex.)(s)	Haloisita	5Y 8/1 blanco
Calentada a 550°C / 2.5 h	Calcita mica dioctaédrica (moscovita ?)		
Atapulgita	Paligorskita, sist. ortorrómbico, (P) cuarzo, sist. hexagonal (A) interestratificados (s)	Paligorskita	5Y 8/1 blanco
BCa-1****	Montmorilonita 15 Å, sist. ortorrómbico (P) cuarzo, sist. hexagonal (A) cristobalita (m)	Montmorilonita	5Y 8/1 blanco
Bna	Montmorilonita 15 Å, sist. monoclinico (P) cuarzo, sist. hexagonal (A)	Montmorilonita	2.5Y 8/1 blanco
Zeolita	Heulandita, mordenita, cuarzo	Zeolita	10GY 8/1 gris verdoso claro
Volclay CS 50	Montmorilonita 15 Å, sist. monoclinico (P) cristobalita, sist. tetragonal (b) cuarzo, sist. hexagonal (s) interestratificados (s)	Montmorilonita	5Y 7/1 gris claro
Volclay CRC	Montmorilonita 15 Å, sist. monoclinico (P) cuarzo, sist. hexagonal (A) feldespatos ?	Montmorilonita	5Y 8/1 blanco
BCa-2		Montmorilonita	5YR 8/2 rosáceo
BCa-3		Montmorilonita	5Y 8/1 blanco

donde: P = fase predominante; A = fase abundante; m = fase en concentración media, b = fase en concentración baja; s = fase en concentración muy baja. Nota: el símbolo de interrogación (?) se emplea en caso de no registrarse un número suficiente de picos para asegurar la presencia de la especie mineralógica en cuestión.

\* En anteriores estudios de rayos X se reportaron para ángulos bajos picos de montmorilonita, metahaloisita, paligorskita, ilita y moscovita, así como las siguientes posibles combinaciones: mica-vermiculita, montmorilonita-vermiculita, vermiculita-clorita, mica-montmorilonita, mica-clorita o montmorilonita-clorita (Almanza y Castañeda, 1993).

\*\* En la blanquiza se identificaron reflexiones correspondientes a la mica ilita, al cuarzo y una reflexión que puede corresponder a feldespato. En la muestra Café también se identificaron reflexiones de ilita y cuarzo, pero por la intensidad de las correspondientes a la ilita en el ángulo 20 de 8.5°, puede inferirse que hay más ilita en la muestra blanquiza. Se obtuvieron respectivos difractogramas de las muestras tal y como se recibieron, y otros difractogramas de las mismas.

tratadas a 700°C durante una hora. Por otra parte, se obtuvo un difractograma de la muestra Blanquizca tratada con etilenglicol.

\*\*\* La muestra Morelos presenta un pico característico de illita, pero que desaparece con el calentamiento; tratándose de un andosol, es probable que dicho pico corresponda a una haloisita, y que predominen silicatos amorfos como el alófano o la imogolita.

\*\*\*\* La presencia de calcio se determinó por fluorescencia de rayos X.

Tabla 5.1.4 Determinación de carbonatos, pérdida por calcinación y materia orgánica

Muestra	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> (%)	Reacción con HCl*	Pc (450°C) (%)**	MO (%)	% de C
Zamora	4.85 (10)	1	14.62 (3)	1.63	0.94
Blanquizca***	59.33 (1)	5	3.09 (13)	0.09	0.05
Café	35.20 (2)	5	6.96 (10)	1.50	0.87
Morelos	6.59 (7)	1	15.57 (2)	0.63	0.37
Caolinita	3.16 (14)	1	2.73 (14)	0	0
Haloisita	30.82 (3)	5	13.28 (4)	0	0
Atapulgita	13.81 (5)	1	16.84 (1)	nd	nd
BCa-1	17.39 (4)	4	11.44 (6)	nd	nd
BNa	6.40 (8)	3	6.72 (11)	nd	nd
Zeolita	3.74 (12)	1	5.98 (12)	nd	nd
Volclay CS50	3.85 (11)	1	9.56 (9)	nd	nd
Volclay CRC	3.54 (13)	1	10.84 (8)	0.07	0.04
BCa-2	5.93 (9)	2	12.61 (5)	0.07	0.04
BCa-3	13.68 (6)	4	11.33 (7)	nd	nd

\* Escala de intensidad de la reacción (efervescencia):

1: Nula; 2: Ligeramente; 3: Moderada; 4: Fuerte; 5: Muy fuerte

\*\* La pérdida puede incluir agua de constitución [H<sub>2</sub>O(+)], materia orgánica y algunas sales solubles volátiles

\*\*\* Se detectaron valores bajos de yeso

Detectar la presencia de calcita (CaCO<sub>3</sub>) es importante, pues ésta impide la formación de drenajes ácidos debido a su capacidad amortiguadora para controlar el pH y minimiza la liberación de sulfatos. Los minerales de arcillas, oxihidróxidos de Fe y calcita son capaces de retener en su superficie tanto aniones como cationes por procesos de sorción (Romero *et al*, 2001). Por otra parte, el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) ocurre en muchos suelos con pH arriba de 7. Esta es una sal sólo ligeramente soluble en agua (0.0014 g en 100 g de solución), que puede contribuir en 1 a 2 meq/L de calcio a la solución del suelo (Sherard y Decker, 1977; Petrukhin, 1993).

Los valores de materia orgánica son bajos en la muestra Morelos y prácticamente nulos en las demás muestras; se puede decir que se está trabajando con suelos inorgánicos. Esto es importante, ya que la materia orgánica produce cementación de las partículas de suelo y la consecuente formación de agregados, lo que incrementa la permeabilidad; además, puede retener hasta 20 veces su peso en agua, ayuda a mantener uniforme la reacción en el suelo, e incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo (IGAC, 1995).

En la tabla 5.1.5 Se presentan valores de propiedades fisicoquímicas como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) e índice de azul de metileno (IAM). La determinación de la CIC se hizo con métodos de desplazamiento directo (dd) con sales, así como mediante adsorción de azul de metileno, método del halo (mh), que es el análisis más sencillo de realizar en laboratorio (Kahr y Madsen, 1995). El valor del índice de azul de metileno (IAM) se obtuvo por medio del método de prueba estándar (ASTM C-837). Esta prueba se basa en la adsorción del colorante que es un indicador de la distribución de tamaño de partícula en el intervalo de arcillas menor de  $2 \mu$ ; existe una relación lineal entre el IAM y propiedades fundamentales de las arcillas tales como la CIC, la resistencia de enlace en seco y superficie específica. Asimismo, se agrega una clasificación cualitativa de la actividad del material cristalino en las distintas muestras mediante la técnica de cromatografía en papel, técnica que se explica más adelante (5.3.3.6).

Tabla 5.1.5 CIC y cromatografía en papel

Muestra	CIC (dd) (meq/100 g)	CIC (mh) (meq/100 g)	IAM	Cromatografía en papel*
Zamora	55.0	67	36.5	2
Blanquiza	15.1	13	9	12
Café	25.8	24	12	10
Morelos	22.9	20	12.5	11
Caolinita	3.5	3.6	3	14
Haloisita	45	33	22.5	9
Atapulgita	43.5	42	31	13
BCa-1	108.7	86	52	8
BNa	73	66	43.5	3
Zeolita	25.8	7	5	6
Volclay CS 50	nd	84	67	4
Volclay CRC	74	80	14	5
BCa-2	nd	100	68	1
BCa-3	nd	87	43.5	7

\* Lugar que ocupa en una clasificación cualitativa decreciente de estabilidad coloidal deducida a través del avance de decoloración asociado con zona de transición.

Los resultados de CIC indican valores muy altos para las bentonitas, como era de esperar, correspondiendo la mayor capacidad a las bentonitas cálcicas. Las muestras haloisita y atapulgita presentan un valor ligeramente superior al reportado para suelos que contienen dichos minerales arcillosos. El valor de capacidad determinado para la muestra Morelos está dentro del intervalo correspondiente a las illitas o haloisitas hidratadas. El valor de la muestra Zamora indica una mezcla de varios componentes arcillosos, entre ellos la esmectita. Los valores del método del azul de metileno son similares a los obtenidos con el método de acetato de amonio, por lo que posiblemente las medidas sean altas en suelos ricos en carbonatos de calcio, y bajas en suelos de pH ácido como la caolinita.

En la tabla 5.1.6 se proporcionan mediciones de bases intercambiables en los complejos arcillosos de las muestras (excepto la Caolinita), la suma de dichas bases y el tipo de complejo en función del catión predominante ( $\geq 50\%$ ). La BCa-1 y la Haloisita tienen un valor elevado de  $\text{Ca}^{2+}$  intercambiable, lo que puede indicar la presencia de carbonatos; esto puede causar sobreestimaciones en determinaciones de capacidad de intercambio catiónico. La suma de los valores determinados de iones intercambiables para cada muestra no concuerda con la capacidad total obtenida por otros métodos, pero da una idea de las proporciones relativas de los cationes. Las diferencias pueden deberse a que la determinación puede ser significativamente alterada por carbonatos solubles y sales solubles en agua (Koerner, 1995). En los suelos alcalinos se sobreestiman los cationes intercambiables; por otra parte, al utilizar el método del acetato se remueve calcio de la estructura cristalina del mineral o materia orgánica. Asimismo, en suelos salinos se considera parte del calcio soluble como intercambiable.

Tabla 5.1.6 Cationes intercambiables (meq/100 g)

Muestra	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	Suma	Complejo
Zamora	0.98	0.24	38.04	13.04	52.03	Ca
Blanquizca	0.45	0.10	80.98	8.15	89.68	Ca
Café	0.27	0.18	65.22	6.52	72.19	Ca
Morelos	1.13	1.07	0	3.40*	5.60	Mg
Haloisita	1.30	2.56	32.92	24.97**	61.75	Ca
Atapulgita	3.04	7.00	22.00	45.10	77.14	Mg
BCa-1	19.40	2.00	74.80	24.20	120.40	Ca
BNa	42.61	1.74	33.00	8.80	86.15	Na
CRC	57 ***	0.60	15 ***	5 ***	77.61	Na

\*Fue la muestra más estable en pruebas de sedimentación, luego de las bentonitas. Suelo muy lavado, donde predomina el magnesio.

\*\*Se detectó dolomita por medio de RX

\*\*\* Datos del proveedor

En la tabla 5.1.7 se presenta el total de sales disueltas (TDS) obtenido en función del valor de la conductividad eléctrica del extracto de la pasta de saturación del suelo, así como los cationes solubles determinados experimentalmente. La determinación de calcio, sodio y potasio se realizó con un método instrumental de alta precisión (flamómetro), no obstante no es posible determinar el magnesio con dicho equipo. Según Richards (1954), la concentración de sales (tanto de cationes como de aniones) es igual a un múltiplo de la conductividad ( $\text{meq/L} = 10 \times \text{CE}$ , en un intervalo de 0.1 a 5.0 mS/cm), por lo que se puede igualar a este valor la concentración total de cationes, y deducir de ahí el valor aproximado del magnesio, considerando que la certidumbre de las mediciones con dicho equipo es mayor que con los métodos volumétricos de titulación. En la última columna se propone el tipo de complejo en función del catión predominante; debido a la incertidumbre en el valor del Mg, cuando éste representa el mayor porcentaje se escribe a su lado el catión que sigue en orden de importancia. En general, existe cierta proporcionalidad entre los valores de los cationes predominantes intercambiables y solubles y, por tanto, entre la clasificación del tipo de complejo que se tiene en cada

muestra; una excepción clara es la muestra de BCa-1, lo que se atribuye a que, como se verá en la tabla 5.1.8, es un suelo salino.

Tabla 5.1.7 Cationes solubles

Muestra	TDS	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Complejo
(meq/L)						
Zamora	61.00	8.24	0.71	22.86	29.19	Mg-Ca
Blanquizza	43.30	13.35	0.31	10.22	19.42	Mg-Na
Café	26.30	3.15	0.27	12.78	10.11	Ca
Morelos	2.62	0.80	0.03	0.01	1.77	Mg-Na
Caolinita	9.23	3.46	0.29	0.13	5.34	Mg-Na
Haloisita	72.60	4.97	0.80	28.24	38.59	Mg-Ca
Atapulgita	3.87	0.61	0.22	0.13	2.91	Mg-Na
BCa-1	62.40	37.95	1.87	7.53	15.05	Na
BNa	16.89	12.89	0.07	0.15	3.78	Na
Zeolita	12.13	11.56	0.41	0.16	0.00	Na
Volclay CS50	15.21	11.28	0.19	0.13	3.61	Na
Volclay CRC	27.50	10.35	0.04	0.20	16.91	Mg-Na

Tabla 5.1.8 Parámetros de clasificación de salinidad y alcalinidad

Muestra	pH	CE (mS/cm)	Sales* (%)	% Na**	RAS***	TDS* (meq/L)	RAS/TDS	Tipo de suelo
Zamora	7.81	6.10	0.39	13.51	1.62	61.0	0.03	Salino
Blanquizza	7.57	4.33	0.28	30.83	3.47	43.3	0.08	Salino
Café	7.80	2.63	0.17	11.96	0.93	26.3	0.04	Normal
Morelos	7.35	0.26	0.02	30.52	0.85	2.6	0.32	Normal
Caolinita	5.12	0.92	0.06	37.53	2.09	9.2	0.23	Normal
Haloisita	7.66	7.26	0.46	6.84	0.86	72.6	0.01	Salino
Atapulgita	9.70	0.39	0.02	15.70	0.49	3.9	0.13	Normal
BCa-1	8.05	6.24	0.40	60.82	11.29	62.4	0.18	Salino
BNa	9.45	1.69	0.11	76.32	9.20	16.9	0.54	Normal
Zeolita	8.66	1.19	0.08	95.32	40.70	12.1	3.36	Sódico
Zeolita-BNa	8.82	1.29	0.08	91.50	34.40	13.1	2.80	Sódico
Volclay CS50	8.89	1.52	0.10	74.14	8.24	15.2	0.54	Normal
Volclay CRC	7.70	2.75	0.18	37.64	3.54	27.5	0.13	Normal

\* Valor estimado de la medida de CE

\*\* Se tomó como total de cationes el valor estimado según la CE

\*\*\* El Mg<sup>+</sup> se dedujo de la diferencia entre el valor estimado de TDS y la suma de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>

En la tabla 5.1.8 se muestran diversos parámetros obtenidos de los extractos de pastas de saturación: pH, conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sales, tomado del total de sólidos disueltos (TSD, en ppm), el porcentaje de sodio (% Na), el total de sales disueltas, tomado como un factor de la CE, (TDS, en meq/L), la relación de adsorción de sodio

(RAS) y la relación RAS/TDS, así como la clasificación del suelo como normal, salino, sódico o salino-sódico, en función del pH, CE y RAS. Como se puede observar, se cuenta con una variedad de tipos de suelo; sólo la Zeolita presenta valores superiores a 13 y se considera como un suelo sódico, no obstante, las sales disueltas deben reducir un tanto la tendencia dispersiva del material, como se deduce de la relación RAS/TDS.

En la tabla 5.1.9 aparecen resultados de la detección de alófana mediante pruebas de dilución selectiva sólo en algunas muestras en particular, así como de pruebas de dispersión vs coagulación.

La presencia de alófana se diagnosticó con el valor del pH medido en fluoruro de sodio 1 N (Fieldes y Perrot, 1966). El aluminio poco cristalizado se hidroliza y da valores de pH mayores a 9.2, así como una reacción de alta intensidad del color, lo que indica propiedades ándicas relativas a minerales de rango corto (arcillas alofánicas), o también la presencia de hidróxidos de aluminio (gibbsite) (Aguilera, 1984; García, 2001). Las arcillas del grupo de la caolinita y arcillas con gibbsite dan valores más altos de alúmina que otros minerales de arcilla (Grim, 1962). Para la detección cualitativa de la alófana o minerales de aluminio se emplea otra técnica aplicada en campo (Aguilera, 1989), que está limitada para suelos con pH menor de 8.5. Asimismo, se realizaron pruebas de sedimentación en soluciones con distinto valor de pH, que consistieron en agitar durante un minuto una suspensión de 1 g de suelo secado al aire en 15 mL de solución, y observar el comportamiento de la dispersión después de 20 minutos y tres horas de reposo, respectivamente. El resultado se expresa de manera comparativa e individual para cada muestra; cuando a simple vista se aprecia que la muestra es aproximadamente estable o inestable para los dos valores de pH, se emplea un subíndice si existe una diferencia marginal. Asimismo, este procedimiento se repitió con agua destilada, y lo que se reporta es el resultado comparativo entre todas las muestras después de 24 h de reposo.

De acuerdo con la tabla, todas las muestras dan un pH mayor de 9.2, excepto la caolinita, donde es sólo ligeramente menor. Por sus antecedentes y los valores determinados de pH, alófana y sedimentación, es muy probable que la muestra Zamora y Morelos contengan alófana e imogolita (dispersa en pH ácido), respectivamente; en las demás muestras el valor alto de pH y alófana se puede explicar por la presencia de carbonatos (Blanquiza y Haloisita), lo que también influye en la leve dispersión provocada en medio ácido según se observó en la prueba de sedimentación. La cantidad de  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$  intercambiable puede estar relacionada con la mayor estabilidad de las muestra Morelos y Zeolita. Se verifica que la Caolinita, suelo de carga variable, es más estable en medio básico; esto es más notable en la Café, por lo que debe tener algún componente fuertemente dependiente del pH, como la alúmina expuesta en los bordes de las partículas.

Tabla 5.1.9 Detección de alófana y pruebas de dispersión vs. coagulación

Muestra	pH en NaF	Alófana*	Sedimentación				
			pH < 4.5		pH > 8.5		Agua destilada
			20 min		3 h		24 h
Zamora	9.43	3	F	F	F (E)		F
Blanquizca	9.87	4	F <sub>D</sub>	F	F	F	F
Café	10.67	4	F	D	F	D	F
Morelos	9.56	1	D	D	D	D	D*
Caolinita	9.16	2	F	D	F	F <sub>D</sub>	F
Haloisita	9.58	4	F <sub>D</sub>	F	F	F	F
Atapulgita	-				F	D	F
Zeolita	-				D	D	D*

\*1 = bajo, 2 = medio, 3 = alto, y 4 = muy alto

\*\*D = dispersa; F = flocula; E = expande

La tabla 5.1.10 muestra la clasificación de las muestras (SUCS) y valores de propiedades índice: límite líquido (LL) y plástico (LP), índice plástico (IP), límite de contracción (LC), porcentaje de partículas que pasa la malla # 200 y menor de 2 micras, actividad (A), densidad de sólidos (Ss) y contenido óptimo de humedad ( $W_{op}$ ). En la tabla 5.1.11 se presentan resultados de clasificación de las muestras nativas, según la textura determinada por medio del hidrómetro de Bouyoucos. Se adoptó el sistema de clasificación desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que se basa en los límites de tamaños (en diámetro) de partículas descritos en dicho sistema, esto es: tamaño de arena: 2.0 a 0.05 mm; tamaño de limo: 0.05 a 0.002 mm; arcilla: menor de 0.002 mm (Das, 1994). Como se observa, en las muestras nativas existen diferencias entre las dos clasificaciones respecto del tamaño de partícula y de los porcentajes de finos, pero se conserva aproximadamente la proporción relativa de arcilla de los cuatro suelos.

Tabla 5.1.10 Propiedades índice

Muestra	SUCS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	< 74µm (%)	< 2 µm (%)	A	Ss	$W_{op}$ (%)
Zamora	CH	79	31	48	12.7	93	59	0.68	2.68	31
Blanquizca	CL	40	21	19	13.4	95	21	0.90	2.61	15
Café	CL	46	20	26	17.8	86	27	0.96	2.70	19
Morelos	ML	54	40	14	39.7	72	13	0.85	2.54	46
Caolinita	ML	37	26	11	26.0	99	50	0.22	2.66	24
Haloisita	MH	78	66	12	49.9	68	17	0.71	2.69	70
Atapulgita	CH	380	105	275	38.1	99.99*			2.35	98
BCa-1	CH	134	33	101	14.3	97	49	2.06	2.62	31
BNa	CH	353	26	327	9.8	98	48	6.81	2.55	29
Zeolita-BNa	MH	97	32	65	32.0				2.40	35
Volclay CS50	CH	548	41	507	8.8				2.56	45
Volclay CRC	CH	438	35	403	7.9				2.52	42

Tabla 5.1.10 (continuación)

BCa-2	CH	156	47	109	19.3	86	1.27	2.57	51
BCa-3	CH	136	32	104				2.59	33

\* dato del proveedor

Tabla 5.1.11 Determinación de textura por el método de Bouyoucos (Silva, 1991)

Muestra	% Arena	% Limo	% Arcilla	Grupo de textura
Zamora	15.0	12.0	73.0	Arcilla
Blanquiza	8.0	79.8	12.2	Franco limoso
Café	24.0	38.8	37.2	Franco arcilloso
Morelos	38.7	39.7	21.6	Franco

## 5.2 Líquidos de prueba empleados

Las salmueras elegidas para esta investigación se prepararon con disoluciones de sales alcalinas, en general grado reactivo, de NaCl y KCl, y LiCl; el líquido utilizado tanto para disolver la sal, así como para las demás pruebas de laboratorio fue agua destilada. La selección de estas sustancias y su empleo en cada ensaye de manera individual obedece a que son sales neutras muy solubles, pues el objetivo inmediato es estudiar los efectos en las fuerzas entre partículas en condiciones no isotérmicas debido al tipo y concentración de soluciones electrolíticas que contengan sólo una sal, sin que se cause directamente un ataque al esqueleto de los minerales arcillosos, y donde las especies iónicas involucradas en las reacciones se puedan tratar también de manera individual; en compuestos iónicos las cantidades molares se pueden interpretar en términos de números de iones.

En estudios previos de permeabilidad conducidos en algunas arcillas, se encontró que la salmuera de KCl era el electrólito que producía los efectos más notables (Silva y Almanza, 1998), por lo que esta última se seleccionó como principal líquido permeante.

Por facilidad de preparación y medición se eligió trabajar con concentraciones expresadas en porcentajes respecto a la saturación. La salinidad se midió dentro de un tubo de vidrio especialmente diseñado, por medio de un salinómetro (densímetro marca Robsan 3035), por lo que esta medida es sólo aproximada. El máximo porcentaje en peso a 20°C para una solución acuosa de NaCl es de 26.47% (6.158 M ó 459.14 ppmil, aproximadamente), mientras que para una solución de KCl es de 25.37% (4.56 M ó 340 ppmil), concentraciones que equivalen sólo de manera aproximada al 100%, respecto a la saturación. Para efectos de este trabajo y siempre que no se especifique lo contrario, las concentraciones se expresan en porcentajes respecto a la saturación.

En la tabla 5.2.1 se observan datos experimentales de las concentraciones más utilizadas para cada electrólito, en porcentaje respecto a la saturación (% Sat.), y su expresión equivalente en porcentaje en peso, molaridad (M) y partes por mil (ppmil),



respectivamente; todas ellas son concentraciones que expresadas en términos de fuerza iónica son superiores al límite inferior anteriormente mencionado de 0.1 M (soluciones ideales); cabe recordar que en electrólitos 1:1 la concentración molar (M) equivale a la normal (N). Los datos incluyen la temperatura (T) y el pH de la solución. Para altas concentraciones, mayores del 85%, la solución electrolítica se vuelve cada vez más inestable, por lo que es necesario agitar continuamente o aumentar la temperatura para facilitar su disolución. En la mayoría de las pruebas la concentración máxima fue precisamente 85%.

En la tabla 5.2.2 se presentan datos relativos a la densidad y peso específico para varias concentraciones de las dos principales salmueras utilizadas, lo que permite obtener, a partir de la molalidad, concentraciones molares equivalentes.

Tabla 5.2.1 Concentraciones más usadas

% Sat.	% en peso	M	ppmil	pH	T (°C)	% Sat.	% en peso	M	ppmil	pH	T (°C)
KCl (PM = 74.52)						NaCl (PM = 58.46)					
0	----	----	---	5.86	21.2	0	----	----	---	5.86	21.2
5%	1.51	0.21	15.649	4.97	20.5	5%	1.68	0.29	16.953	5.19	21.0
21%	6.34	0.85	63.342	5.62	18.3	17%	4.97	0.85	49.691	5.75	21.5
30%	8.75	1.29	96.131	5.04	17.2	30%	7.86	1.46	85.352	5.40	20.0
36%	10.55	1.58	117.742	5.07	18.5	36%	9.36	1.80	105.228	5.46	20.0
42%	12.28	1.88	140.098	5.07	18.5	40%	10.82	2.08	121.597	5.54	20.0
60%	17.48	2.84	211.637	5.17	16.5	61%	16.06	3.27	191.164	5.60	20.0
80%	23.18	4.05	301.806	5.42	15.0	80%	20.72	4.47	261.316	5.70	20.3
85%	24.56	4.37	325.652	5.62	17.5	85%	22.02	4.83	282.362	5.72	20.8

Tabla 5.2.2 Densidad de soluciones a 20°C (Perry y Green, 1984)

Concentración (% en peso)	densidad (g <sub>m</sub> /cm <sup>3</sup> )	peso específico (g <sub>m</sub> /cm <sup>2</sup> -s <sup>2</sup> )	concentración (% en peso)	densidad (g <sub>m</sub> /cm <sup>3</sup> )	peso específico (g <sub>m</sub> /cm <sup>2</sup> -s <sup>2</sup> )
KCl			NaCl		
1	1.00462	985.53	1	1.00508	985.99
2	1.01103	991.82	2	1.01222	992.99
4	1.02391	1004.46	4	1.02660	1007.09
8	1.05003	1030.08	8	1.05598	1035.92
12	1.07679	1056.33	12	1.08559	1064.96
16	1.10434	1083.36	16	1.11619	1094.99
20	1.1328	1111.28	20	1.14773	1125.93
24	1.16226	1140.18	24	1.18036	1157.94
			26	1.19713	1174.39

Para poder comparar fácilmente los resultados de las pruebas de permeabilidad es conveniente referirlos a una temperatura constante, normalmente a 20°C. Indicando por el subíndice T los resultados obtenidos a la temperatura de prueba, la referencia se hace aplicando una cierta relación teórica entre las permeabilidades y viscosidades cinemáticas del agua ( $v$ ) a distintas temperaturas:  $K_{20^{\circ}\text{C}} = (v_T/v_{20^{\circ}\text{C}}) K_T$ . Experimentalmente se ha encontrado que la relación mencionada es correcta para arenas, habiéndose encontrado pequeñas desviaciones en arcillas (Juárez y Rico, 1986). Para aplicar la relación anterior es recomendable conocer la variación entre la temperatura T de prueba y el coeficiente  $v_T/v_{20^{\circ}\text{C}}$ . También puede usarse la relación de viscosidades dinámicas  $\eta_T/\eta_{20^{\circ}\text{C}}$ , ya que la variación del peso específico del agua con la temperatura es mínima respecto al cambio de viscosidad. En la tabla 5.2.3 se presentan algunos valores de dichas relaciones, calculadas como el cociente de las viscosidades dinámicas a distintas temperaturas, tanto del agua como de salmueras en distintas concentraciones (Kaminsky, 1956 y 1957), entre la viscosidad correspondiente del agua a 20°C. En dicha tabla se incluye el valor de la viscosidad relativa ( $\eta_r$ ), que es igual al cociente de la viscosidad de la solución ( $\eta$ ) y el solvente ( $\eta_0$ ), respectivamente. Como puede observarse, el efecto de la temperatura en la viscosidad de las salmueras propuestas no explica aumentos de permeabilidad mayores de un orden de magnitud en los casos más críticos (Silva y Almanza, 1997).

Tabla 5.2.3 Relación de viscosidades

Líquido	T (°C)	$\eta_r$	$\eta$ (g/cm s)	$\eta_T/\eta_{20^{\circ}\text{C}}$
Agua	50.0	1	0.00549	0.54
KCl al 35%*	12.5	0.94	0.01152	1.14
	42.5	1.05	0.00657	0.65
KCl al 100%	12.5	0.86	0.01056	1.05
	42.5	1.15	0.00714	0.71
NaCl al 100%	12.5	1.72	0.02106	2.09
	42.5	1.86	0.01161	1.15

\* Porcentaje respecto a la saturación

### 5.3 Pruebas de compatibilidad

A continuación se desglosan los ensayos realizados para conocer con mayor detalle al suelo y la interacción con el medio simulada en esta investigación. Algunas de las técnicas proporcionaron información adicional que habría sido útil conocer con anterioridad para la programación eficiente de los experimentos, pues aunque sirvieron para confirmar resultados de otras pruebas de manera más rápida y sencilla, fueron hechas con posterioridad a ellas y, en ocasiones, por primera vez.

#### 5.3.1 Permeabilidad

### 5.3.1.1 Permeámetro de pared rígida (equipo disponible en el Laboratorio de Físicoquímica de Arcillas del Instituto de Ingeniería)

Para simular las condiciones del suelo y el establecimiento del flujo en régimen estacionario, de acuerdo con el esquema de la figura 4.2.1, así como la presencia de sales disueltas en distintas concentraciones y gradientes de temperatura, se diseñó y construyó un dispositivo especial que sirviera como modelo experimental, con el fin de obtener el coeficiente de permeabilidad por medio de una prueba de carga variable y aplicando la ley de Darcy (Almanza *et al*, 1993). Se intentó minimizar los errores propios de los permeámetros de pared rígida o flexible, y eliminar a su vez la posibilidad de corrosión y obstrucción de los conductos susceptibles de ocurrir en pruebas con cierta duración con el consolidómetro y celdas triaxiales. Tomando en cuenta las diferencias con ensayos convencionales de permeabilidad en muestras saturadas, cuyos extremos están en contacto con agua desaerada, y donde este parámetro es una constante del material, cabe hacer hincapié en que las pruebas efectuadas con el modelo propuesto son de compatibilidad, donde el objetivo es comparar el comportamiento relativo entre varios especímenes. Se consideraron ciclos de carga y descarga hidráulica, química y térmica.

El dispositivo de operación manual que se construyó en el Instituto de Ingeniería se muestra en la figura 5.3.1. Sus dimensiones permiten aplicar gradientes hidráulicos hasta de 40. Además, el área de la muestra es grande (aprox.  $214 \text{ cm}^2$ ) por lo que se dispone de una cantidad de material suficiente para análisis posteriores, tanto fisicoquímicos como mecánicos, necesarios para un estudio comparativo más completo. El permeámetro consiste en un dispositivo cilíndrico de acrílico transparente de 1/4" de espesor, lo que permite observar los fenómenos macrofísicos. Su forma es similar a la de un cilindro con un anillo cónico en la zona donde se dispone la muestra, aproximadamente al centro del cilindro. En los permeámetros de pared rígida existe la dificultad adicional de cerrar el espacio entre la muestra y el cilindro de lucita confinante, de tal manera que sea prácticamente impermeable en relación con la permeabilidad de la muestra. El objeto del anillo es evitar al máximo que el agua o electrolito que está en la parte superior se filtre entre la pared del dispositivo y la arcilla, contando para ello con una inclinación de  $7^\circ$  en dicha sección que sirve como cuña y sostén de la arcilla.

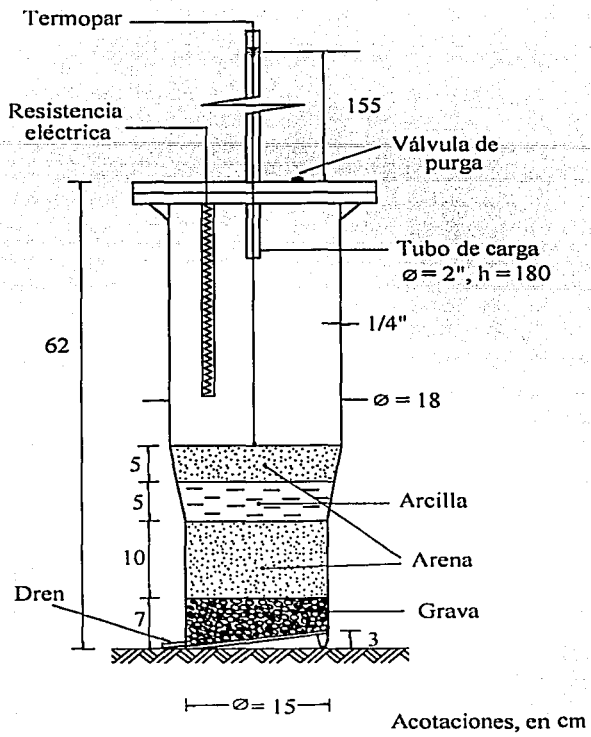


Fig 5.3.1 Permeámetro de acrílico

Dentro del permeámetro se introduce una porción de 20 cm del tubo de carga, de 3/4" de diámetro y 1.80 m de altura, quedando aproximadamente 1.58 m de tubo sobre la tapa del permeámetro, en la cual existe una válvula de purga por donde sale el aire atrapado. Una vez montado el respectivo suelo dentro del permeámetro parcialmente lleno de agua, se procede a llenar el tubo con el líquido de prueba hasta una altura de 1.55 m sobre la tapa, simulando un tirante sobre el suelo, por lo regular de 1.95 m, equivalente a una presión de 19.11 kPa (0.195 kg/cm<sup>2</sup>); se estima que dicha carga ayuda a la paulatina saturación de la muestra, sin afectar su estructura por causa de una saturación demasiado rápida, lo que en cambio sí puede llegar a ser una fuente de error en permeámetros de carga variable donde se aplique una contrapresión sin el debido cuidado. La base del permeámetro tiene un pequeño desnivel de 3 cm a fin de facilitar el drenaje hacia un recipiente para coleccionar los efluentes; en general, las lecturas del volumen filtrado se toman en lapsos de uno a tres días, y con menor regularidad se hacen determinaciones de pH y salinidad.

Además de no tener problemas de corrosión, sobre todo en pruebas de larga duración, una de las ventajas de este permeámetro es la posibilidad de aplicar gradientes térmicos. Para controlar la temperatura se introduce una resistencia para acuario de 25 W sumergible que puede funcionar a 50°C y se cubre al permeámetro con lana mineral para aislarlo térmicamente, lo que facilita elevar aún más la temperatura; previamente, los permeámetros se forran con papel aluminio y se colocan en un cuarto semioscuro para evitar el crecimiento de microorganismos, lo que también se logra a través del mismo proceso de ósmosis empleado en la conservación de alimentos, y que resulta de trabajar la mayor parte del tiempo de prueba con salmueras. Para registrar las temperaturas se dispone de termómetros a base de termopares con monitores digitales.

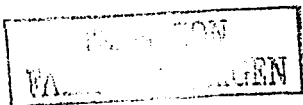
Algunas muestras se instrumentaron con el objeto de determinar las variaciones térmicas con el tiempo, instalándose termopares en las partes superior e inferior para medir las diferencias durante el día a cierta temperatura fija, así como para determinar los gradientes máximos entre los extremos superior e inferior del espécimen al elevar la temperatura. Algunos resultados se muestran en la tabla 5.3.1:

Tabla 5.3.1 Gradientes de temperatura en las muestras compactadas

Muestra	Variaciones diarias	Gradientes máximos
Atapulgita (5 cm)	2.3°C (máx: 19°C)	0.2°C (máx: 17°C) 13°C (máx: 43.5°C)
Volclay CRC (10 cm)	8.8°C (máx: 47°C)	
BCa-1 (6 cm)		15.9°C (máx: 44°C)

#### + Características de las muestras

En la parte inferior del permeámetro se colocan 10 cm de grava, subyacentes a otra capa de 10 cm de arena; sobre esta última se dispone la arcilla compactada o, en su caso, el geotextil. Todas las pruebas de permeabilidad se hicieron con materiales que pasan la malla No. 40. El espesor inicial del material compactado es de 3, 5 ó 10 cm, sobre el cual se coloca otra capa de arena de 5 cm con el objeto de confinar al suelo y reducir las posibilidades de perder compactación en la superficie del suelo, así como impedir la formación de una nata limosa sobre la superficie de la muestra; se cuidó que el material granular estuviera limpio de sales y que cumpliera, en general, con los criterios del diseño de filtros. Por su parte, el espesor de los impermeabilizantes geosintéticos es de aproximadamente 1 cm antes de su hidratación; entre las dos capas de geotextil de polipropileno no tejidos y sin punzonamiento de fibras se encuentra el material sellador, una capa de bentonita en polvo (aprox. 5.0 kg/m<sup>2</sup>), la cual se expande en contacto con el agua; se utilizaron tres tipos de bentonita sódica. Los geosintéticos también se confinaron entre dos capas de arena, y lateralmente se formó un anillo con el mismo tipo de bentonita para mejorar el sello con la pared. Adicionalmente, en pruebas de permeabilidad con agua, algunas muestras compactadas sensibles a filtraciones laterales por cambios de temperatura también se confinaron con un anillo de bentonita sódica compactada, material poco sensible a los cambios de temperatura dentro del permeámetro, de tal manera que sellara el espacio entre la muestra y la pared de acrílico.



En general, las muestras compactadas tuvieron un espesor inicial de 5 cm. En algunas pruebas se manejó un espesor de 10 cm con el fin de comparar resultados. El espesor inicial se redujo hasta 3 cm en atención a dos razones principales: acelerar una prueba para obtener resultados adicionales y por escasez del material; como se verá más adelante, es aconsejable no reducir tanto el espesor en materiales poco expansivos, además de programar pruebas en las que se cuente con suficiente material para repetir pruebas y reproducir resultados.

Con el fin de producir muestras esencialmente con la misma estructura, éstas se compactaron con una energía específica de compactación de  $6.05 \text{ kg cm cm}^{-3}$ , equivalente a la de la prueba Proctor estándar. Se seleccionó la prueba dinámica de compactación en atención a la facilidad para evaluar la energía específica y, de esta manera, reproducir con mayor precisión las mismas condiciones en todas las muestras; esto a su vez tiene el inconveniente de no representar, en general, la compactación real en campo. Con este tipo de compactación se propone también que la relación de vacíos sea lo suficientemente baja, de tal suerte que las partículas de arcilla estén, en lo posible, restringidas de consolidarse o deformarse por la posible contracción de la doble capa al exponerse a las salmueras y sobrevenir con ello una aparente disminución de la permeabilidad, pero que sólo es momentánea (Ho y Pufahl, 1987). La muestra se compacta directamente dentro del permémetro para ayudar a reducir la interfase entre el suelo y la pared, y con ello la posibilidad de una excesiva filtración. Sobre cada capa compactada se escarifica el material para lograr una adecuada unión entre las tres capas que forman la pastilla de suelo.

En general, el contenido de agua de compactación fue el correspondiente al óptimo Proctor incrementado en un 3%; con esto se logran mayores grados de saturación y permeabilidades mínimas. El material se prepara previamente a la compactación, proporcionando el contenido de agua adecuado, homogeneizándolo por mezclado y, finalmente, se deja curar en un cuarto húmedo durante un tres días, para que el contenido de humedad se uniformice por difusión. El proceso de hidratación en los geosintéticos consistió en someter a las bentonitas a una prehidratación con agua destilada antes de interactuar con las salmueras, con el fin de lograr la expansión de la arcilla y el sellado de las uniones con los geotextiles. Se hicieron algunas pruebas de primera exposición.

En general, las muestras se hidrataron primero con agua destilada, seguidas del lavado con fluidos miscibles con el agua de poro. Inicialmente la misma agua destilada pasa a través de las muestras para establecer como referencia el valor de permeabilidad en estado estable; el líquido permeante se cambia entonces a la salmuera. Las pruebas se continúan hasta que las lecturas de permeabilidad y las concentraciones del efluente son estables, incrementándose entonces, brusca o progresivamente según sea el caso, la temperatura y luego las concentraciones. Usualmente, la prueba se detiene al presentarse un aumento notable de permeabilidad, ya sea de manera definitiva, o sólo momentáneamente para disminuir la temperatura, la salinidad, intercambiar la salmuera por agua (lavado), o emplear algún colorante. El colorante fue utilizado como un líquido trazador no reactivo, con el fin de encontrar la distribución del flujo, en especial cuando

ocurre un incremento de permeabilidad. El líquido colorante es una disolución de azul brillante, que pertenece a la familia de los trifenilmetanos, de fórmula  $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$ , en una dosis de 4 g/L. Se eligió debido a que es muy visible en el suelo, a su débil toxicidad y baja adsorción sobre las partículas arcillosas (Daoud, 1996).

Se procuró recurrir a una misma fuente de suministro de agua destilada para todas las pruebas, no obstante, dada la duración de éstas, no siempre fue esto posible, ya sea por cambio o periodos de inactividad del abastecimiento principal. El agua recién destilada contiene el mismo número de iones  $H^+$  y  $OH^-$ . En nuestro caso el pH del agua destilada varió entre 5.6 y 6.2 (esta variación es la que se consideró como límite para obtener promedios con una desviación máxima aceptable). Sólo se utilizó agua de la llave, o bien, se reutilizaron los efluentes recuperados, en aquellos casos en los que esto se justificaba en atención al ahorro de dichos recursos, sin afectación del principal objetivo del experimento; en las tablas esto queda asentado en la columna correspondiente como "agua dulce" o "salmuera reciclada".

Podría pensarse que el uso del agua destilada en las pruebas de permeabilidad puede ocasionar un cambio drástico en el equilibrio de la solución del suelo; no obstante, su uso propicia un ambiente favorable para que un suelo se disperse, si las características químicas de su agua de poro lo permiten. Por otra parte, los suelos tienen una gran capacidad para amortiguar los cambios de pH, y en tanto que las condiciones prácticamente no se alterarían en los suelos originalmente muy lavados o bien drenados, en los suelos que provienen de zonas áridas o con mal drenaje las sales se retienen fuertemente, además de que en este último caso la dispersión sería máxima por efecto de la expansión osmótica. Adicionalmente, la baja permeabilidad de las muestras impide que el lavado sea intenso, en todo caso similar al que tienen las muestras en campo por lluvia y a muy largo plazo.

Entre las fuentes de error al realizar las pruebas de permeabilidad con el permeámetro de carga variable está el causado por el aire atrapado, por lo que al ejecutarse la prueba debe usarse agua desaerada, y mantenerse en esa condición para evitar que el aire represente un error de consideración. La obtención de agua desprovista de aire es de la mayor importancia para la realización de pruebas de permeabilidad. El agua contiene aire y otros gases en solución, los que se separan de ella en las primeras capas de la muestra, a las que se adhieren en forma de pequeñas burbujas que afectan la permeabilidad del suelo al ocluir los capilares, disminuir los espacios vacíos y el grado de saturación. Algunos dispositivos de prueba tienen muchas conexiones por las que se puede infiltrar el aire al sistema, posibilidad que se reduce aplicando vacío después de saturar el material. A menos que se efectúen correcciones posteriores, los valores numéricos de permeabilidad disminuyen con el tiempo, aun cuando se prepare agua con un bajo contenido de aire ( $< 1.5 \text{ cm}^3$  de oxígeno disuelto por litro) por algún método disponible en laboratorio (Juárez y Rico, 1986).

Si se emplea agua saturada con aire, debe evitarse un aumento en la temperatura o una disminución en la presión del agua que fluye de su fuente de almacenamiento a través del

suelo, debido a que, para pequeñas presiones, la solubilidad del aire es proporcional a la presión de aire sobre el agua (ley de Henry) y disminuye con la temperatura. La solubilidad del aire en el agua también puede ser afectada por otros factores al fluir a través del suelo, por ejemplo, por la disolución de sales solubles del suelo (Lambe, 1951). A este respecto, cabe mencionar que un soluto no volátil (sal) que se añade a un disolvente volátil (agua) reduce la capacidad de las moléculas del disolvente a pasar de la fase líquida a la de vapor sin cambiar la velocidad a la que las moléculas de la fase gaseosa regresan a la superficie del líquido, por lo que la presión de vapor sobre la solución disminuye (Brown *et al.*, 1993).

Para prevenir que el aire salga de solución se recomiendan dos procedimientos. Primero, mantener la temperatura del agua unos grados más caliente que la tubería y el suelo, así aquella se enfriará al fluir, e incrementará su capacidad para disolver aire, procedimiento conocido como mantenimiento de un gradiente de temperatura favorable. El segundo procedimiento consiste en emplear agua cuyo contenido de aire disuelto sea menor que su respectiva capacidad; tal clase de agua comúnmente se denomina como agua desaerada. El aire disuelto en el agua puede ser removido al incrementar la temperatura y/o disminuir la presión.

En estas pruebas no se utilizó agua desaerada ni se consideró la evaporación, por lo que en periodos largos, de más de tres días, puede existir una diferencia creciente entre el efluente y la cantidad de líquido que se agregaba para completar la carga de prueba, sobre todo en pruebas con agua y temperatura. No obstante, de acuerdo con lo anteriormente explicado, en las pruebas con salmuera, la presión de vapor disminuye y es más difícil que el aire salga fuera de solución, además de que la evaporación será mucho menor.

#### + Permeabilidad y lecturas de pH y salinidad

Generalmente, al comienzo de las pruebas el volumen de entrada excedía al efluente de la muestra, diferencia que se reducía con el tiempo al momento en que las muestras se saturaban, o bien, se invertía momentáneamente por la dilatación del líquido al aumentar la temperatura.

Aunque todas las muestras nuevas montadas en los permeámetros se hidrataron previamente con agua, no en todos los casos se esperó al perfecto establecimiento del flujo para la aplicación de la salmuera, esto por razones de tiempo y por tener ya un antecedente de los valores de permeabilidad, que precisamente indicaban un periodo muy prolongado en algunas muestras.

Las pruebas tienen como limitación que la temperatura puede tener una variación durante el día, siendo puntual el dato que se grafica, pues no se cuenta con un laboratorio con la temperatura controlada. Además, en periodos que no se tomaron lecturas diarias existe la posibilidad de desconocer una falla en el suministro de energía eléctrica que pudiera haber afectado las pruebas con temperatura.



El pH y la salinidad del efluente recolectado se midieron para verificar el desarrollo de las pruebas, determinar la mayor o menor interacción del líquido con la muestra, así como para monitorear filtraciones de cualquier ruta preferencial de flujo, sobre todo entre la pared del permeámetro y la muestra.

El pH es una medición potenciométrica de las actividades catiónicas en sistemas coloidales. Los factores que influyen en la medición del pH son: la naturaleza y tipo de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la relación suelo/solución, el contenido de sal o electrólitos y errores asociados con la estandarización del equipo y potencial de unión del líquido. El pH de una solución neutra varía con la temperatura: es de 7.0 a 25°C. El pH está asociado con la presión parcial o concentración de CO<sub>2</sub> en el medio. El dióxido de carbono puede considerarse como un caso especial de contenido de sal (o electrólito), que al disolverse en el agua disminuye su pH al formar ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>); aun el agua pura (destilada o desionizada) en equilibrio con el CO<sub>2</sub> en aire relativamente puro tiene un pH entre 5.5 y 6.0 (Page, 1982; Price, 2003). Para medir el pH del efluente se empleó un potenciómetro eléctrico. Este parámetro está sujeto a errores asociados con la estandarización del equipo y potencial de unión del líquido. Asimismo, cuando la lectura de pH no es del mismo día en que ocurre el flujo, o bien cuando éste es escaso, es menos reproducible y preciso, tanto por la variación con el tiempo de la presión de CO<sub>2</sub> en el medio como por la dificultad de sumergir el electrodo, respectivamente. Durante el lavado de la muestra puede haber mayor imprecisión por sales acumuladas en el material granular, sobre todo en la medida de pH, por lo que este valor prácticamente no se midió durante dicho periodo.

En las pruebas con salmueras, la salinidad del efluente se midió por medio de un salinómetro calibrado, para lo cual se requería un volumen mínimo de 150 mL; a diferencia del método gravimétrico, se eligió este procedimiento que, si bien arroja resultados relativos, resulta más práctico. Para la lectura de salinidad se requería reunir suficiente líquido, por lo que cuando el flujo es escaso los datos tienden a ser menores o mayores que la salinidad del día en que se toma la lectura, en función de que se esté agregado salmuera o agua para lavar, respectivamente, sobre todo al progresar la prueba; una vez alcanzada la concentración de entrada este dato es más certero.

### 5.3.1.2 Cálculo de la permeabilidad en un permeámetro de carga y sección variable

Las dimensiones de los permeámetros de carga variable pueden escogerse entre límites muy amplios, dependiendo del tamaño y carácter de las muestras escogidas o disponibles. Los tubos de carga y los alimentadores pueden tener casi cualquier altura que se desee dar. En materiales muy impermeables (arcillas), los tiempos de prueba pueden ser exageradamente dilatados, de manera que las pérdidas por evaporación y los cambios de temperatura producirían errores de consideración. En estos casos se ha procurado aumentar el gradiente hidráulico por presión, a fin de incrementar la velocidad de filtración del agua circulante y, así, disminuir los tiempos de prueba. Además, las dimensiones del tubo de carga deben permitir reducir pérdidas por evaporación; de ahí

que la relación del área del tubo de carga a la del espécimen sea muy pequeña y se requiera de una determinación muy precisa de la primera.

En los permeámetros de carga variable el coeficiente de permeabilidad se calcula por medio de una ecuación, que resulta de igualar la cantidad de líquido, estimada con base en la ley de Darcy, que se filtra a través de una muestra de suelo en determinado tiempo, con cierto volumen, el cual a su vez se deduce de la diferencia de niveles que ocurre en un tubo alimentador durante el mismo intervalo. No obstante, en dicha fórmula se considera que el área del tubo de carga es constante, situación que cambia en nuestro caso cuando el nivel del agua desciende a la altura de la sección cilíndrica del permeámetro que contiene la muestra. Para poder calcular el coeficiente de permeabilidad en el dispositivo utilizado se propone el siguiente desarrollo, que considera la variación de sección de la tubería a lo largo de su longitud. En relación con la figura 5.3.2, sean:

- a =        área del tubo vertical de carga
- A<sub>1</sub> =      área de la muestra
- A<sub>2</sub> =      área del cilindro del permeámetro
- a<sub>1</sub> =      carga hidráulica inicial (217 cm)
- a<sub>2</sub> = b<sub>1</sub> = carga hidráulica en el cambio de sección (62 cm)
- b<sub>2</sub> =      carga hidráulica final

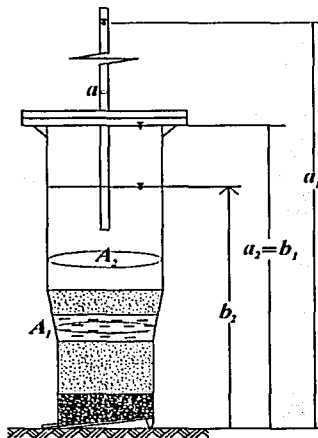


Fig 5.3.2 Permeámetro

Según la ley de Darcy, la cantidad de agua en  $\text{cm}^3$  que atraviesa la muestra en un tiempo  $dt$  será:

$$dV = kA_1 i dt = kA_1 \frac{h}{L} dt \dots (5.1)$$

Simultáneamente, el agua tendrá un descenso en el tubo vertical,  $dha$ , y otro más en el cilindro,  $dhb$ , por lo que el volumen de agua que atraviesa la muestra en el tiempo  $dt$  puede expresarse como:

$$dV = -(adh_a + A_2 dh_b) \dots (5.2)$$

Igualando las dos expresiones anteriores y desarrollando:

$$kA_1 \frac{h}{L} dt = -(adh_a + A_2 dh_b) \dots (5.3)$$

$$\int \frac{kA_1}{L} dt = \int -\frac{adh_a + A_2 dh_b}{h} \dots (5.4)$$

$$\frac{kA_1}{L} \int dt = -\left[ \int a \frac{dh_a}{h} + \int A_2 \frac{dh_b}{h} \right] \dots (5.5)$$

$$\frac{kA_1}{L} t = -\left[ a \int_{a_1}^{a_2} \frac{dh_a}{h} + A_2 \int_{b_1}^{b_2} \frac{dh_b}{h} \right] \dots (5.6)$$

$$\frac{kA_1}{L} t = a \ln \frac{a_1}{a_2} + A_2 \ln \frac{b_1}{b_2} \dots (5.7)$$

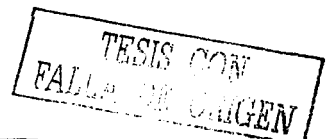
como  $a_2 = b_1$ , finalmente se tiene:

$$k = \frac{L}{A_1 t} \left[ a \ln \frac{a_1}{a_2} + A_2 \ln \frac{a_2}{b_2} \right] \dots (5.8)$$

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad se emplea la expresión general ya establecida o la propuesta, 5.8, según lo determinen las condiciones de frontera; si bien cuando ocurre lo segundo, y dado el diámetro y lo extenso del tubo de carga en nuestro caso, en general la prueba deja de ser funcional para periodos cortos, de todas maneras puede resultar útil la comparación de los valores obtenidos, así como contar con la posibilidad de estimar la permeabilidad, luego de hacer las consideraciones necesarias, para distintos arreglos geométricos.

En realidad, lo que se está calculando con este permeámetro es un valor promedio de permeabilidad, pues no se sabe con precisión en qué momento de la prueba puede ocurrir una variación de dicha propiedad, que normalmente se considera como una constante del suelo, por efecto del líquido de prueba y/o cambio de temperatura. Lo anterior implica que, cuando se tiene un flujo extraordinario, el valor de permeabilidad correspondiente en una gráfica en función del tiempo aparecerá como un pico, cuya magnitud puede ser ligeramente mayor.

Cabe mencionar que puede presentarse un efecto adicional debido a la súbita entrada de aire cuando el nivel del agua desciende y alcanza la porción inferior del tubo de carga que penetra unos centímetros dentro del cilindro que contiene la muestra; la expresión



propuesta no considera el cambio brusco de sección en el tubo de carga por considerar que para fines prácticos dicho efecto no sería significativo.

### 5.3.1.3 Permeámetro de pared flexible (equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, UNAM)

Se realizaron pruebas comparativas en un permeámetro de carga variable en una celda triaxial con contrapresión y presión confinante continua. Con este permeámetro es posible aplicar gradientes hidráulicos hasta de 20. El cambio de volumen está controlado por buretas graduadas a la entrada y salida de la celda triaxial; el diámetro de cada bureta es de 0.65 cm. La muestra se coloca en una cámara de acrílico llena de agua que puede presurizarse para presionar la membrana flexible contra la muestra, previniendo el flujo a través de la pared. Para incrementar el grado de saturación de la muestra el límite de la contrapresión es hasta de 0.6 MPa. Ya que el área de la muestra es grande (133 cm<sup>2</sup>) se tiene un pequeño efecto de escala y una mayor precisión (Auvinet y Esquivel, 1986). La muestra se preparó en un molde de compactación y después de ser extraída se probó en la celda triaxial. La muestra fue compactada con una humedad 3% superior a la óptima, con un espesor de 5 cm y un diámetro de 11.9 cm, con un esfuerzo de compactación correspondiente a la prueba Proctor estándar. La muestra preparada para la prueba triaxial consiste en una columna cilíndrica de suelo compactado confinado lateralmente por una membrana flexible (de látex) y con discos porosos en sus extremos. Se hace pasar a través de la muestra suficiente líquido estándar (agua destilada y desaerada) para establecer como referencia un valor de permeabilidad estable a temperatura ambiente, antes de que se introduzca el líquido permeante (salmuera de KCl); la muestra interactuó con la salmuera durante dos semanas; el gradiente aplicado fue de aproximadamente 15.6.

La mínima presión efectiva de confinamiento requerida para mantener el contacto entre la membrana elástica y la probeta de suelo es de 30 kPa (Daoud, 1996). En la prueba practicada se utilizó una presión de confinamiento 300 kPa.

Para la adecuada operación y mantenimiento de este tipo de permeámetro, se debe considerar que puede presentarse con el tiempo un problema potencial de corrosión e incrustación de sales en los conductos de pequeño diámetro, así como deterioro de la membrana que envuelve la muestra. Asimismo, en este permeámetro se tuvieron dificultades para adaptar un sistema que permitiera averiguar el efecto de temperatura, por lo que sólo se realizaron ensayos a temperatura ambiente.

### 5.3.2 Límites de Atterberg modificados

Ya que tanto en resultados propios como en aquellos consultados en la literatura (Ho y Pufahl, 1987), el efecto de la contaminación con sales en la distribución granulométrica y densidad relativa no es discernible, y la reproducibilidad de la información no fue la esperada, en general, dichas pruebas no se consideraron en estos estudios, los cuales comprenden las siguientes tres etapas.

### 5.3.2.1 Primera etapa

Con el fin de explicar el efecto que tienen ciertas sustancias sobre los límites de plasticidad y sus relaciones con cambios del tejido del suelo, así como aclarar algunos resultados contradictorios, se realizaron diversas pruebas en las que se reguló la ejecución de las mismas, así como la composición mineral del suelo, incluyendo a los iones disueltos en la fase líquida. Estas pruebas de compatibilidad se realizaron en su mayor parte con soluciones de cloruro de sodio (NaCl). El líquido utilizado tanto para disolver la sal, así como para las demás pruebas de laboratorio fue agua destilada; con excepción de las muestras de los permeámetros, la sal empleada fue NaCl grado analítico. Se hicieron análisis químicos para entender mejor el comportamiento de las arcillas así como para verificar algunos resultados previamente obtenidos por métodos de mecánica de suelos.

Los materiales seleccionados fueron dos bentonitas cálcicas (BCa-1 y BCa-2), así como una bentonita sódica activada (BNa), todas ellas muestras comerciales secadas al aire. La selección de las bentonitas para este estudio se basó en la necesidad de un sistema simple de suelo para demostrar una relación entre las mediciones de plasticidad y cambios de la doble capa como resultado de la interacción de partículas arcillosas con el medio.

Mediante la exposición de dos muestras comerciales de bentonita a un flujo con soluciones de NaCl en varias concentraciones, se buscó lograr un intercambio iónico para evaluar posteriormente las variaciones del índice de plasticidad de estas arcillas. Para realizar esta investigación se utilizaron las muestras BCa-1 y BNa. Un cilindro de pared rígida (acrílico) fue utilizado como la celda del permeámetro para las pruebas de conductividad hidráulica de carga variable unidimensional. Las muestras se montaron en capas de 5 cm de espesor compactadas dentro de los permeámetros y se determinaron, como parámetro de control, sus propiedades índice y la permeabilidad al agua; una vez establecido el flujo se cambió el agua por la salmuera de cloruro de sodio para que se realizara el intercambio iónico deseado. Previamente a la determinación de los límites de plasticidad se procedió al lavado de la muestra con agua destilada dentro del permeámetro. A continuación se describen cada una de las muestras y su comportamiento.

(1) Una muestra de BCa-1 se expuso a un flujo con salmuera de NaCl al 5%, respecto a la saturación, durante 60 días, sin presentar un aumento significativo en la permeabilidad. Finalmente, la muestra se lavó con agua destilada dentro del permeámetro durante 50 días y aplicando incrementos de temperatura. (2) Otra muestra de BCa-1 registró en la primera etapa (agua destilada) una baja permeabilidad. En la segunda etapa de esta prueba, correspondiente al flujo con NaCl al 100% a temperatura ambiente, después de un periodo de 80 días hubo un aumento notable de permeabilidad y salinidad del efluente, con el correspondiente aumento en permeabilidad. Posteriormente, se intercambió la salmuera por agua destilada, regresando a valores de permeabilidad menores, aun cuando la salinidad del efluente era todavía de un 50%. Posteriormente, se trató a dicha muestra con una concentración del 20% (96 días) y 35% (37 días) para observar si se tenía un nuevo aumento en la permeabilidad, pero no se presentó ningún flujo extraordinario, aun

al aumentar la temperatura. Finalmente, la muestra estuvo lavándose dentro del permeámetro por 84 días, durante gran parte de los cuales se elevó la temperatura. Nos referiremos a esta muestra como BCa-1 al 35%, pues fue la concentración que se utilizó previamente al lavado final. (3) La muestra BNa se sometió a un flujo de salmuera saturada de NaCl. Se procedió en una primera etapa a establecer el flujo con agua destilada. Una vez establecido el flujo se sustituyó el agua por la salmuera, y se registró al tercer día un gran efluente y un vaciado rápido al cuarto día. Posteriormente, se redujo la concentración al 50% respecto a la saturación, pero continuó el vaciado del permeámetro, por lo que se procedió a cambiar nuevamente el líquido permeante por agua destilada. Transcurridos 60 días, se observó una reducción paulatina de la permeabilidad a un valor similar al inicial. En una última etapa se sometió dicha muestra a un flujo de NaCl al 20%, tardando esta vez 32 días en sufrir otro vaciado. Finalmente, se regresó al flujo con agua destilada por 43 días, durante algunos de los cuales se elevó la temperatura, presentándose nuevamente una disminución de la permeabilidad. Esta muestra se denominará como BNa al 100%, en atención a los posteriores resultados de plasticidad.

Con el fin de acelerar el proceso de intercambio iónico, la variación de la plasticidad de las tres muestras (BCa-1, BCa-2 y BNa) fue investigada usando técnicas de agitación directa con salmueras y posteriores diluciones mediante lavados con agua destilada. Las bentonitas fueron contaminadas con cloruro de sodio en distintas concentraciones mediante tratamiento directo, durante uno o varios días con una salmuera de NaCl en una relación de diez partes de salmuera por una parte de suelo y agitación mediante un agitador magnético para formar una suspensión durante dos horas por día. Después de permanecer la mezcla en reposo se decantó el líquido sobrenadante si éste no presentaba turbiedad, cuidando de no perder finos que permanecieran en suspensión. La suspensión resultante y el material sedimentado se filtraron utilizando papel altamente retentivo y aplicando vacío. Por último, las muestras fueron secadas al aire y molidas. Para determinar el efecto de la concentración de sales en los límites de plasticidad de las muestras tratadas con distintas concentraciones de salmueras, se realizaron pruebas en las que para determinar dichos límites se emplearon estas mismas soluciones para humedecer a la muestra. Posteriormente, se procedió a la determinación de los límites de plasticidad (ASTM, 1986), después de eliminar previamente el exceso de sal mediante varios ciclos de lavados con agua destilada en los que se reemplazaron repetidamente las soluciones; parte de las muestras contaminadas se mezcló con agua destilada en una relación de 20 partes de agua por una parte de suelo y se agitó dentro de un recipiente durante media hora para formar una suspensión. Después se dejaba permanecer en reposo la suspensión, hasta que un cierto volumen de líquido sobrenadante, suficiente para medir la salinidad, no mostraba ningún grado de turbiedad. Inicialmente se utilizó un salinómetro para verificar que la salinidad de la solución del líquido sobrenadante, posterior a dichos lavados y previamente filtrada para eliminar cualquier partícula arcillosa, fuera nula. El procedimiento de lavado descrito se repitió con una parte de las muestras lavadas. Por último, el exceso de agua se extrajo por filtración y las muestras fueron secadas al aire y molidas. Las muestras lavadas se llevaron a un contenido de agua correspondiente al límite líquido y se dejaban reposar por 24 h antes de las pruebas de límites.

### 5.3.2.2 Segunda etapa

Se determinaron los límites de plasticidad después de tratar las muestras en los permeámetros correspondientes, donde la principal sal utilizada fue la de KCl; los límites se obtuvieron después de dejar secar al aire la muestra, para después molerla, revolverla y humedecerla con agua destilada. Los contenidos de humedad finales de algunas muestras,  $\Delta W_f$ , corresponden, en general, al centro de ella; dichos contenidos también se midieron para tres distintos niveles en algunas muestras.

### 5.3.2.3 Tercera etapa

Debido a que los antecedentes señalan claramente la influencia de las propiedades químicas y la mineralogía, en el comportamiento físico de las arcillas, y por consiguiente, en la variación de sus propiedades índice (límites de consistencia), se planteó la realización de esta serie de pruebas fisicoquímicas. En ellas se puso un cuidado especial en el procedimiento, llevando un control más riguroso del tratamiento que se dio al suelo para poder observar realmente la influencia de las características químicas, en particular del anión cloro, en la variación de las propiedades antes mencionadas.

El suelo utilizado fue una bentonita cálcica comercial procedente de Durango (BCa-2). La muestra fue tratada con tres distintas concentraciones de NaCl y KCl grado analítico. El procedimiento seguido se describe a continuación: se humedecieron entre 150 y 200 gramos de suelo seco, de manera que al final de la operación de mezclado se tuviera un contenido de agua cercano al límite líquido, como lo señalan las normas de prueba más reconocidas (Page, 1982). Se dejó curar la muestra durante 24 horas, aproximadamente, para enseguida determinar sus límites de plasticidad (límites líquido, plástico y de contracción). El material sobrante de estas determinaciones se dejó secar al aire para posteriormente, efectuar las demás pruebas. Se procedió a lavar la muestra para eliminar el exceso de sales en el agua de poro y observar cómo cambian los valores de todos los parámetros que se están considerando.

Por el tiempo que esto lleva, el suelo no llegó a secarse al aire totalmente. Se midió entonces el contenido de agua de la muestra, y con este dato se procedió a agregar la cantidad de agua destilada en una proporción predeterminada de 16 veces el peso de suelo seco, igual para cada proceso de lavado, de manera que fuera un tratamiento semejante para cada concentración y cada una de las dos sales elegidas. Se optó por realizar los lavados con dicha cantidad por ser la adecuada para realizar más fácilmente el proceso, que consistió en la incorporación del agua a la pasta de suelo, con un agitado simultáneo, y un subsiguiente periodo de reposo o sedimentación que permitiera la separación del agua y, consecuentemente, la remoción de sales en exceso. Se llevaron a cabo dos ciclos de lavado; después de cada uno de ellos se repitieron las determinaciones de límites de consistencia.

### 5.3.3 Fisicoquímica

#### 5.3.3.1 Análisis de iones solubles e intercambiables

Con el objetivo de obtener resultados reproducibles que se puedan comparar y clasificar respecto a los existentes en la literatura, se decidió que el agua de poro del suelo se extrajera previa preparación de pastas de saturación de cada una de las muestras. La relación suelo-agua es determinante en la interpretación de los análisis de los extractos, pues de ella dependen las cantidades absolutas y relativas de los diversos solutos; una proporción alta de agua puede causar dispersión, hidrólisis y disolución de minerales, en tanto que una cantidad baja de líquido es una limitación en la obtención de suficiente extracto para análisis confiables. La salinidad del suelo se define y mide convencionalmente a partir de los extractos acuosos de pastas de saturación del suelo. Es por ello que se ha elegido dicha relación suelo-agua, pues permite obtener en laboratorio una cantidad razonable de extracto con un equipo común de presión o vacío, y no se produce una mayor dilución de las sales del suelo, además de que el extracto de saturación corresponde a un contenido de agua *equipotencial* común para varios tipos de suelos, que se puede relacionar de manera predecible con contenidos de agua de campo; a su vez la conductividad del extracto de la pasta de saturación está relacionada linealmente con la concentración de sales en solución, así como con la presión osmótica. Para definir la salinidad de un suelo mediante pruebas químicas, además de la pasta de saturación, las recomendaciones para obtener extractos mencionan la utilización de relaciones suelo seco - agua 1:1, 1:2, 1:5, etc. (Jackson, 1960; Page, 1992).

Las pastas saturadas se preparan añadiendo lentamente agua destilada por medio de una bureta al suelo, mientras éste se agita suavemente con una espátula; la muestra de suelo se consolida de vez en vez durante el proceso de mezclado golpeando ligeramente el recipiente contra la mesa de trabajo. En el punto de saturación se supone que el aire ha sido relativamente excluido, la pasta de suelo brilla al reflejar la luz, y fluye ligeramente cuando el recipiente contenedor se inclina; se dice entonces que el suelo está en el *punto de flujo* o límite líquido. Después del mezclado, las pastas se dejan curar de un día para otro, y se comprueba otra vez el punto de saturación, revisando que no exista un déficit o exceso de agua (Page, 1982). Entonces se extrae el agua intersticial de los especímenes, junto con los iones disueltos en ella, generando un gradiente con ayuda de una bomba de vacío y usando papel filtro para obtener extractos claros, e inmediatamente se determinan parámetros que son más susceptibles de variación con el tiempo de exposición, como pH, conductividad, carbonatos y bicarbonatos, para posteriormente realizar los demás análisis.

Primera etapa (análisis realizados en el Laboratorio de Edafología "Mtro. Nicolás Aguilera" de la Facultad de Ciencias de la UNAM)

Con el objeto de conocer algunas de las propiedades fisicoquímicas más importantes desde el punto de vista de identificación, así como para determinar el grado de interacción de los suelos con ciertas sustancias, se procedió a realizar diversas pruebas de laboratorio



siguiendo los procedimientos establecidos en análisis de suelos (Silva, 1991), tanto con las muestras en su estado original como después de interactuar con las salmueras empleadas en los permeámetros y en pruebas de agitación directa. La salinidad del suelo se midió inicialmente en extractos acuosos de pastas de saturación de suelo (Page, 1982), tanto en su estado original como después de ser procesada con diferentes concentraciones de salmuera por el lapso de una semana, de la manera previamente descrita para las pruebas de plasticidad (5.3.2.1). Parte de las muestras contaminadas fue lavada con agua destilada varias veces, reemplazando repetidamente las soluciones. Una vez obtenidos los extractos de las muestras, se realizaron los análisis químicos en las soluciones filtradas para determinar la concentración de los solutos más abundantes de las muestras previamente tratadas, antes y después de ser lavadas. Con el fin de verificar directamente el efecto de un exceso de sales en el agua de poro sobre la plasticidad, se utilizaron parte de las mismas muestras molidas que se ocuparon para las pruebas de límites de plasticidad, tanto en su estado original como después de un primer y segundo lavados posteriores al tratamiento con salmueras. Para confirmar el efecto más drástico del potasio, se procedió a la determinación del sodio y potasio intercambiables en muestras de bentonita en estado original, así como después de interactuar en los permeámetros, o bien, tratadas directamente con salmueras de NaCl o KCl. Inicialmente, se determinó la salinidad del suelo y la conductividad eléctrica, obteniéndose también valores de pH de los extractos, utilizando para ello un potenciómetro modelo Corning 7. El sodio soluble e intercambiable, así como el potasio intercambiable, fueron determinados con un flamómetro modelo Corning 400. La determinación del cloro soluble fue mediante titulación con  $\text{AgNO}_3$  (Richards, 1954).

## 2.ª etapa (análisis realizados en el Laboratorio de Físicoquímica de Arcillas del Instituto de Ingeniería de la UNAM)

Se efectuaron pruebas físicoquímicas con las muestras originales y después de su extracción de los permeámetros, algunos de cuyos resultados ya se presentaron previamente (tablas 5.1.6 a 5.1.9). En todas las muestras originales se emplearon 200 g para preparar las pastas de saturación; en el caso de algunas muestras tratadas del permeámetro se utilizaron cantidades adicionales para compensar el exceso de agua en que a veces se incurría debido a la mayor dificultad para agregar la cantidad exacta durante la preparación.

La concentración y composición de los constituyentes disueltos en un agua son importantes en cualquier evaluación de las condiciones de salinidad o alcalinidad en una cierta área de influencia. Los análisis de las aguas incluyen varios parámetros, además de la concentración de algunos de los mayores y menores constituyentes más importantes. Las concentraciones de los metales (por ejemplo,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) son las totales, independientemente de si están o no formando compuestos. Entre los demás parámetros están: pH, total de sólidos disueltos (TSD, ppm) y conductividad específica (CE,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Los análisis de rutina identifican, aproximadamente, toda la masa disuelta en una muestra. Los iones no analizados y los compuestos orgánicos usualmente representan una proporción despreciable.

Inicialmente, se determinaron la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos disueltos (TSD), expresados respectivamente en microsiemens por cm,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y en  $\text{mg}/\text{L}$ , utilizando para ello un medidor portátil de conductividad/TSD modelo CDH-42 marca Omega (intervalo: 10 a 10 000  $\mu\text{S}$ ; 7 a 7 000  $\text{mg}/\text{L}$ ; precisión:  $\pm 2.5\%$ ), así como también valores de pH de las muestras, con un medidor electrónico (potenciómetro) marca Hanna, modelo HI 8314. La medida de la conductividad se utiliza frecuentemente para obtener una estimación rápida del contenido de sólidos disueltos en una muestra de agua. Se pueden obtener los sólidos contenidos en las muestras multiplicando la conductividad por un factor empírico que varía de 0.55 a 0.9. El factor apropiado depende de los componentes iónicos en la solución (Fernández, 1990).

Posteriormente, se determinaron los principales iones solubles. Los valores de Ca, Na y K se obtuvieron mediante un flamómetro marca Jenway. La determinación del cloro fue mediante titulación con nitrato de plata (método argentométrico); los carbonatos y bicarbonatos se calcularon por titulación con ácido sulfúrico y los indicadores fenolftaleína y anaranjado de metilo (Richards, 1954; Page, 1982; Silva, 1991). Los resultados de las concentraciones de los iones en solución se expresan en, en general, en miliequivalentes por litro ( $\text{meq}/\text{L}$ ), y cuando así conviene en partes por millón (ppm), o por mil (ppmil). Cuando se trata de concentraciones altas, como sucede en las muestras tratadas sin lavar, se requiere efectuar varias diluciones. Por consiguiente, durante el proceso se pueden inducir errores en ambos sentidos. La técnica utilizada para la determinación de cloruros tiene ciertos límites, por lo que los valores obtenidos son menos exactos que los determinados por otros métodos.

Existe un considerable número de interrelaciones entre los valores obtenidos en las pruebas químicas en extractos de pastas de saturación. Las concentraciones o contenidos totales de cationes y aniones, expresados en una base equivalente, son aproximadamente iguales (evaluación de la electroneutralidad del análisis). La conductividad eléctrica de los extractos de saturación, expresada en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^\circ\text{C}$  y multiplicada por 10, es aproximadamente igual a la concentración total de cationes solubles, en  $\text{meq}/\text{L}$ ; dicha relación con la conductividad aumenta con presencia de sodio y disminuye con la de bicarbonatos. Si en la solución se encuentran carbonatos en cantidades detectables, los valores del pH deben ser mayores de 9. La concentración de bicarbonatos rara vez es superior a 10  $\text{meq}/\text{L}$  en la ausencia de carbonatos, y si el pH tiene valores de 7 o menos, es poco común que exceda de 3 ó 4  $\text{meq}/\text{L}$ . La concentración de calcio y magnesio en el extracto de saturación casi nunca es mayor de 2  $\text{meq}/\text{L}$  para un pH mayor de 9, por consiguiente, la suma de calcio y magnesio es baja si se encuentran carbonatos en cantidades titulables. Asimismo, la concentración de calcio más magnesio nunca es alta en la presencia de altas concentraciones de bicarbonatos. El pH del extracto de saturación de suelos calcáreos es invariablemente mayor de 7.0 y, generalmente, mayor de 7.5; un suelo no calcáreo puede tener un pH hasta de 7.4. Un pH mayor de 8.5 casi invariablemente indica un PSI igual o mayor de 15. En general, el PSI se incrementa con la RAS y viceversa. Debido a que la CIC y la retención de humedad (humedad de saturación) están ligadas a la textura del suelo, existe una relación directa entre estas dos

propiedades, particularmente en suelos con materiales de procedencia y modo de origen similares (Richards, 1954).

Según lo plantean Ho y Pufahl (1987), el grado del efecto de membrana semipermeable podría ser evaluado de la siguiente manera: si el valor de TDS de los extractos es igual al de la salmuera con la que se trató la muestra el efecto será menor, pero si el TDS de los extractos es mucho menor, podría entonces haber un significativo efecto de membrana semipermeable.

### C) Tercera etapa (análisis realizados en el Laboratorio de Fisicoquímica del II)

Se utilizaron sales de NaCl y KCl en dos concentraciones, 0.1 y 0.4 N, ésta última es similar a la del agua de mar. El conjunto de las muestras contaminadas fue lavado con agua destilada en dos etapas para monitorear las propiedades antes y al final de cada ciclo de lavado, tales como conductividad eléctrica (CE) , total de sólidos disueltos (TSD), ambos tanto de la solución como de la suspensión, pH (en solución) y cloruros (Cl<sup>-</sup>) (extracto de la pasta), siguiendo los métodos descritos anteriormente para cada una de ellos.

La conductividad se determinó en una cierta porción de suelo y una cantidad de agua equivalente a 10 veces su peso. Para ello, se tomaron 10 g de arcilla seca y se mezclaron con 100 mL de agua destilada, mediante un agitador magnético. Enseguida, se tomaron las lecturas de pH y conductividad eléctrica, así como el total de sólidos disueltos, mediante el potenciómetro y conductímetro ya descritos, respectivamente. Se reportan dos datos de conductividad, uno con el suelo en suspensión, inmediatamente después de agitar la mezcla, y el otro en solución, después de mantener en reposo el material un cierto tiempo para permitir la sedimentación y la existencia de un líquido sobrenadante; esto con el fin de comparar los valores de sales disueltas a través de la medida de conductividad y evaluar el efecto de la contaminación por la sal: diferencias notables entre los valores de la suspensión y la solución serían el resultado de cambios en las propiedades de la doble capa, según lo proponen Ho y Pufahl (1987).

La pasta para obtener los extractos se elaboró con una relación suelo-agua 1:10, pues por el tipo de material, de alta plasticidad y retención de agua, era más adecuada para contar con suficiente extracto. Asimismo, se realizó una corrección que considera el límite líquido (LL) de cada muestra, con el fin de que los extractos fueran uniformes en la cantidad de agua excedente de la correspondiente al LL de cada una. Se tomó como base la muestra sin tratar (original), y se corrigió en los demás casos, agregando más o menos agua, proporcionalmente al mayor o menor valor del LL, respectivamente. La obtención del extracto de la pasta fue aplicando vacío, mediante un proceso de filtrado con papel Whatman.

### 5.3.3.2 Difracción de rayos X (análisis realizados e interpretados en el Laboratorio de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM)

El análisis cuantitativo de minerales arcillosos es particularmente difícil. La intensidad de la reflexión de una fase mineral en una mezcla depende no sólo de su porcentaje de masa, sino de la densidad y de los coeficientes de atenuación de masa de la fase mineral. Debido a ello se dan estándares de composiciones conocidas como comparación. Sin embargo, no existe material de referencia apropiado para todos los casos. El análisis de rayos X, no obstante, es adecuado para examinar los cambios estructurales en los minerales arcillosos después del contacto con sustancias que afectan su estructura (Koerner *et al*, 1995).

En las montmorilonitas la reflexión (001) es dependiente del estado de hidratación o de la acción de otras moléculas polares; esto puede ser observado en ángulos bajos de difracción. Otras reflexiones basales son escasas y anchas (hk0) y son, en posición e intensidad, independientes de la población catiónica de entrecapas. Entre las constantes cristalográficas de la celda unitaria de la montmorilonita, en condiciones de vacío, son las siguientes  $a = 5.17 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.92 \text{ a } 8.99 \text{ \AA}$ , y  $c = 10.0\text{-}10.4 \text{ \AA}$ . El grosor del parámetro  $c$  depende del material que se encuentre entre las capas. El valor de  $15.2 \text{ \AA}$  corresponde a un espaciado definido por una doble capa de moléculas de agua, como ocurre con las montmorilonitas alcalino-térreas. El parámetro  $c$  en las montmorilonitas alcalinas, que contienen sólo una capa de moléculas de agua es de  $12.5 \text{ \AA}$ . Con mayor cantidad de capas de agua puede llegarse a dimensiones  $c$  de  $18.5$  y  $21.5 \text{ \AA}$  (Cordero, 1997).

El fenómeno de la hidratación en la montmorilonita no es simple y según Van Olphen (1963) se origina debido a:

- a) Los cationes situados entre las capas se hidratan, y su mayor energía de hidratación sobrepasa las fuerzas de atracción entre las hojas unitarias;
- b) el agua no hidrata los cationes situados entre las hojas unitarias sino que se adsorbe entre las superficies de oxígeno por formación de puentes de hidrógeno. Se han propuesto algunas distribuciones geométricas especiales de las moléculas de agua en las capas de agua que podrían estimular estos enlaces.

La expansión de las redes de montmorilonita por efectos de la adsorción de moléculas de agua fue estudiada por Bradley, Clark y Grim (Besoain, 1985), en una bentonita de Wyoming (EUA). La hidratación incrementa el espaciado basal en valores enteros definidos, desde  $12.4$  hasta  $21 \text{ \AA}$ , aproximadamente, que corresponde a un número entero de moléculas de agua (1, 2, 3 ó 4 capas monomoleculares de agua según el catión de cambio) y permite obtener una configuración más o menos estable de montmorilonita (hidratos de montmorilonita) por la presencia de una a cuatro moléculas de agua. Experimentos efectuados por métodos de difracción de Rayos X en ángulos bajos, con referencia a la hidratación de la montmorilonita usando diversos cationes demostraron que cuando la expansión de las capas en el eje  $c$  supera aproximadamente los  $19 \text{ \AA}$ , hay una marcada disminución de la regularidad. Cuando el catión de saturación es Ca o Mg, las esmectitas anhidras adsorben agua expandiéndose desde  $10 \text{ \AA}$ , aproximadamente, hasta un máximo alrededor de  $20 \text{ \AA}$ , lo que significa la admisión de 4 capas

monomoleculares de agua entre las capas unitarias 2:1 de la montmorilonita (Fig. 5.3.3). Con una montmorilonita-Na, la expansión es más pronunciada, pudiendo llegar hasta 160 Å. Una expansión sobre esta dirección determina que la sucesión de superposición de capas se pierda. La diferencia de expansión entre las montmorilonitas saturadas con iones Ca, Mg o Na, radica en el grado de hidratación de estos iones, más fuerte en el Na que en el Ca o Mg (Cordero, 1997).

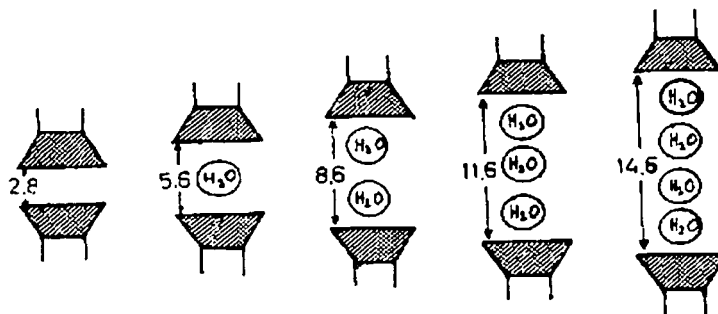


Fig 5.3.3 Hidratos de bentonita

Para complementar la información de las muestras aún no identificadas se llevó a cabo su análisis por medio de difracción de rayos X. Adicionalmente, algunas muestras con un contenido importante de montmorilonita se trataron previamente tanto con salmueras de cloruro de sodio como de potasio, obteniéndose los difractogramas correspondientes antes y después de que las muestras fueran lavadas del exceso de sales.

El procedimiento seguido para la preparación de las muestras fue el siguiente:

Las muestras fueron molidas en mortero de ágata, cribadas en un tamiz Ficcsa N° 400 malla de 400  $\mu\text{m}$  y fueron suspendidas en agua destilada, homogeneizadas y colocadas en vidrios portaobjetos con el fin de conseguir una orientación preferencial. Los difractogramas fueron corridos en un difractómetro Phillips Mod. 1130/96 (generador) y PW 1050/25 (goniómetro), utilizando radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ), en el intervalo angular de  $2\theta$  de  $2^\circ$  a  $72^\circ$ , en las condiciones normales de operación: 30kV, 20 mA y con un factor de escala de  $1 \times 10^3$ . En los casos en que la señal (pico) se salía de la gráfica, se ajustó el factor de escala, para lograr que el mismo quedara dentro.

Las muestras fueron tratadas con etilenglicol y nuevamente se corrió el difractograma en el intervalo angular de  $2\theta$  de  $2^\circ$  a  $13^\circ$ , en las condiciones normales de operación.

Los difractogramas fueron medidos, con el fin de asignar los valores de las distancias interplanares correspondientes a las reflexiones (picos).

Cada uno de los difractogramas fue cuidadosamente analizado para determinar las especies mineralógicas presentes en las muestras.

El objetivo de obtener los difractogramas de muestras tratadas con salmueras fue determinar las variaciones del parámetro de red ( $d$ ) respecto al valor original, observando o midiendo el desplazamiento del ángulo de difracción hacia valores menores.

Adicionalmente, las muestras Haloisita, Morelos y Zamora se calentaron previamente a  $550^{\circ}\text{C}$  durante 2.5 h para realizar un segundo análisis de difracción, cuyos resultados se presentaron en la tabla 5.1.3, esto con el fin de identificarlas con mayor precisión, debido a que puede haber cierta incertidumbre o confusión entre algunos componentes importantes como la haloisita y la ilita, lo que se explica a continuación.

El objetivo principal de esta segunda prueba en la haloisita, fue revisar la posible existencia de ilita; en la muestra de Morelos, confirmar o descartar la existencia de ilita; y, en la de Zamora, corroborar o descartar la presencia de haloisita.

No siempre es fácil establecer una distinción entre haloisita y caolinita, especialmente en arcillas de suelos. Las mayores dificultades para identificar caolinitas de suelos se presentan por las analogías de máximos de difracción con la clorita y la haloisita, particularmente cuando ésta se asocia con la caolinita. Por lo cual se recurre a otras técnicas diagnósticas o tratamientos particulares de la fracción de arcilla de los suelos como puede ser el calentamiento y el análisis de rayos X, que nos indican los productos que se originan por calentamiento de la caolinita, donde a  $500^{\circ}\text{C}$  se deshidroxila y pierde su naturaleza cristalina. La ilita, en relación con el análisis por rayos X, es algo variable según las muestras, grado de hidratación y contenido de metales alcalinos; sin embargo no se altera por calentamiento (Cordero, 1997).

Por otra parte, la distinción entre haloisita y metahaloisita por medio de difracción de rayos X no es sencilla (Adolfo Cordero, Instituto de Física de la UNAM, 2003, comunicación personal).

#### 5.3.3.3 Expansión unidimensional de pastillas comprimidas estáticamente

Se comprimieron en un molde de acero muestras de bentonita cálcica, cuyo volumen inicial se determinó. Posteriormente se montaron en un embudo de Buechner y se sometieron a la influencia de un líquido de prueba. Transcurridos varios días, se volvió a medir las muestras para observar el cambio de volumen que pudieron haber experimentado por la hidratación.

#### 5.3.3.4 Pruebas de permeabilidad en embudos (influencia del catión)

Este tipo de ensayos propuestos tiene cierto parecido con las pruebas de pérdida de fluido (API 13-A) y la denominada como prueba de filtro de presión de carga superior (top loading filter press, TLFP), y en la que se reproduce mejor las condiciones de campo. Una ventaja sobre estas pruebas es la de aplicar vacío en la parte inferior de la muestra para incrementar el gradiente, en vez de presión de aire sobre su superficie, por lo que se reduce la cantidad de aire que entra en solución.

Con el objeto de determinar de manera más rápida y simple algunas diferencias del efecto del tipo de catión y su concentración en muestras de suelos compactados, se realizaron pruebas dentro de embudos Buckner con pastillas de 2 cm de espesor inicial y diámetros superior e inferior de 7.6 y 7.3 cm, respectivamente. El suelo fue compactado en un molde Próctor con una humedad igual a la óptima aumentada en dos unidades (lado húmedo) y luego se labró para que se ajustara con las dimensiones del embudo donde se realizó la prueba. Por la parte inferior de la muestra se colocó previamente un papel filtro y en la parte superior una capa de arena; el embudo se colocó sobre un matraz Kitasato donde es posible aplicar un vacío de 42.8 cm de Hg (- 0.58 kg/cm<sup>2</sup>), equivalente a la carga de una columna de agua de 5.8 m y un gradiente de 215; dicho vacío no actuó de manera continua por razones operativas. Durante una semana se llenó el matraz con agua destilada para producir la hidratación y expansión del suelo, lo que ayudó a que éste se ajustara a la pared del embudo. La muestra alcanzó un espesor aproximado de 2.7 cm. Posteriormente, se comenzó el tratamiento con las soluciones salinas a las que se les añadió el colorante azul brillante a razón de 2 g/L. La prueba se detenía al notar un evidente aumento en el flujo (falla) y la correspondiente aparición del colorante en el efluente, en cantidad suficiente para asegurar que quedara marcada la principal trayectoria de flujo. Se revisaron las siguientes tres condiciones: (1) inicialmente se realizó una prueba con NaCl y KCl 1 N sin ninguna novedad, por lo que la concentración se aumentó a 2 N; (2) posteriormente, se utilizó esta misma concentración añadiendo LiCl. Finalmente, esta prueba se repitió para una misma concentración de porcentaje de peso seco (3). Cabe mencionar que en estos ensayos se tiene una mayor evaporación que en los permeámetros de acrílico y que sólo se puede medir el flujo al final de la prueba, por lo que exclusivamente se utilizaron para observar evidencia de variaciones en función de la sal, concentración y tiempo.

#### 5.3.3.5 Capacidad de expansión libre y prueba de volumen de sedimentación (Koerner *et al*, 1995)

La primer prueba consiste en colocar 2 g de bentonita seca en una probeta con 100 mL de agua destilada. Después de algunas horas, en una bentonita cálcica, y de 48 h o más en el caso de bentonita sódica y bentonitas activas, el proceso de expansión es completado y el volumen se observa directamente. Las bentonitas cálcicas tienen una capacidad de expansión de entre 5 y 7 mL; las bentonitas sódicas, de 30 mL o más.

El método de Hoffman para determinar el volumen de sedimentación es una forma muy sencilla de establecer el grado de actividad, cualitativamente, de bentonitas activadas. Se prepara una pasta con un gramo de arcilla pulverizada y 90 mL de agua destilada agitando durante varias horas hasta lograr una completa suspensión que se vacía en una probeta de 100 mL. Al agregar 10 mL de NH<sub>4</sub>Cl 1 M la arcilla se flocula, y después de aproximadamente dos días el volumen de sedimentación estabilizado se puede leer en mL. Cuanto más se expande la arcilla y los finos se dispersan antes de la floculación, más grande será el volumen de sedimentación. Para evitar pérdidas de material al momento

del traspaso a la probeta, la pasta se preparó con 120 mL de agua y 1.33 g de arcilla, y de dicha mezcla se tomaron los respectivos 90 mL.

### 5.3.3.6 Cromatografía

La cromatografía ascendente en papel es un método fisicoquímico que consiste en la separación de las sustancias o componentes de una mezcla por migración diferencial sobre la superficie del papel filtro, tratado con un disolvente que determina la selectividad del sistema (Gombeer y D'Hoore, 1973; Domínguez, 1975). El papel utilizado fue de la marca Whatman, 4Chrom, tratado con una solución de azul de metileno ( $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$ ;  $PM = 373.9$ ) con metanol. Se pueden detectar concentraciones menores de 1 mg/L y la reacción de color del azul de metileno parece ser específica para arcillas cristalinas, distinguiéndose incluso entre arcillas expansibles y otras que no lo son.

La adsorción de azul de metileno y el cambio de color parecen ser suficientemente específicos y sensitivos para arcillas coloidales, especialmente cuando se utiliza papel de cromatografía como medio de soporte. De esta manera se pueden detectar pequeñas cantidades de arcilla en soluciones de suelo transportadas, así como evaluar la estabilidad coloidal y movilidad de suspensiones muy diluidas. Se pueden observar notables diferencias en la movilidad de las arcillas en función del horizonte al que pertenecen. Los suelos salino-sódicos son los que dan los mayores valores, mientras que los aridisoles, molisoles y oxisoles presentan casi nula movilidad. Los alfisoles y ultisoles dan resultados variables: en muchos casos la reducida movilidad de la arcilla puede estar correlacionada con un alto valor de aluminio intercambiable y bajo pH, tal como los horizontes argílicos de ultisoles, que no obstante su alto contenido de arcilla, demostraron ser moderadamente estables. La reacción de color del azul de metileno parece ser más bien específica para arcillas cristalinas: pruebas hechas con suspensiones de materia orgánica, alófanas, coprecipitados de sílice-sesquióxidos y soluciones acuosas conteniendo iones normalmente presentes en el suelo dieron resultados negativos. Se ha observado que la caolinita y la illita cuando se saturan con el catión azul de metileno, adquieren un tono azul, mientras que la montmorilonita presenta un color púrpura y un brillo casi metálico (Gombeer y D'Hoore, 1973).

Las partículas pueden entrar en la tira de papel solamente cuando la suspensión tiene cierto grado de estabilidad, el cual puede ser evaluado por comparación recíproca de tres zonas principales en las tiras:

La zona de concentración ( $C_z$ ), justo debajo de la altura de ascensión de equilibrio, donde sólo las sales solubles y coloides de alta movilidad (p.ej. materia orgánica) se pueden concentrar. La zona de transición ( $T_z$ ), donde la acumulación coloidal, que comúnmente desarrolla un patrón vetado, indica estabilidad intermedia. La zona de floculación ( $F_z$ ), justo arriba de la línea de inmersión, donde suspensiones inestables floculan con un patrón granular grueso.



El papel tratado con azul de metileno como medio de soporte junto con el principio de contracorriente ofrecen un posible método para estimar la movilidad electroforética de partículas arcillosas suspendidas. Los materiales caoliníticos generalmente dan los más bajos valores (Gombeer y D'Hoore, 1973).

Para identificar la presencia de arcillas cristalinas con carga negativa y evaluar su movilidad, con cada muestra se preparó una suspensión de suelo con agua destilada, en una concentración de 2 g/L, sometida a agitación durante 5 minutos y luego dejada en reposo durante cuatro horas, a partir de lo cual se desarrolló la prueba de ascensión capilar, para lo cual se dejan transcurrir de 3 a 4 h. Las muestras son colocadas en frascos en los que se sumergieron los extremos de las tiras verticalmente suspendidas y sujetas a evaporación libre. Se utilizó agua destilada como patrón de comparación, observándose que la tira sumergida en dicha agua no presentaba decoloración en su extremo inferior ni cambio de coloración en el frente de avance. Estas pruebas también se llevaron a cabo con suspensiones de muestras tratadas con salmueras.

#### 5.3.3.7 Patrón de agrietamiento

Se ha propuesto que los patrones de agrietamiento observados en respuesta a varias condiciones del fluido de poro se pueden explicar por medio de una extensión del modelo de Gouy-Chapman. Específicamente, la teoría de la doble capa podría ser aplicable para cuantificar el mecanismo de agrietamiento observado. En general, en una estructura de suelo progresivamente floculada la tendencia del cambio de volumen se distribuiría uniformemente en todas direcciones. Por tanto, las reducciones tenderían a atraer las partículas en todos los planos al progresar el secado. Por consiguiente, es lógico que se desarrollen mayores esfuerzos y que su disipación a través del agrietamiento ocurra con mayor frecuencia en estructuras más floculadas (Alther *et al*, 1985).

En un material homogéneo, al aumentar la evaporación la tensión capilar en el agua aumenta, que a su vez transmite una compresión al suelo el cual se va comprimiendo uniformemente hasta que se presente alguna heterogeneidad, ya sea de relación de vacíos, de composición, etc. (Jesús Alberro, Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2003, comunicación personal). Considerando lo anterior, al secarse el material en los vidrios de reloj las grietas se deben a la heterogeneidad del material y de los esfuerzos que se producen entre distintas partes de la muestra, tanto por fuerzas de adherencia con el vidrio, como los que se derivan de la forma convexa del mismo. Según se desprende de lo observado por Alther *et al* (1985), el mayor agrietamiento en muestras tratadas con KCl quizás esté propiciado por un cambio en la estructura de la arcilla que favorece un proceso más intenso de secado.

Con 132.5 g de la muestra de suelo respectiva y 100 mL de agua destilada se formó un lodo después de 30 minutos de agitación aplicados por medio de un agitador magnético, permitiendo la completa hidratación de la muestra. Posteriormente, a esta mezcla se le agregó 125 mL del líquido de prueba: agua destilada, KCl 40% o KCl al 40% con aumento de temperatura hasta 50°C. Finalmente se depositó una capa de este material

tratado en un vidrio de reloj, permitiendo que se equilibre con los esfuerzos gravitacionales y se seque para desarrollar el patrón característico final.

Los cationes como el azul de metileno permanecen adsorbidos en los minerales de arcilla por intercambio catiónico, por lo que su adsorción depende de los cationes intercambiables del mineral de arcilla, del pH y de la concentración. Se propone realizar pruebas de patrones de agrietamiento con azul de metileno. Las pruebas con azul de metileno consistieron en preparar una suspensión arcilla-agua destilada en una concentración al 5%, en peso. Luego que la arcilla se hidrata, se toman 25 mL de dicha suspensión y se mezclan con un volumen similar de la solución de prueba. Finalmente, se toman 25 mL de esta mezcla y 25 mL de una solución de azul de metileno-metanol, y el lodo resultante se vacía en un vidrio de reloj y se deja secar al aire. Es necesario hallar un método analítico que permita detectar y demostrar la presencia del colorante orgánico adsorbido por la arcilla (por ejemplo, azul añil), pues tanto el análisis térmico diferencial como el de espectrografía de infrarrojo son incapaces de identificar el índigo. Una opción podría ser el azul de metileno.

#### 5.3.3.8 Variación de color

Con el fin de observar alguna diferencia en las muestras después del tratamiento con salmueras se comparó su color con el original, como se propone en el capítulo 2. La determinación del color se hizo sólo en seco y por medio de la edición 2000 de dichas cartas (Munsell, 2000).

Por medio de la tabla de colores de Munsell es posible señalar el color con mayor precisión. La notación de Munsell describe el color en términos de tinte, valor e intensidad, utilizando para ello distintas cartas que contienen símbolos cuyas respectivas componentes se ordenan siempre en la misma secuencia. Para la prueba de color se coloca una pequeña parte de suelo en una placa de porcelana con cavidades de depósito y se compara con el color más parecido de las cartas sobrepuestas, para lo cual se debe recibir luz de día por la espalda. El tinte más común en suelos de regiones templadas es 10YR. Los tintes 5R y 7.5R son utilizados en el caso de suelos tropicales; el suelo seco habitualmente es dos unidades superior en valor que el mismo suelo húmedo, pero por lo general el tinte permanece igual (Palmer y Troeh, 1989).

#### 5.3.3.9 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico

La determinación de la CIC se hizo mediante el método del halo (mh), propuesto por Kahr y Madsen (1995). En general, se seleccionaron muestras tratadas en los permeámetros y se compararon los resultados con los obtenidos en la tabla 5.1.5, correspondientes a los especímenes originales.

#### 5.3.3.10 Análisis en el MEB del Laboratorio Central de Microscopia del IFUNAM

En el microscopio de barrido electrones secundarios son emitidos de la muestra en lo que parecen imágenes tridimensionales. Los equipos tienen intervalos de amplificación de X20 a X150 000 y una profundidad de campo 300 veces mayor que el microscopio de luz. Estas características, junto con el hecho de que las propias partículas así como superficies de fracturas a través de masas de suelo se pueden observar directamente han conducido al extendido empleo del MEB para el estudio de las arcillas (Mitchell, 1993).

Con el objeto de detectar diferencias de estructura en tres muestras de Zamora secas al aire, correspondientes a su estado original y a las tratadas en los permeámetros con KCl al 40% y NaCl al 35%, se efectuaron los análisis correspondientes en un microscopio de barrido marca Jeol JSM 5600 LV, de alto y bajo vacío (Operador: M. en C. Carlos Magaña). Las condiciones de operación consistieron en un voltaje de aceleración de 20 kV y una distancia de trabajo de 20 mm. Las imágenes se obtuvieron a partir de electrones secundarios, así como retrodispersados, y el análisis elemental se hizo con una sonda EDS, marca Noran Instruments. Estos estudios continuaron con las demás muestras con el fin de identificar minerales arcillosos y compararlos con los resultados anteriores de difracción de rayos X, así como para cuantificar la cantidad de sales, así como de cationes y aniones, se adsorbieron en la partícula (gránulo y capa compensadora, conforme a la fig. 3.5). Ya que algunas muestras no se podían apreciar debido a las condiciones de bajo vacío, con el fin de una identificación más precisa de la forma de las partículas se recurrió a recubrir las muestras con oro y observarlas, tanto en el equipo anterior, como en otro Microscopio Electrónico de Barrido, marca JEOL, modelo JSM 5200, de 25 kV, con el cual se logran mayores amplificaciones (Operador: M. en C. Jacqueline Cañetas).

Para tratar de relacionar el efecto observado en el permeámetro, relativo a la muestra Caolinita, se repitieron sendas pruebas de permeabilidad, con NaCl y KCl, con gradientes de temperatura. La muestra con NaCl estuvo un largo periodo, con temperatura constante de 50°C y bajo gradiente hidráulico, al final del cual se observó un avance completo del colorante, mientras que en la muestra con KCl la prueba fue de corta duración, con aumento súbito de temperatura y aparición del inicio de una franja cercana a la resistencia. Las muestras observadas corresponden a estas pruebas.

También se comparan el arreglo y forma de partícula de una bentonita y una muestra superficial (0-60 cm) (pasada por malla 200), cercana al Caracol, en el exlago de Texcoco, México D.F. Las muestras están recubiertas con oro, y vistas en MEB Marca JEOL, Modelo JSM 5200, 25 kV.

Asimismo, se recurrió a otro microscopio, de fuerza atómica, marca Jeol, modelo JSPM-4210 (Operador: M. en C. Juan Gabriel Morales), el cual tiene la ventaja de poder observar aun con mayor detalle la estructura de las partículas, incluso sin aplicar vacío, esto es, en condiciones de humedad similares a las de la muestra compactada o como parte de un lodo, pero que para ello se requiere contar con una celda de fluidos especial.

#### *5.4 Resumen y conclusiones*

En este capítulo se describen todas las muestras con las que se realizaron pruebas de compatibilidad. Algunos datos se obtuvieron de las fuentes disponibles, pero la mayoría se determinaron experimentalmente por medio de diversas técnicas y pruebas fisicoquímicas. Esta caracterización puede ser muy útil en los análisis posteriores y deja ver que se cuenta con una variedad de tipo de suelos que puede permitir hacer un análisis comparativo más amplio. Entre las muestras se tienen suelos nativos, comerciales, con baja y alta capacidad de expansión, filosilicatos, silicatos fibrosos y amorfos, así como una mezcla con una zeolita. Estos materiales, presentan distintas composiciones, plasticidades, cualidades de estabilidad, capacidad de intercambio, contenidos de materiales cementantes, óxidos e hidróxidos y sales. Las muestras más analizadas fueron las que presentaron mayor capacidad de expansión, puesto que las pruebas de compatibilidad consideran como mayor evidencia la clara variación de volumen, fácilmente observable.

Asimismo, se hace una descripción de los líquidos de prueba empleados, y se especifican datos de concentraciones y equivalencias, así como de otras propiedades, como viscosidad y solubilidad. Esto con el fin de que, posteriormente, puedan hacerse las debidas consideraciones y comprobaciones de los análisis físicos y químicos.

Por otra parte, se desglosan todas las pruebas de compatibilidad que se llevaron a cabo, y que comprendieron principalmente pruebas de permeabilidad, pero que se complementaron con otros ensayos que abarcaron algunas técnicas ya establecidas, así como algunas modificaciones a éstas y nuevas propuestas. Estas pruebas adicionales van desde las muy simples y económicas, como la variación de color, hasta algunas técnicas de análisis modernas, como el microscopio electrónico de barrido y difracción de rayos X.

Las pruebas de permeabilidad se efectuaron principalmente en permeámetros de carga variable de pared rígida, con diámetro variable del tubo alimentador, por lo que, con base en la fórmula ya establecida, se propuso un algoritmo que considerara dicho cambio de sección. Se realizaron ciclos de carga y descarga hidráulica, química y térmica.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

"Hemos dejado atrás todo el ancho del mundo, salvo este vasto océano. Me sentiré feliz cuando tenga también a mi espalda los riesgos de su travesía"

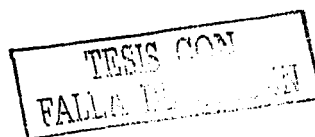
Amelia Earhart: 30-VI-1937

### 6.1 Pruebas de permeabilidad

#### 6.1.1 Gráficas de las pruebas de permeabilidad

Las gráficas de las pruebas de permeabilidad se presentan en las figuras 6.1.1 a 6.1.31. Los valores reportados en estas gráficas, así como el tiempo total de la duración de la prueba, se pueden consultar detalladamente en las tablas correspondientes ya que debido a la escala utilizada, por una parte es difícil apreciar algunos cambios, y por otra parte en algunos casos no se graficó el tiempo total de prueba. En cada figura se pueden observar simultáneamente dos gráficas: la superior corresponde a la permeabilidad y la inferior a la temperatura, pH y salinidad del efluente, ambas trazadas en función del tiempo de prueba transcurrido. En general, las pruebas comienzan con agua destilada, indicándose con flechas el momento en que se realizaron los cambios en el líquido de prueba, así como, en su caso, de aplicación de colorante. La línea de temperatura indica que la prueba está realizándose, por lo que la discontinuidad en la línea relativa a la permeabilidad indica que no se detectó flujo durante el periodo correspondiente. La discontinuidad en la línea relativa a la temperatura es señal de suspensión temporal de la prueba. En cada figura se indica el espesor final de la muestra ( $t_f$ ), así como el espesor inicial ( $t_i$ ), en caso de ser distinto de 5 cm. Para identificar a las muestras seleccionadas para análisis fisicoquímicos posteriores se utiliza la notación (\*) a la derecha de la respectiva figura.

En las últimas dos gráficas (figs. 6.1.32 y 6.1.33) se analiza el efecto de primera exposición y del catión, considerando también cambios de temperatura. Inicialmente se utilizó la misma baja concentración molar para ambas muestras, aproximadamente 0.85 M; se eligió comenzar con esta concentración para evitar que una contracción brusca por una excesiva cantidad de sal impidiera notar alguna diferencia en el transcurso de la prueba, y antes de poder efectuar alguna variación de concentración y temperatura.



PERMEABILIDAD

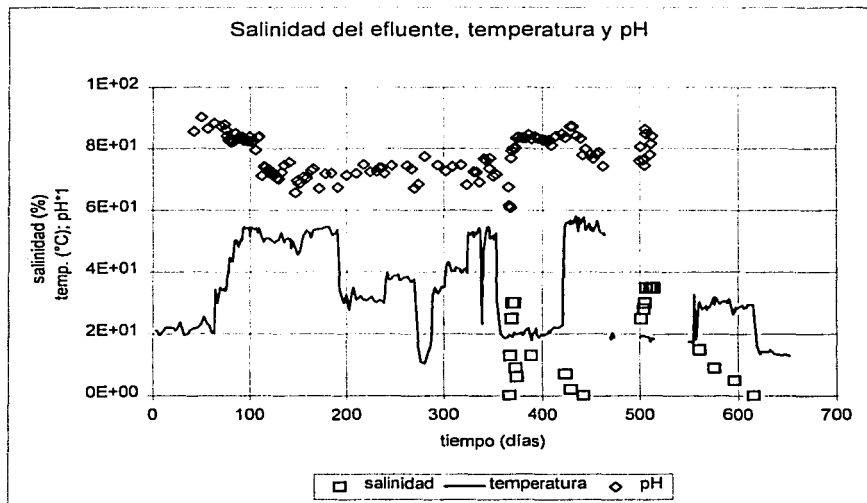
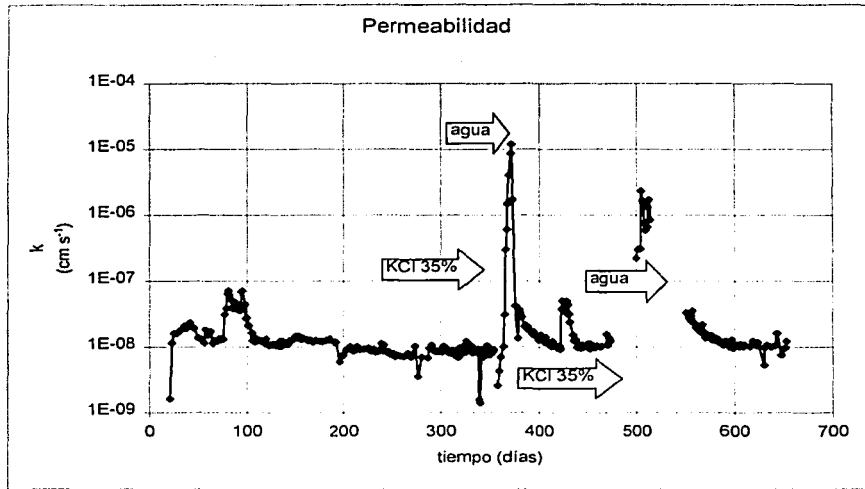


Fig. 6.1.1 (\*) Zamora 1.1.a ( $t_f = 6.2 \text{ cm}$ )

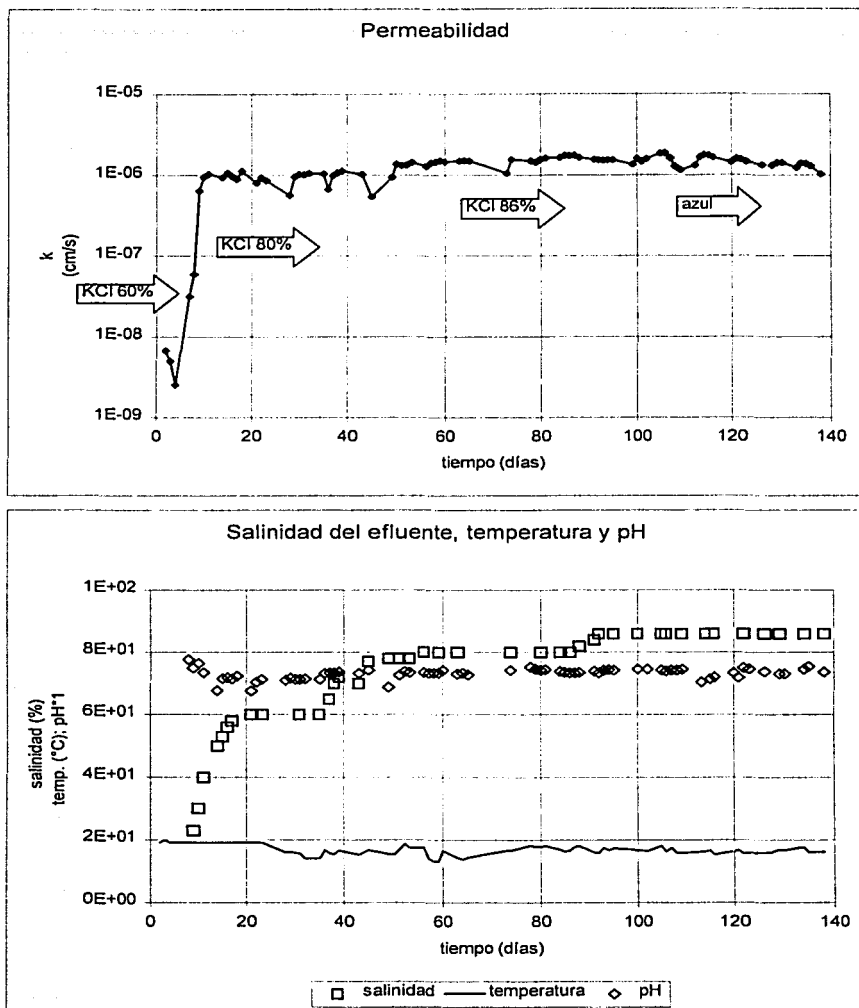
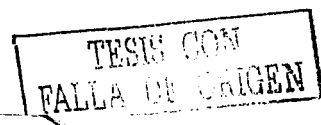


Fig. 6.1.2 Zamora 1.1.b (tf = 6)



TESIS CON  
FALTA DE OXIGEN

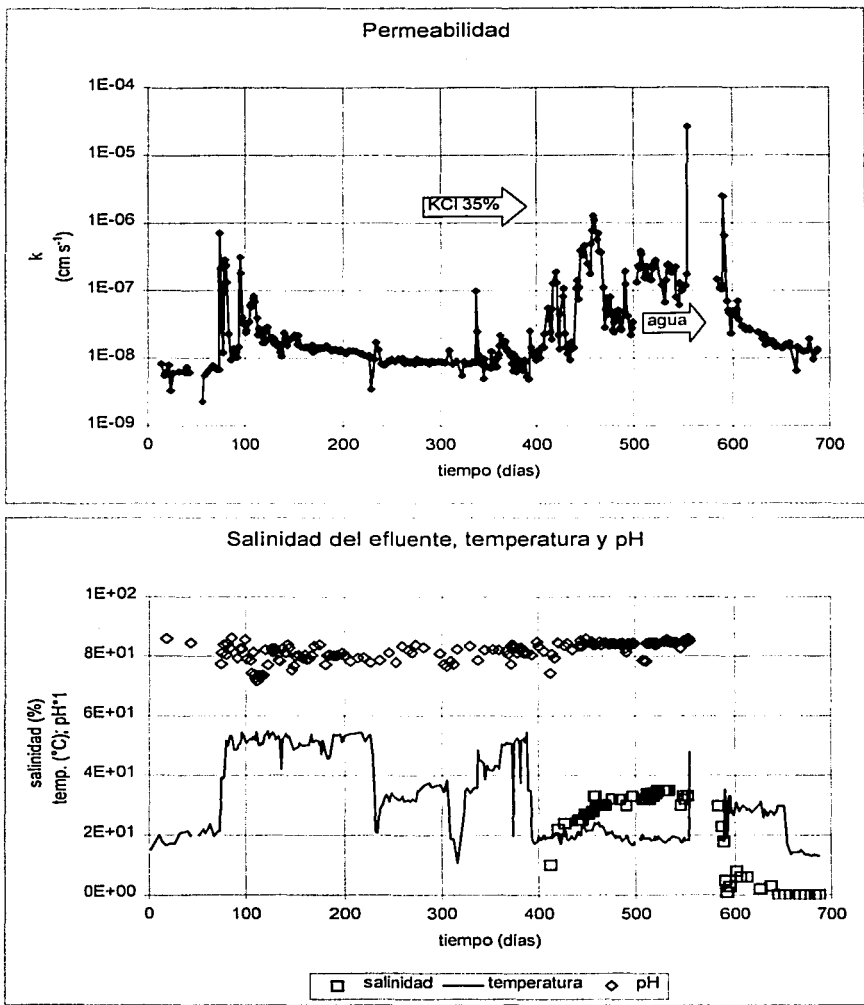


Fig. 6.1.3 (\*) Blanquizca 1.2.a



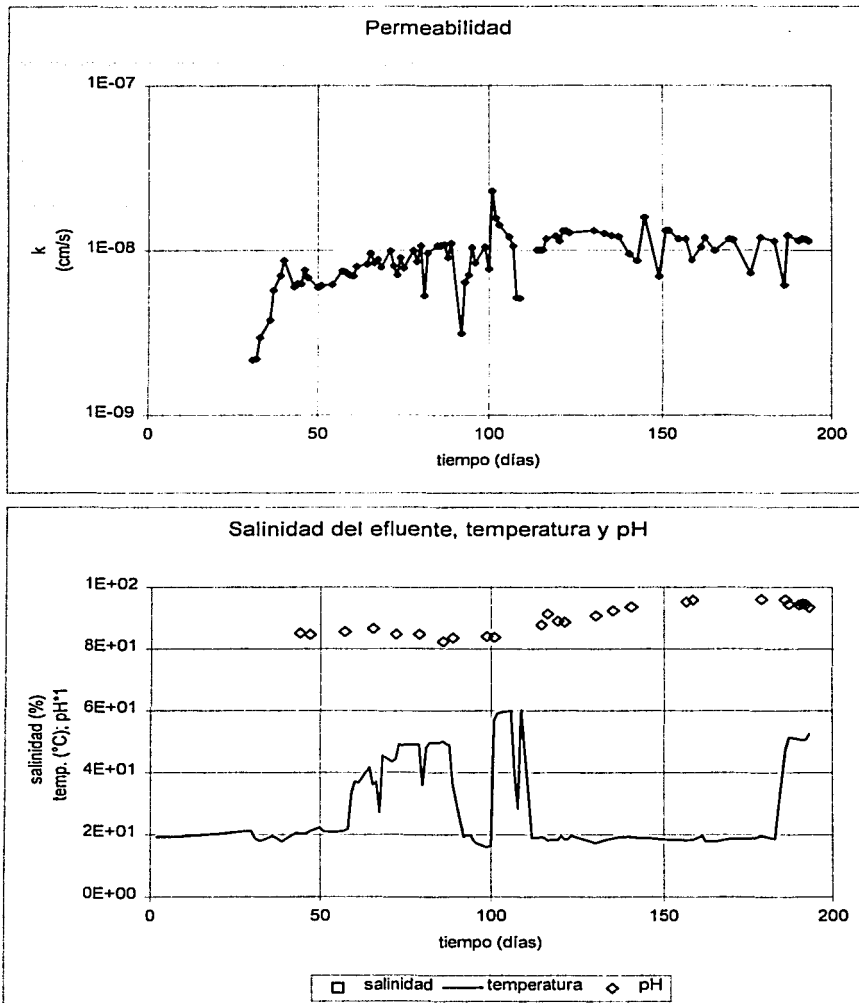


Fig. 6.1.4 Blanquiza – anillo de BNa 1.2.b

TESIS CON  
FALLA DE CUBIEN

TESIS CON  
PA. EN

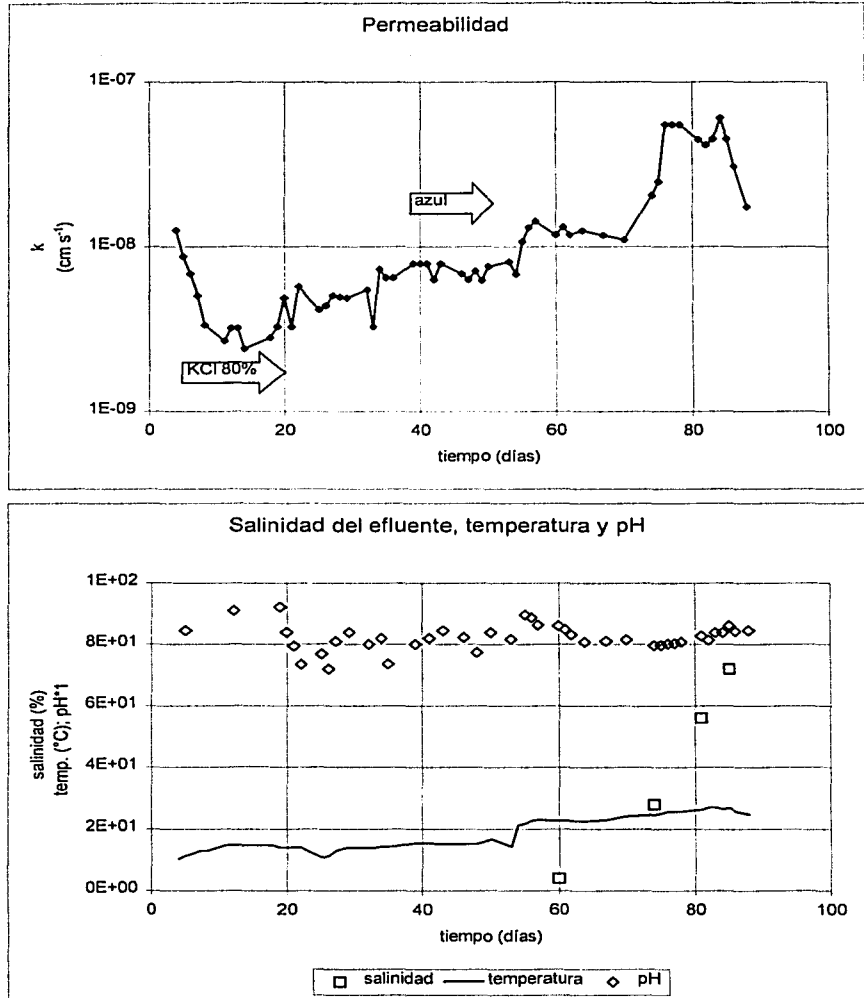


Fig. 6.1.5 Blanquiza 1.2.c

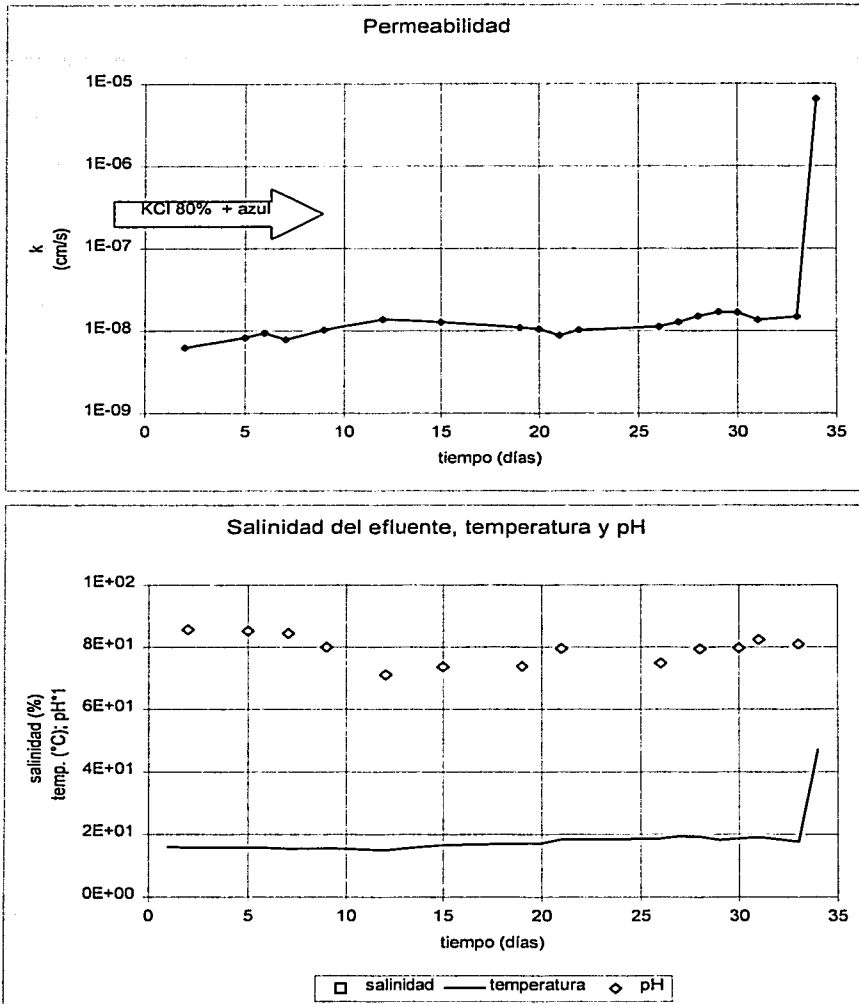


Fig. 6.1.6 *Blanquizca 1.2.d*

TESIS CON  
 FALLA DE CENSURA

TESIS CON  
FACULTAD DE INGENIERIA

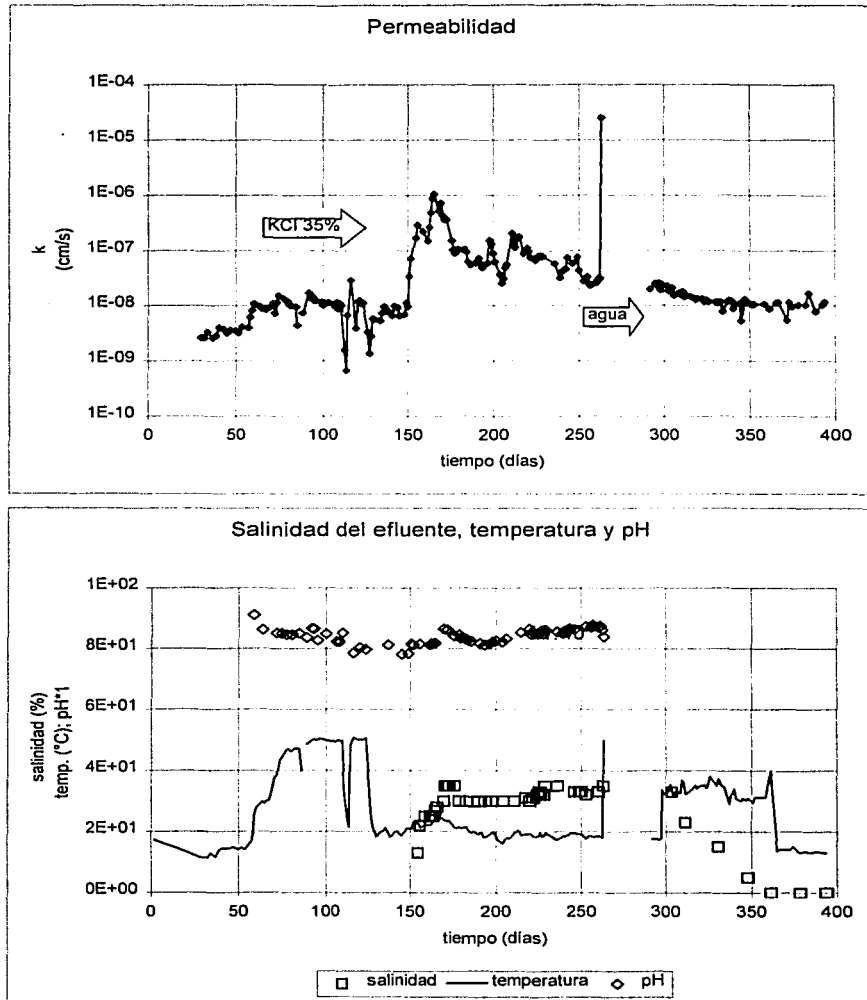


Fig. 6.1.7 (\*) *Café 1.3*

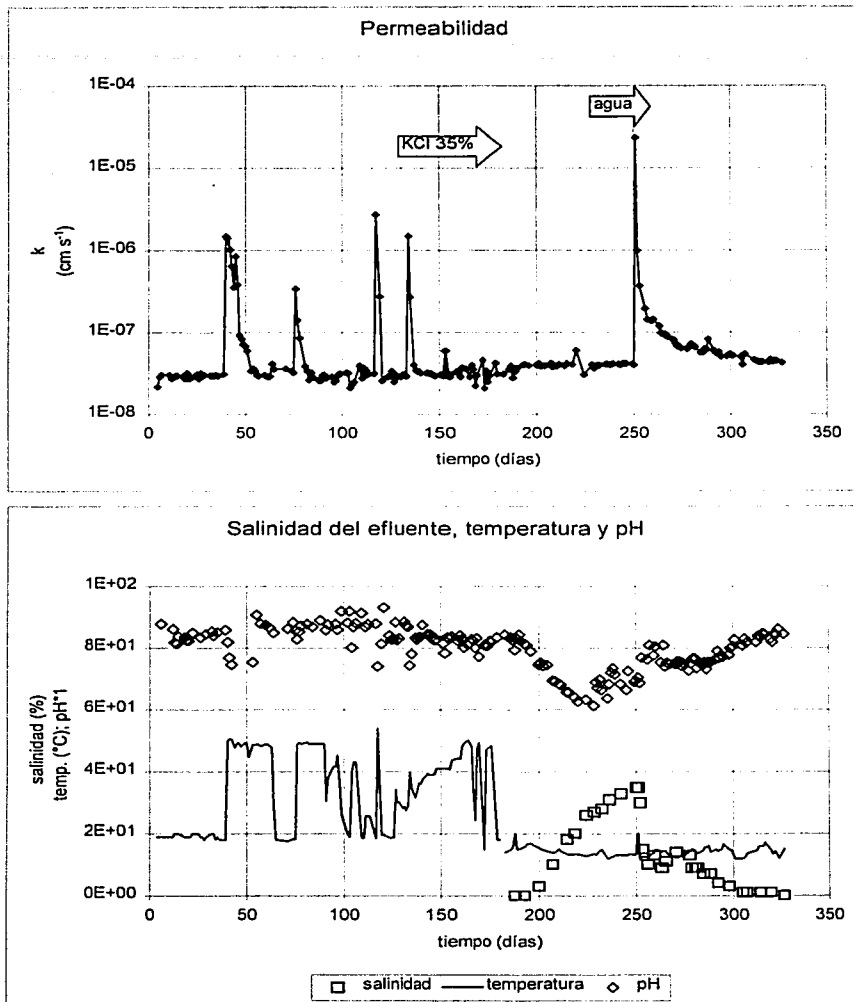


Fig. 6.1.8 Morelos 1.4.a

TESIS CON  
FALLA DE CUBIEN

TESIS CON  
... GEN

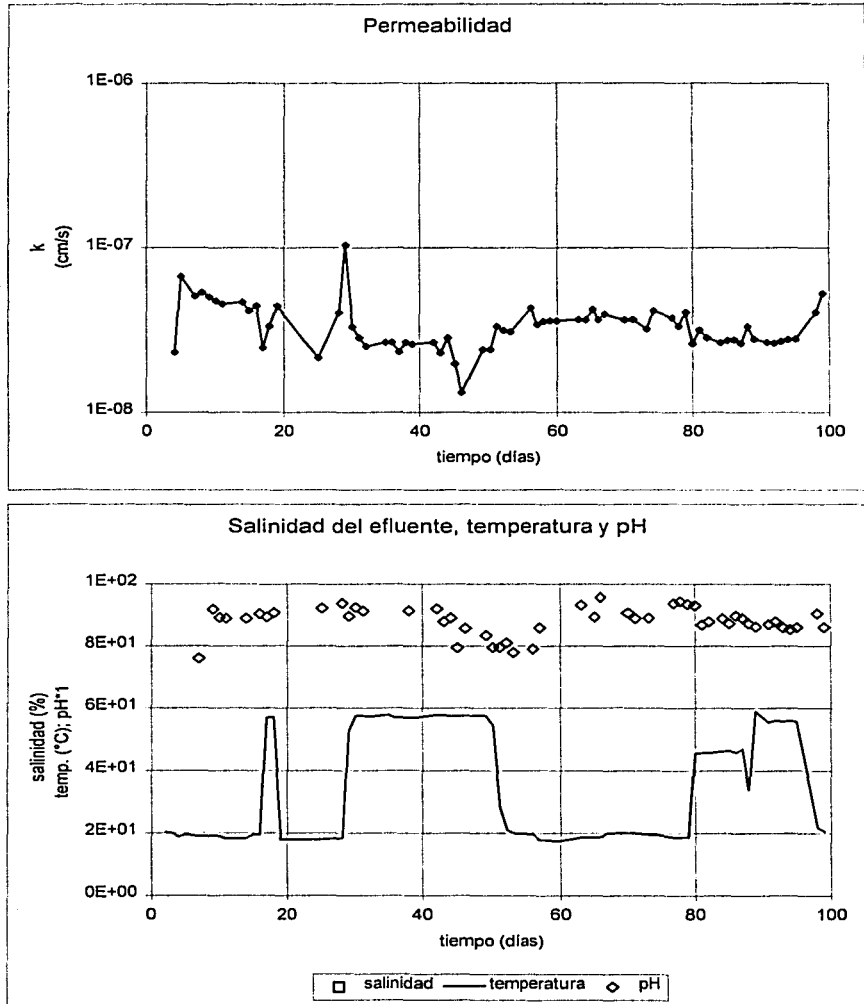


Fig. 6.1.9 Morelos - anillo de BNa 1.4.b

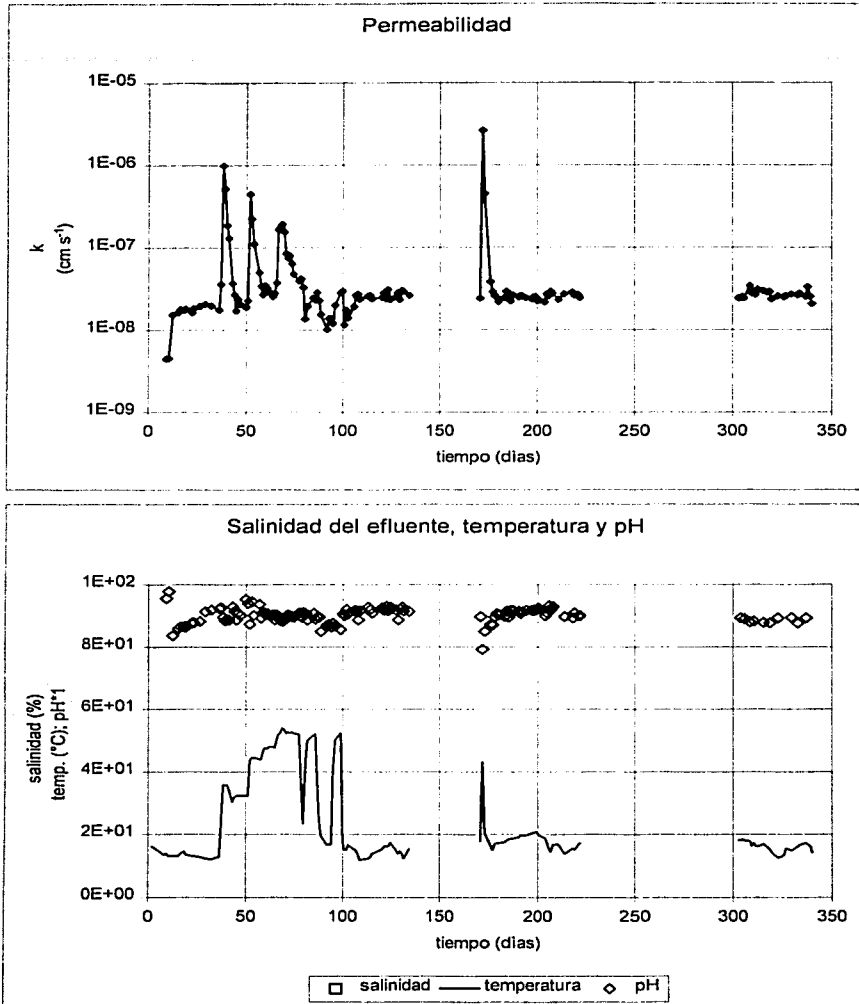


Fig. 6.1.10 Morelos 1.4.c ( $t = 10$  cm)



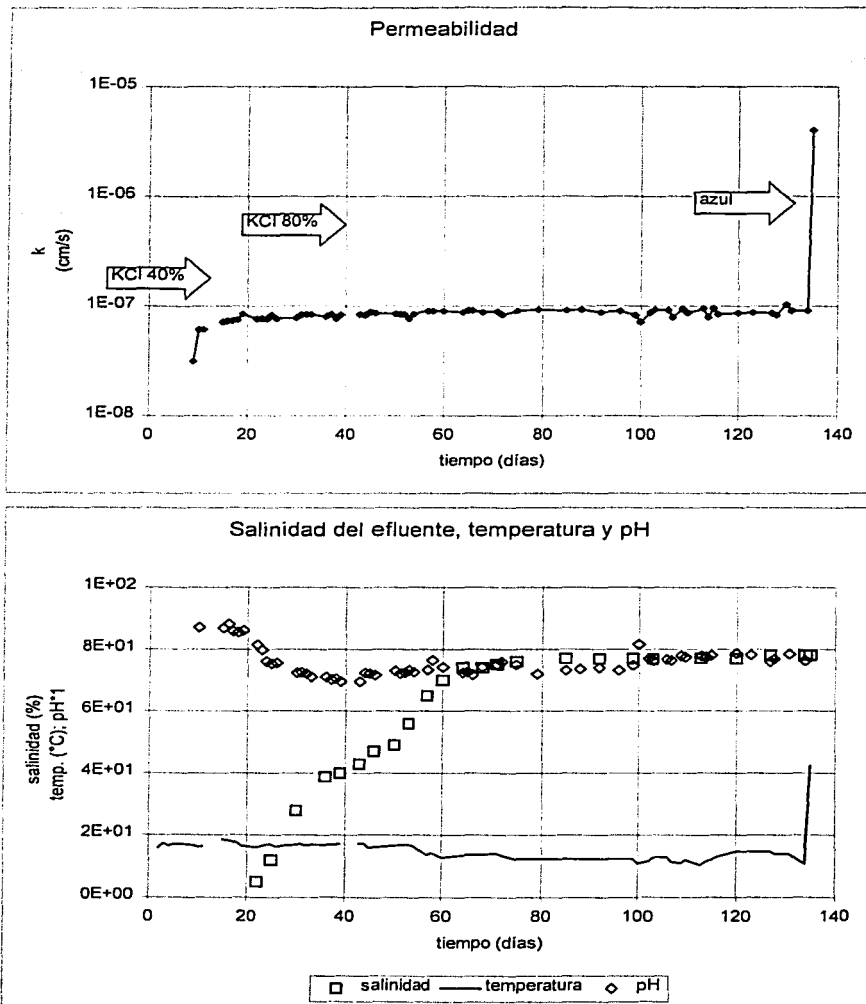


Fig. 6.1.11 Morelos 1.4.d



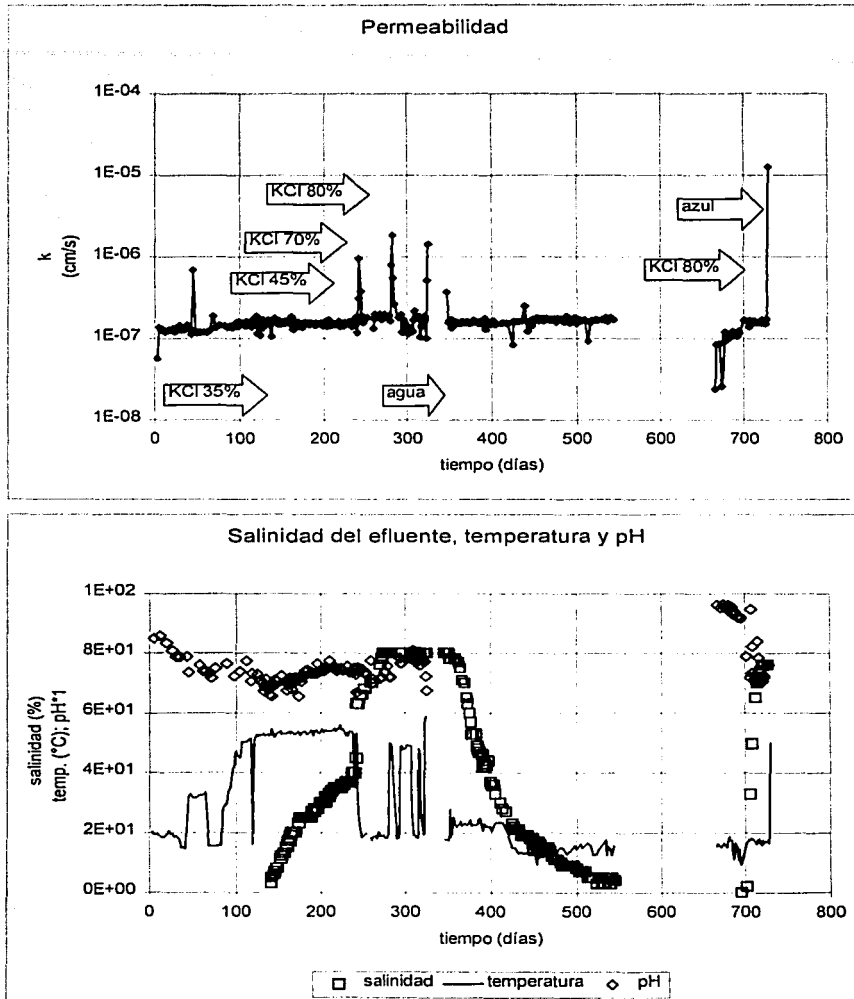
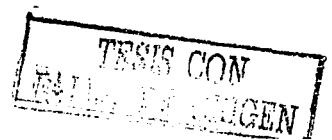


Fig. 6.1.12 (\*) *Caolinita 2.1.a*



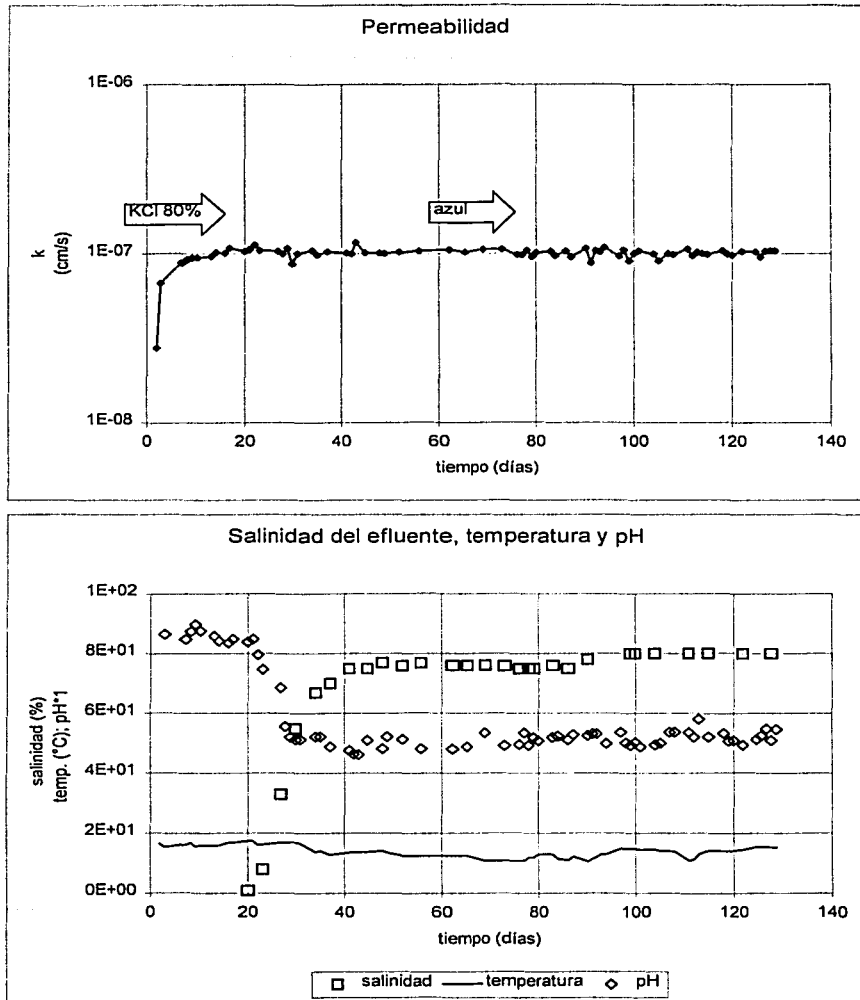


Fig. 6.1.13 Caolinita 2.1.b

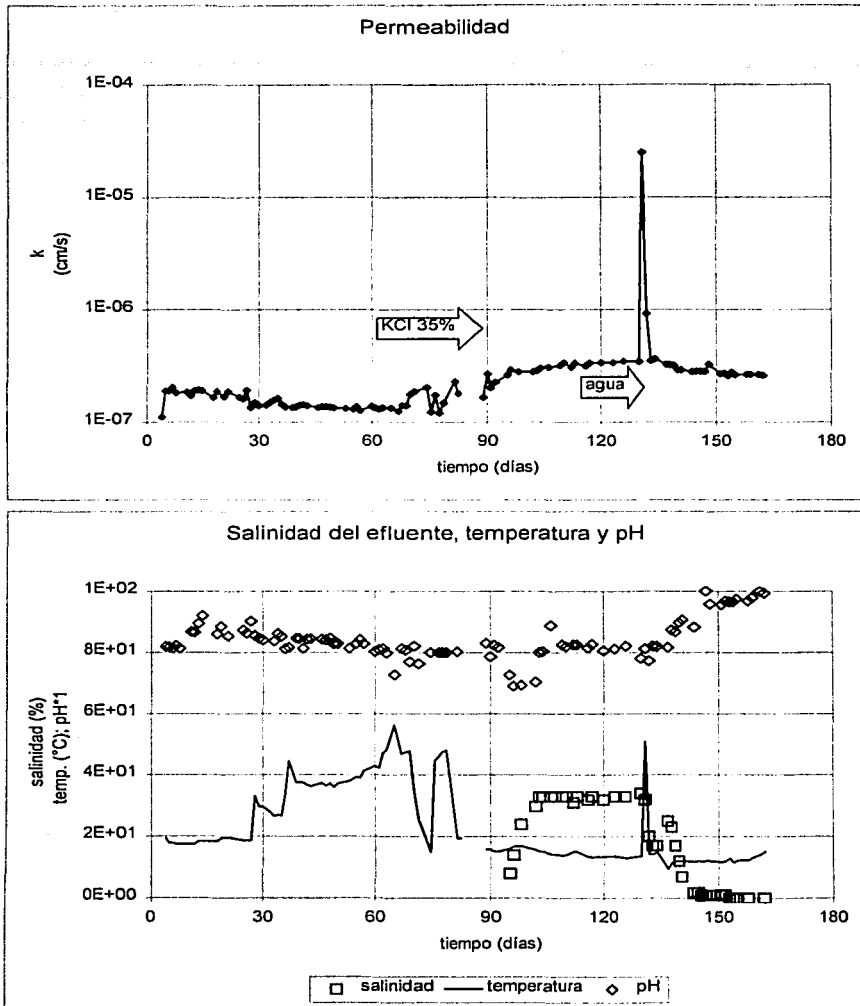


Fig. 6.1.14 (\*) Haloisita 2.2.a

TESIS CON  
FALLA DE CALIFICACION

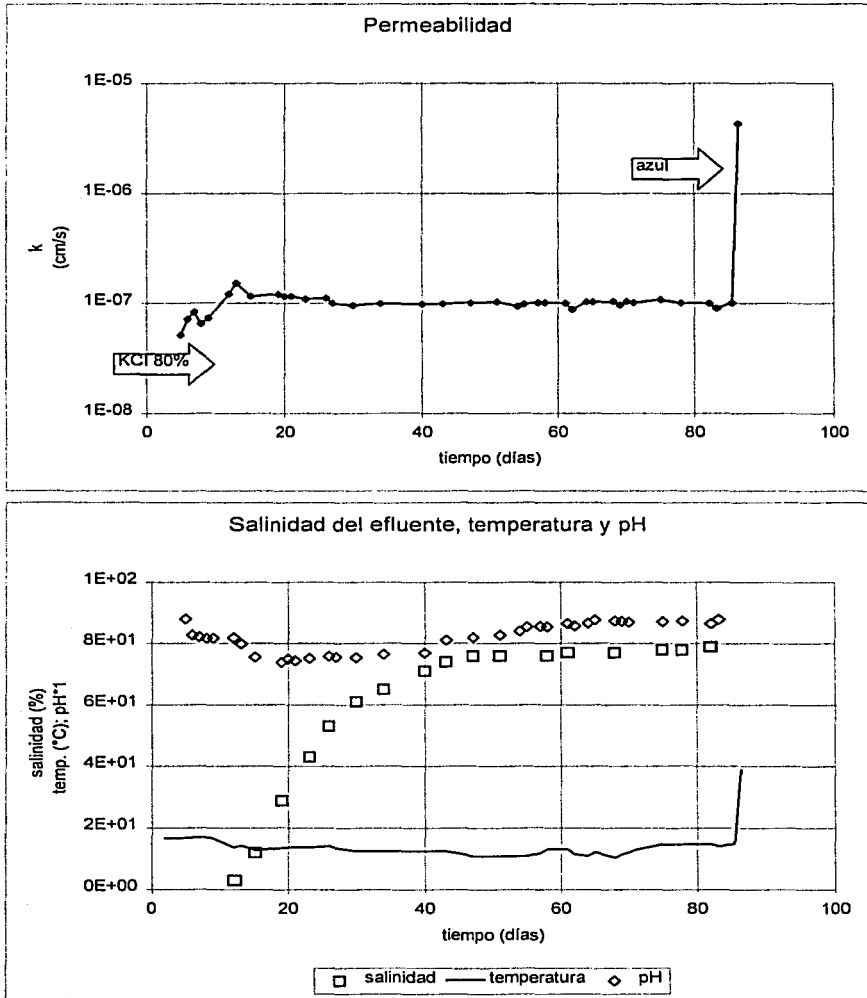


Fig. 6.1.15 Halosita 2.2.b

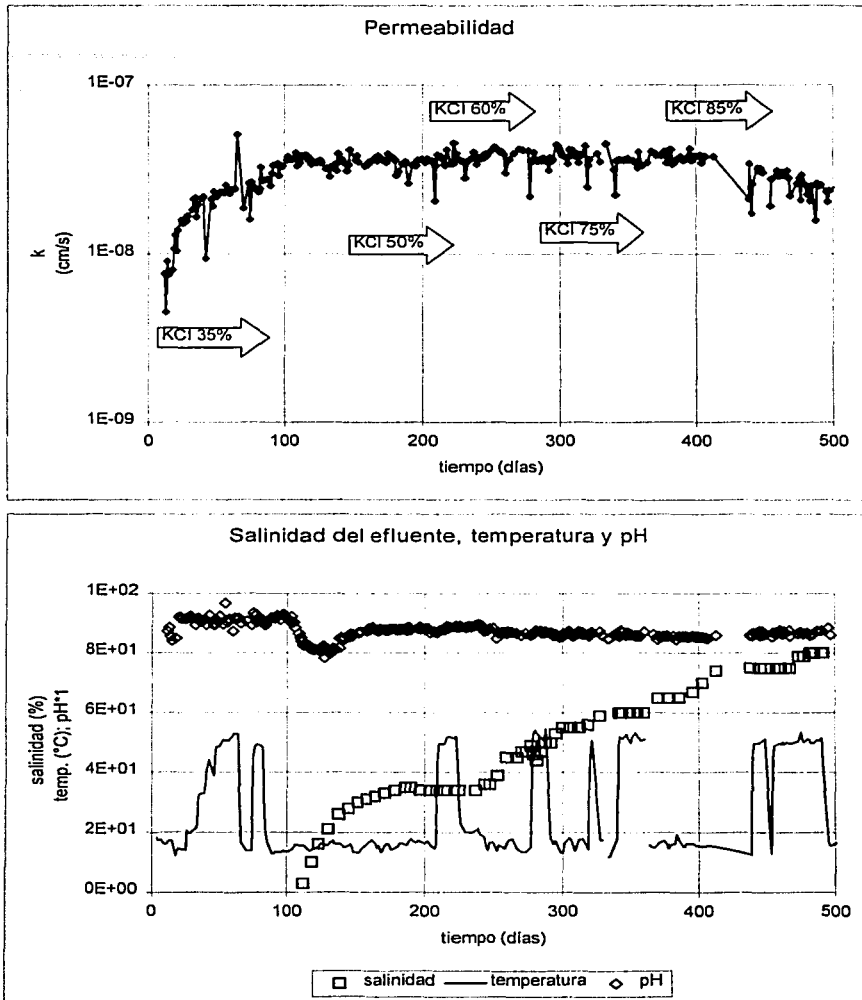


Fig. 6.1.16 (\*) *Atapulgita 2.3.a*

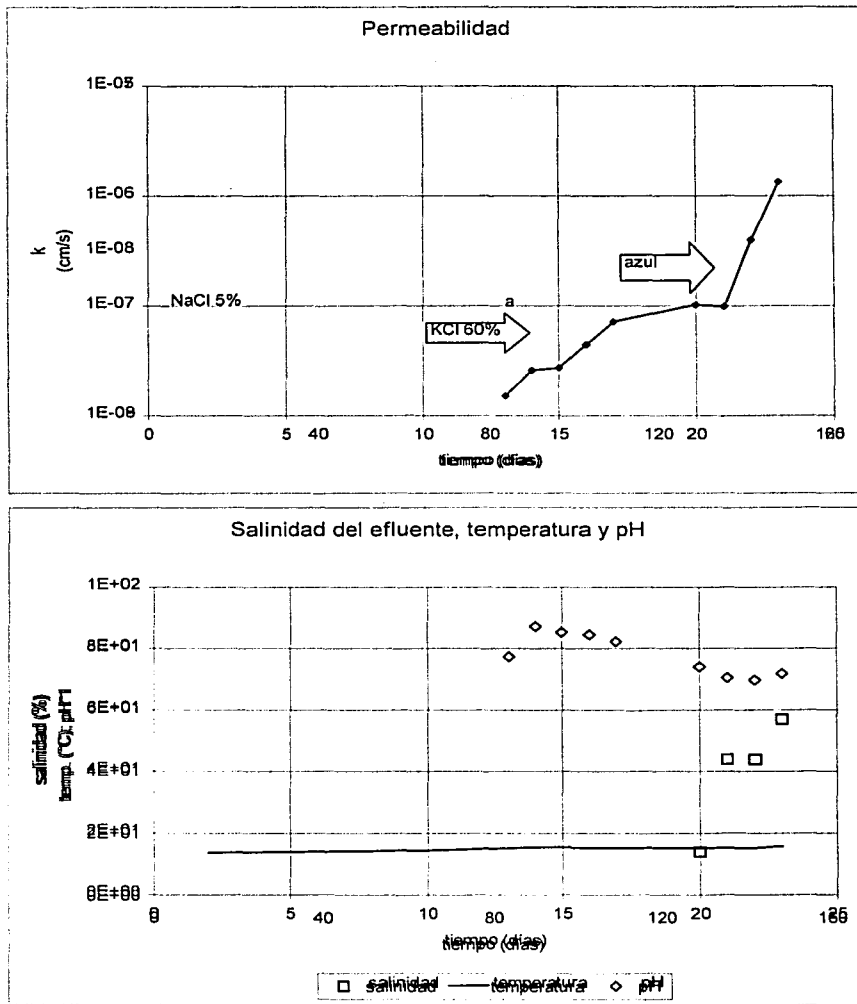


Fig. 6.1.17 (\*) BCa-1 3.1.a (tf = 6 cm)

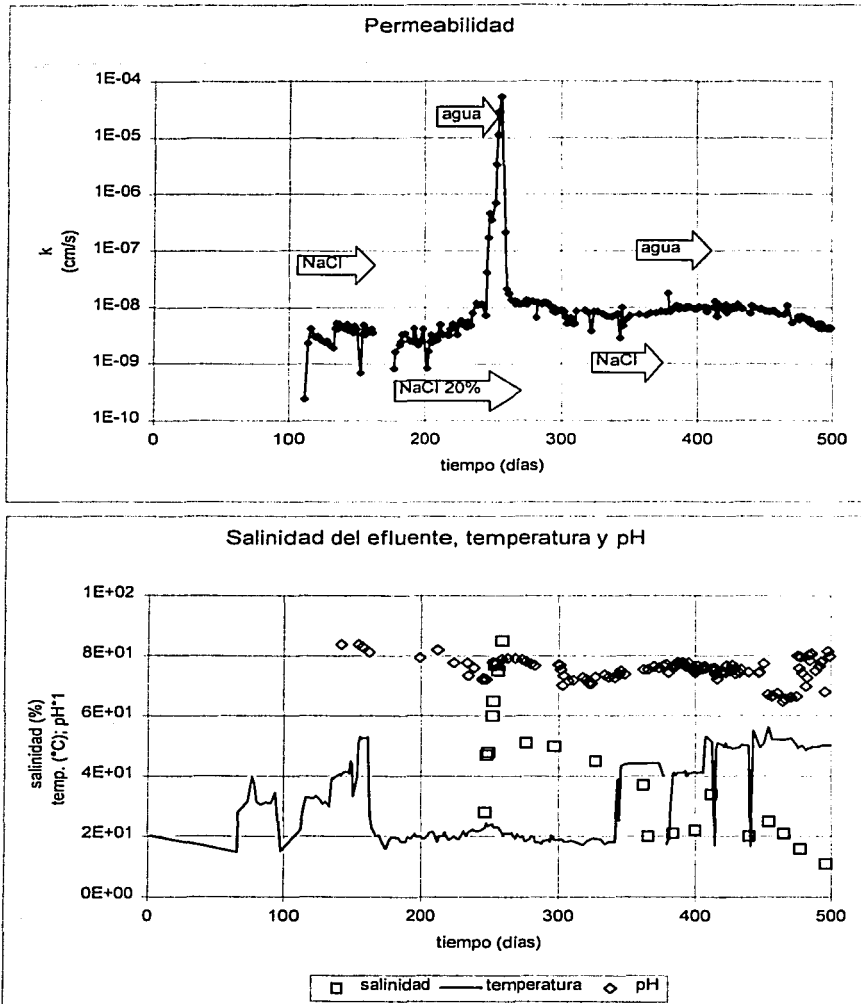
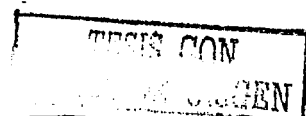


Fig. 6.1.18 (\*) BCa-1 3.1.b ( $t_f = 6$  cm)



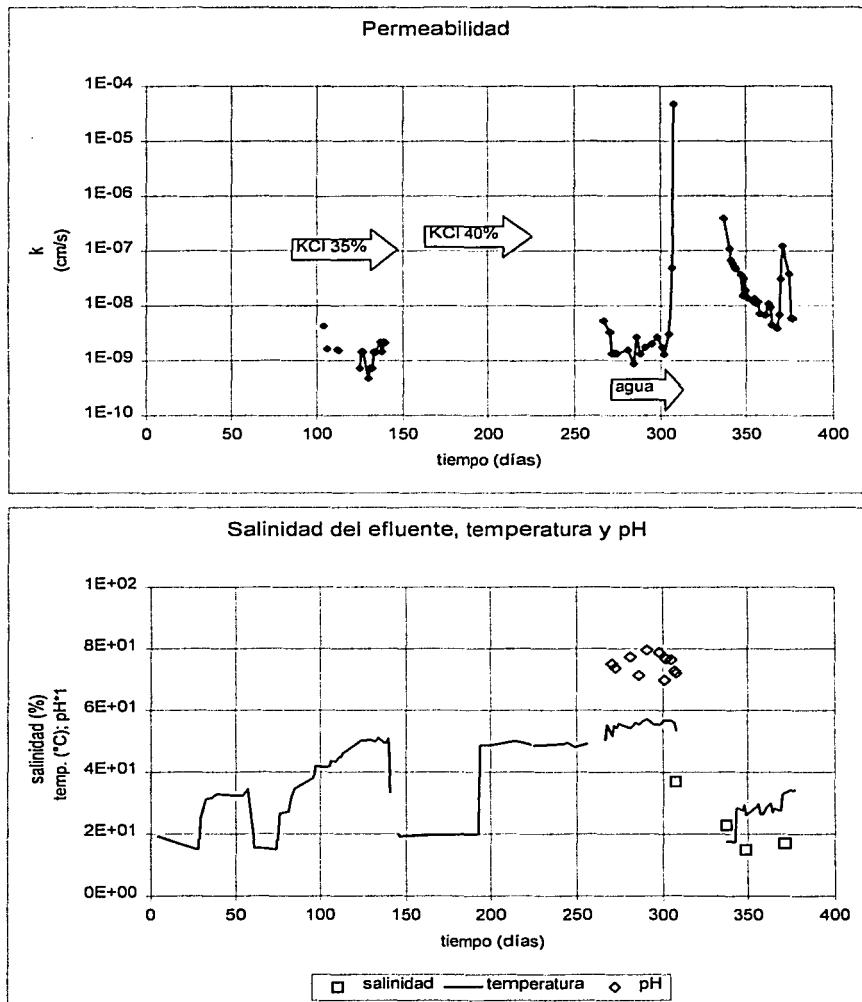


Fig. 6.1.19 (\*) BCa-1 3.1.c ( $t_i = 10$  cm;  $t_f = 11$  cm)



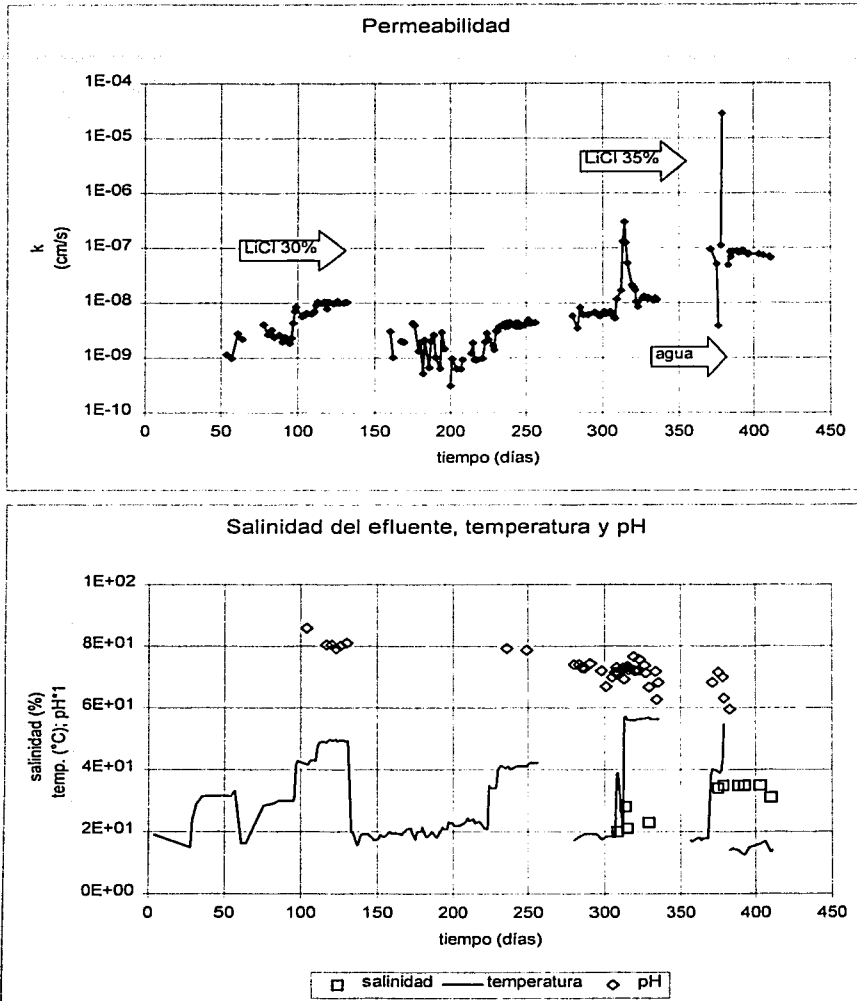


Fig. 6.1.20 (\*) BCa-1 3.1.d ( $t_f = 7.5$  cm)

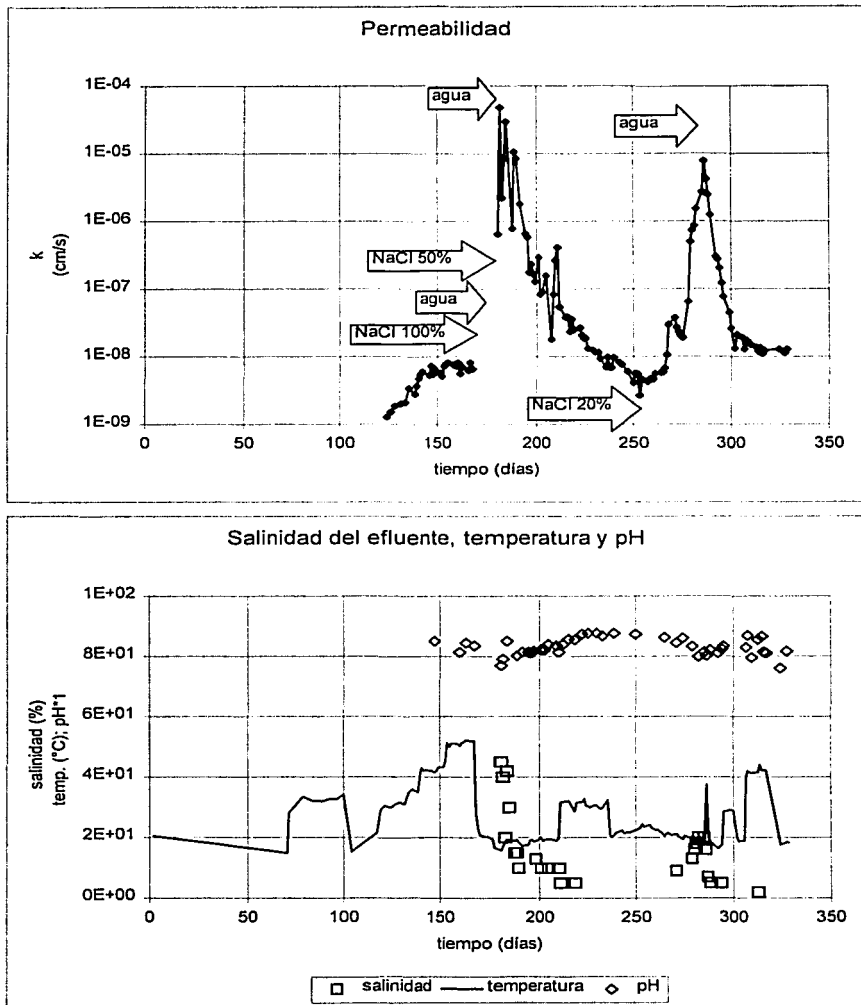


Fig. 6.1.21 BNa 3.2.a. ( $t_f = 7.5$  cm)

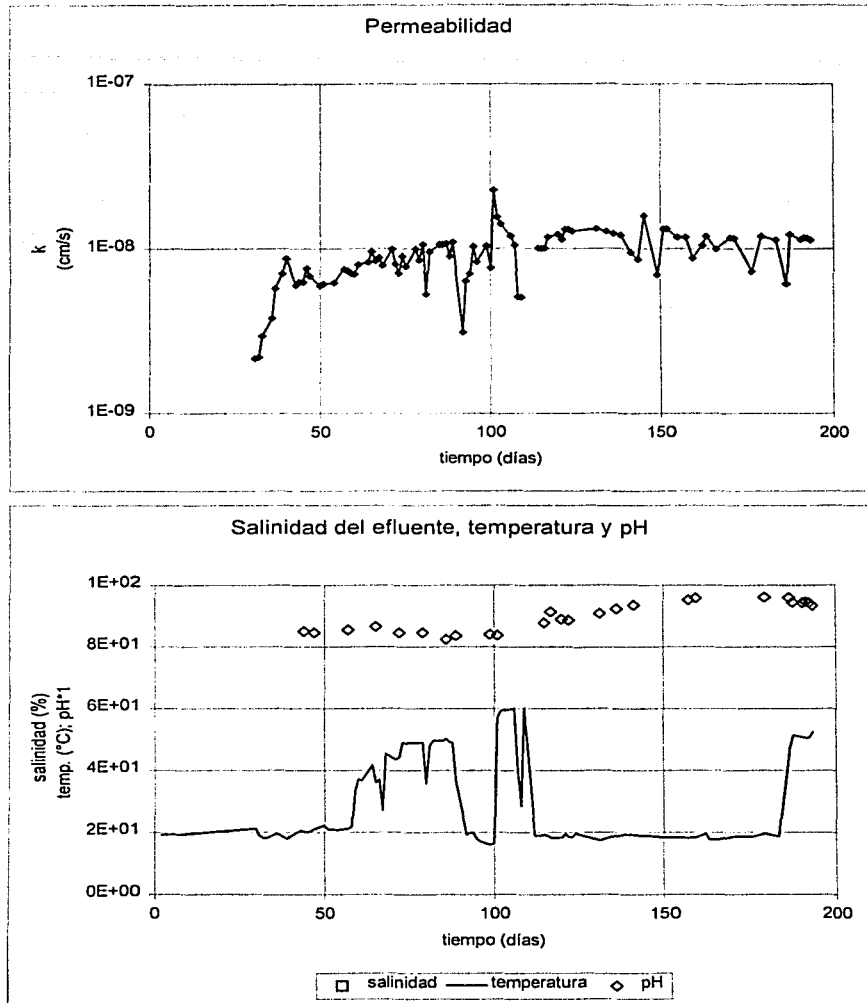


Fig. 6.1.22 BNa - Geotextil 3.2.c ( $t_f = 3.2$  cm)

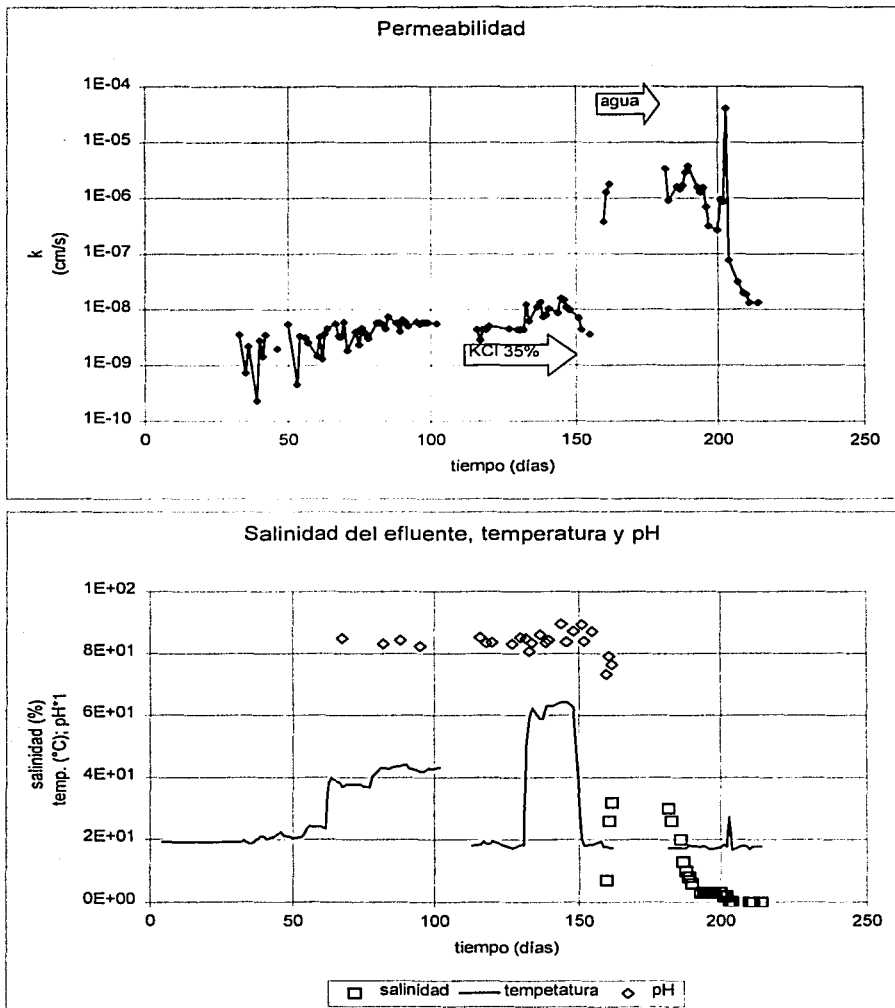


Fig. 6.1.23 (\*) Zeolita BNa 3.3.a ( $t_f = 5$  cm)

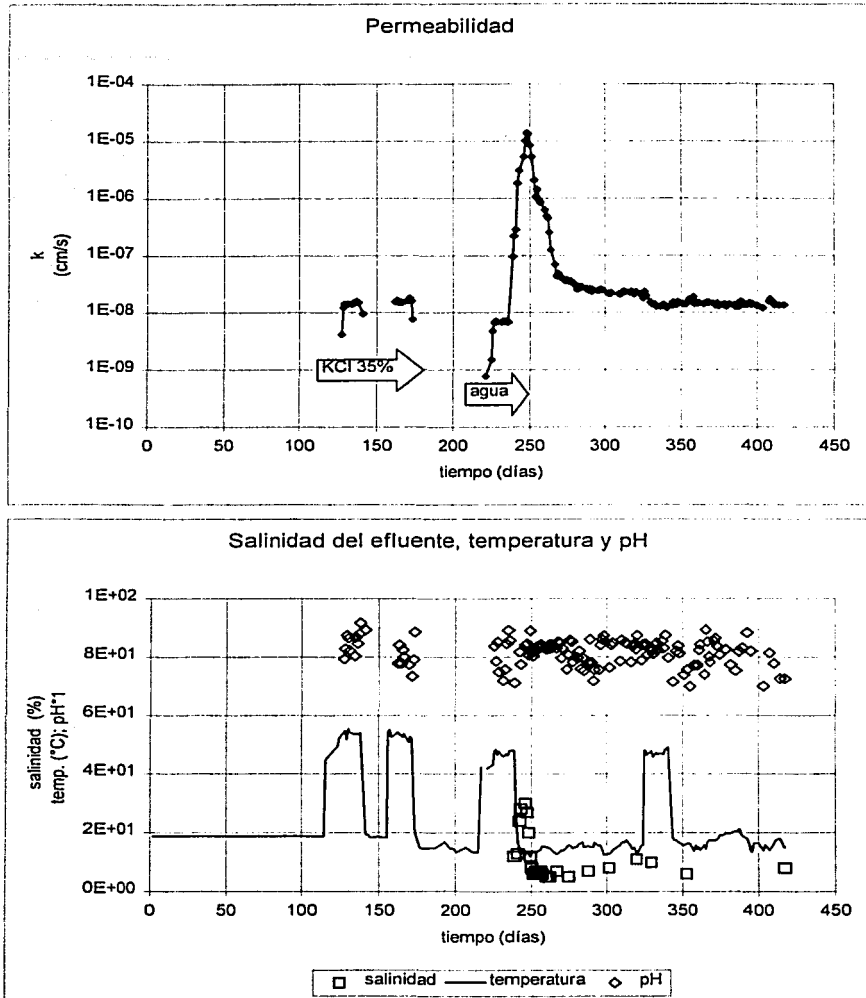


Fig. 6.1.24 (\*) Volclay CS 50 3.4.a ( $t_f = 10$  cm)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

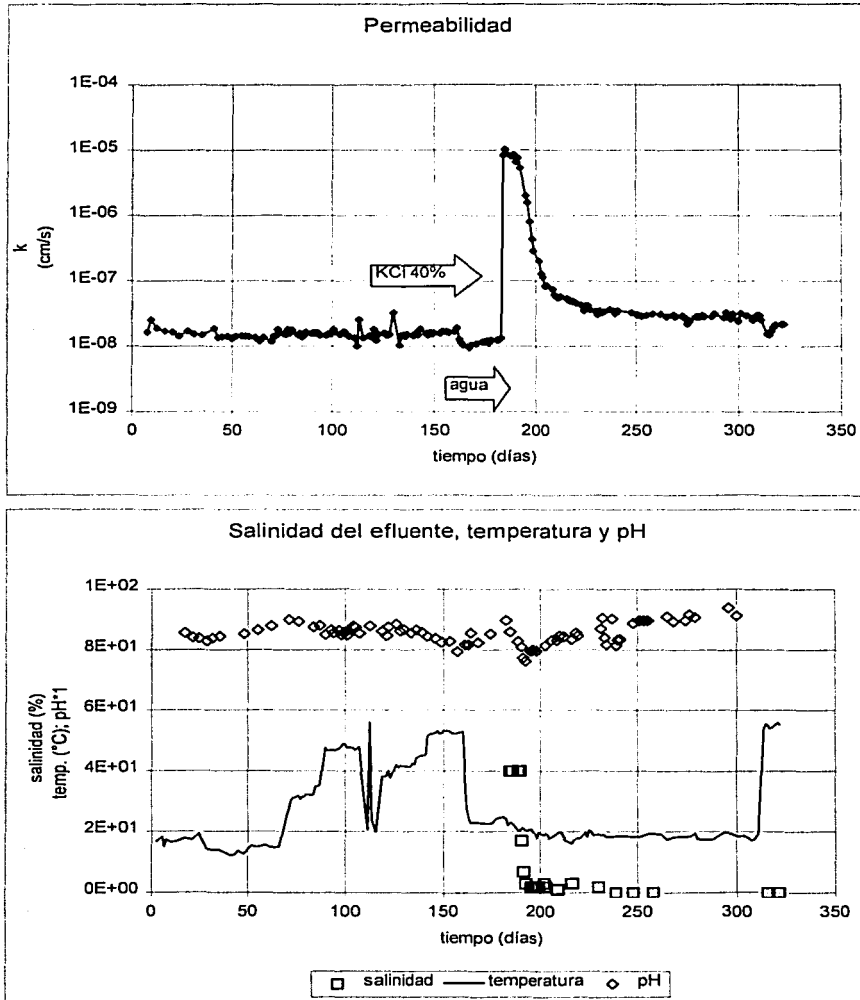


Fig. 6.1.25 Geotextil - Volclay 3.4.b ( $t_f = 5$  cm)

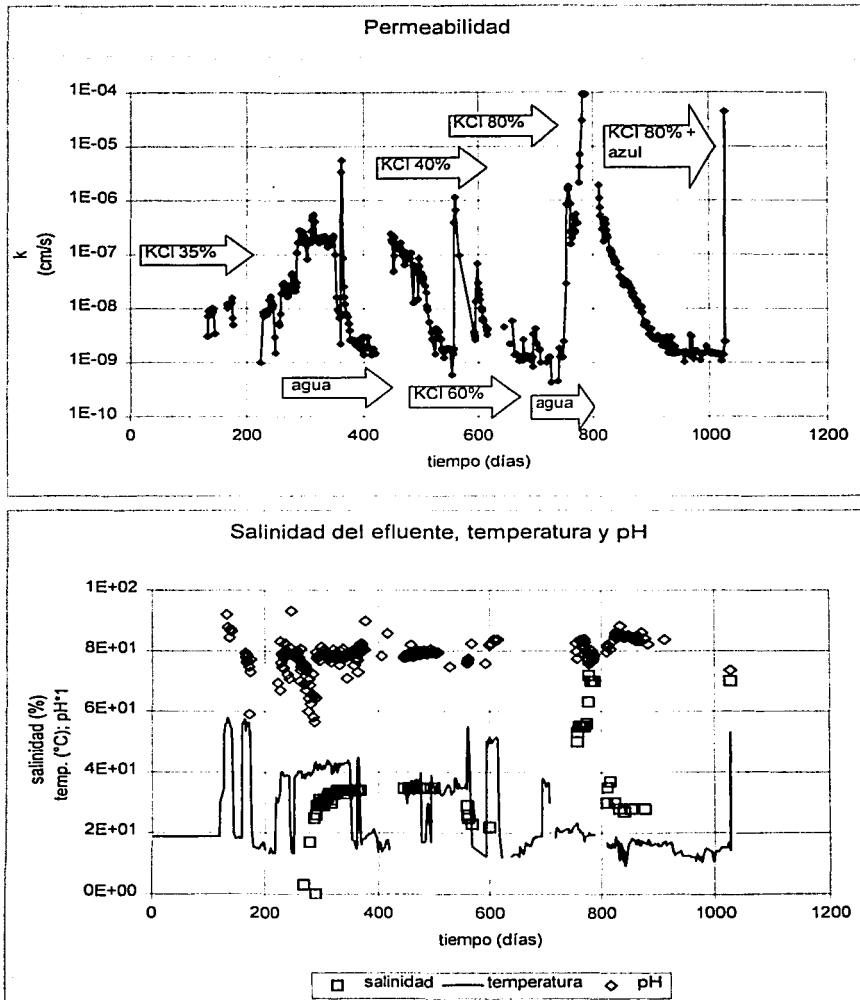


Fig. 6.1.26 (\*) Volclay CRC powder 3.5.a ( $t_f = 10$  cm)

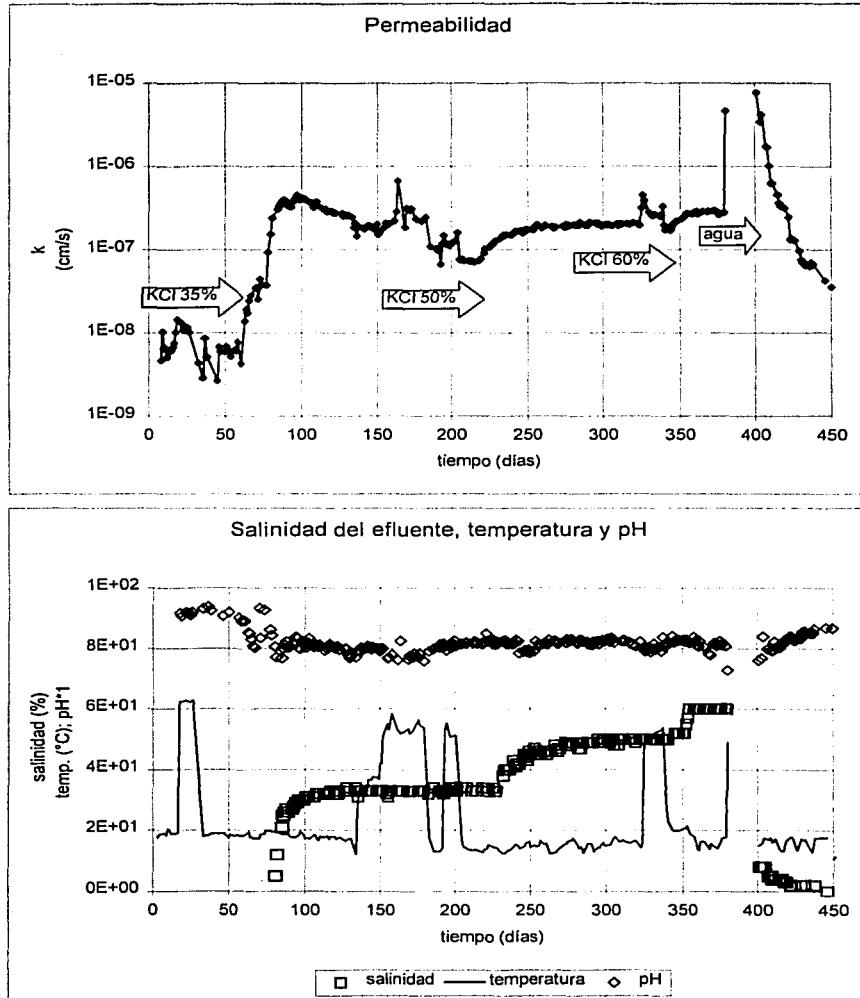


Fig. 6.1.27 Geotextil-Volclay CRC 3.5.b ( $t_f = 6$  cm)



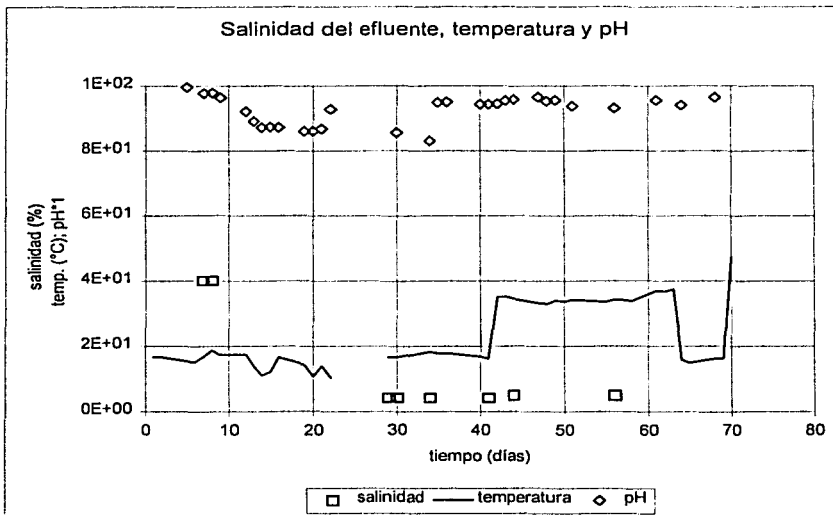
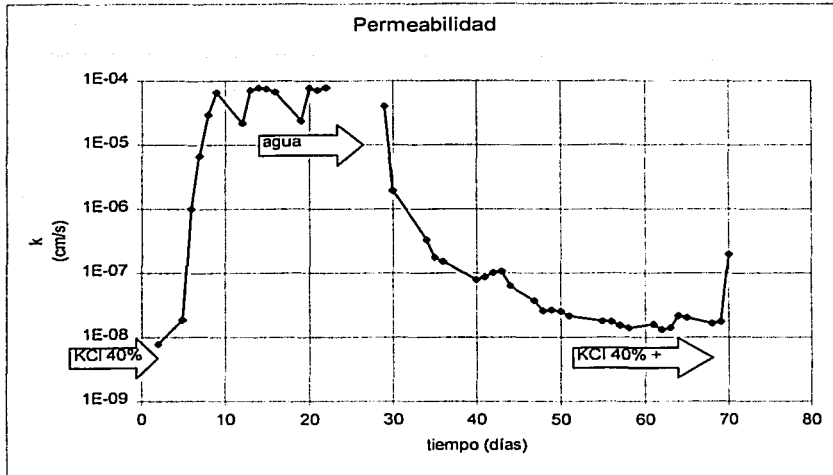


Fig. 6.1.28 BCa-2 ( $t_f = 6.5$  cm)

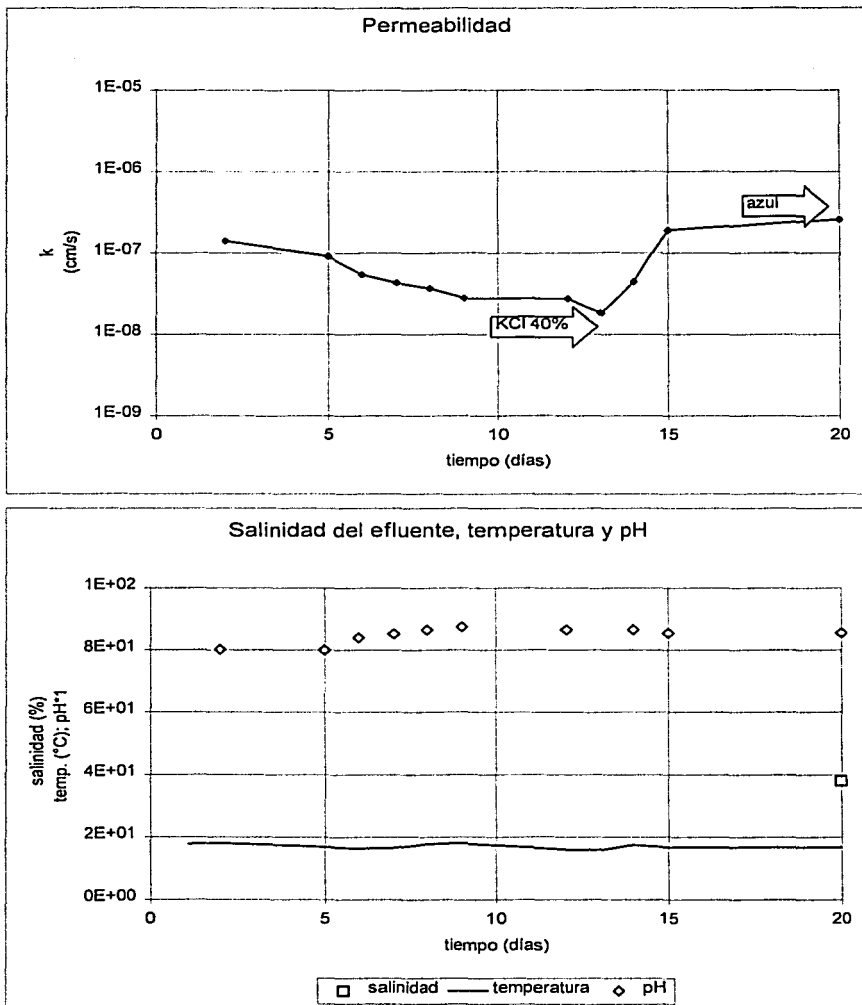


Fig. 6.1.29 Bca-3 3.7.a ( $l_f = 6$  cm)

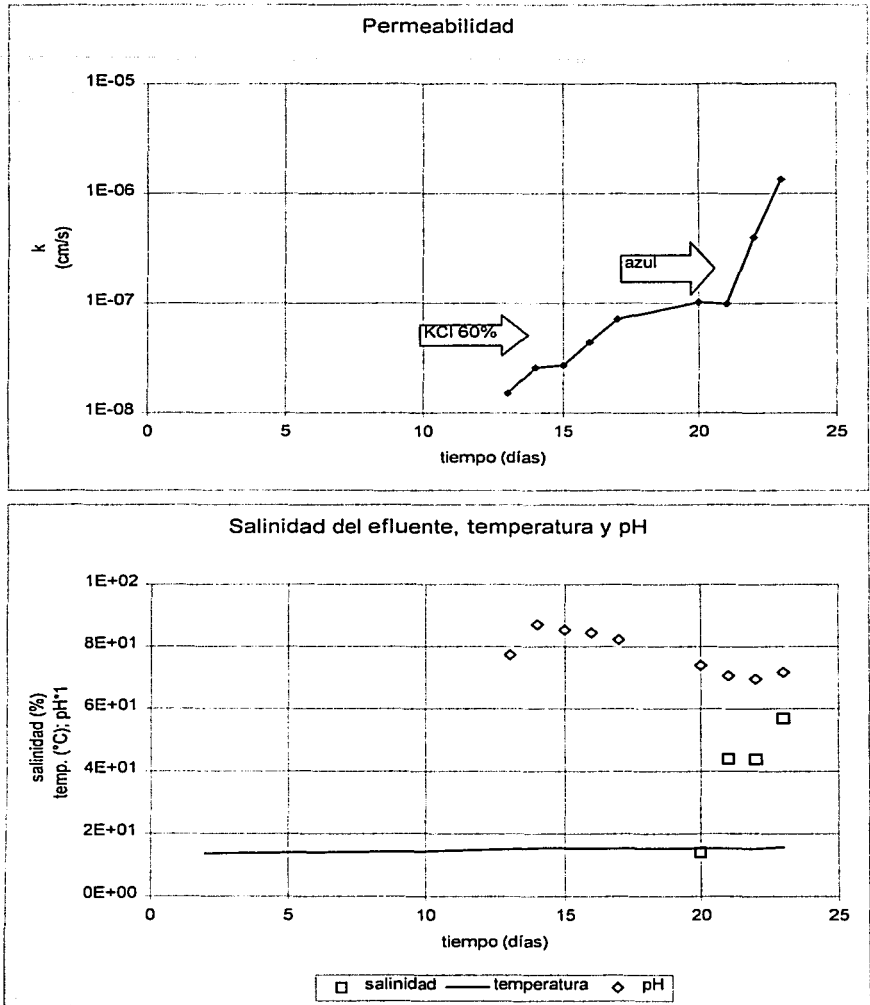
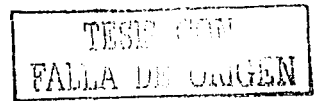


Fig. 6.1.30 BCa-3 3.7.b ( $t_i = 3$  cm;  $t_f = 4$  cm)



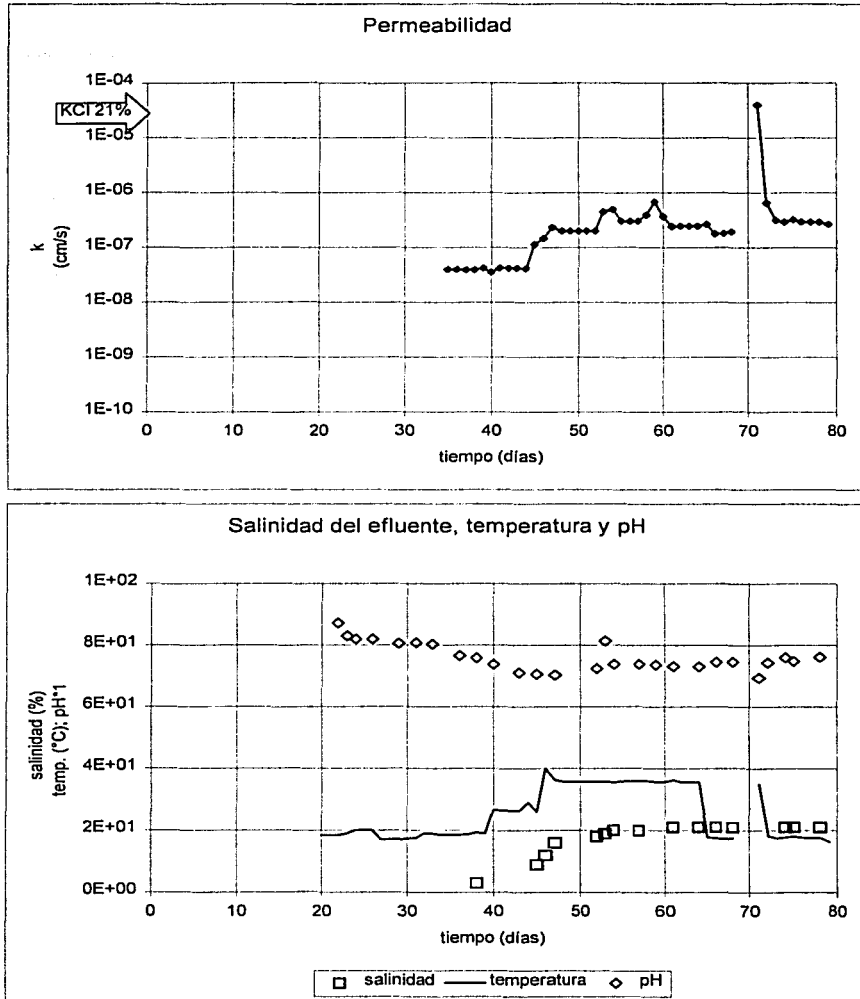


Fig.. 6.1.31 BCa-1 3.1.f ( $t_f = 6$  cm; KCl 1.ª exposición)

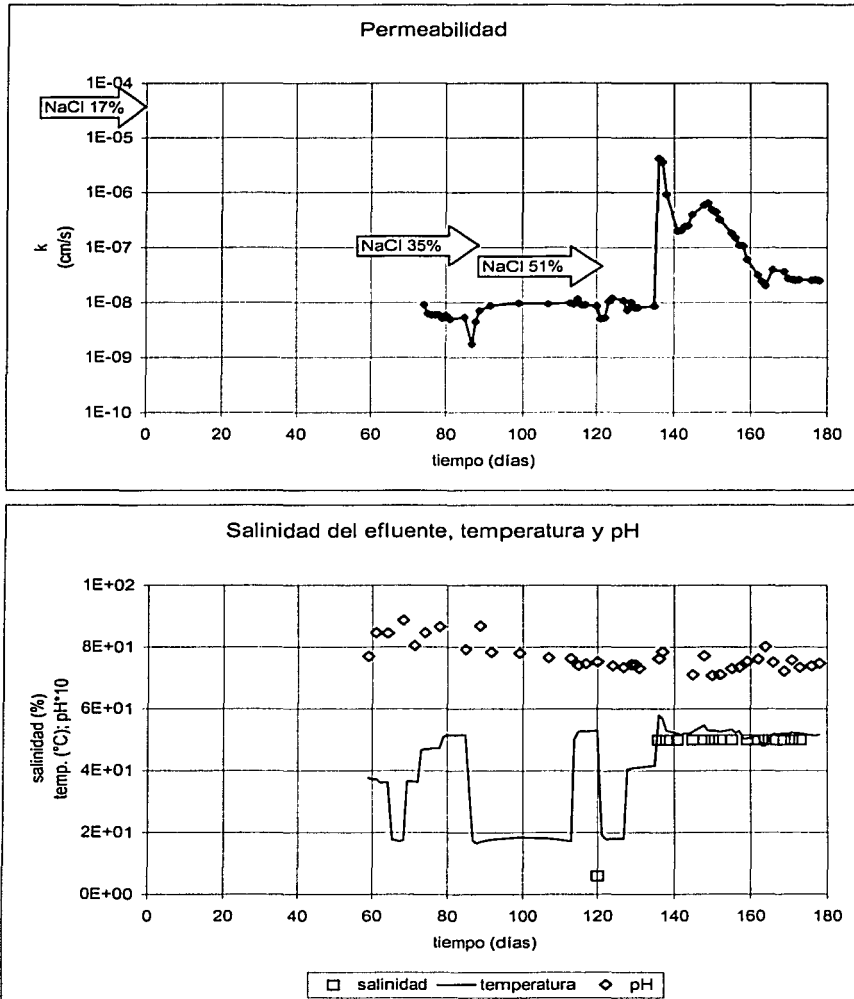
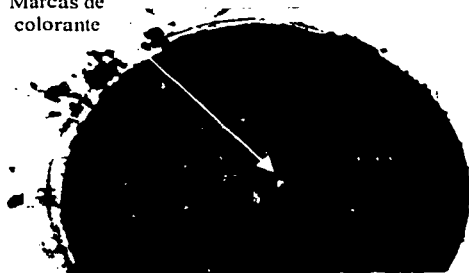


Fig. 6.1.32 BCa-1 3.1.e ( $t_f = 6$  cm; NaCl 1.<sup>a</sup> exposición)

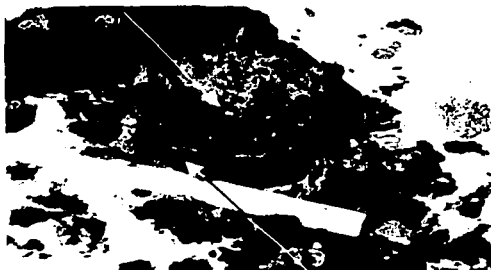
### 6.1.2 Reporte fotográfico

Marcas de  
colorante



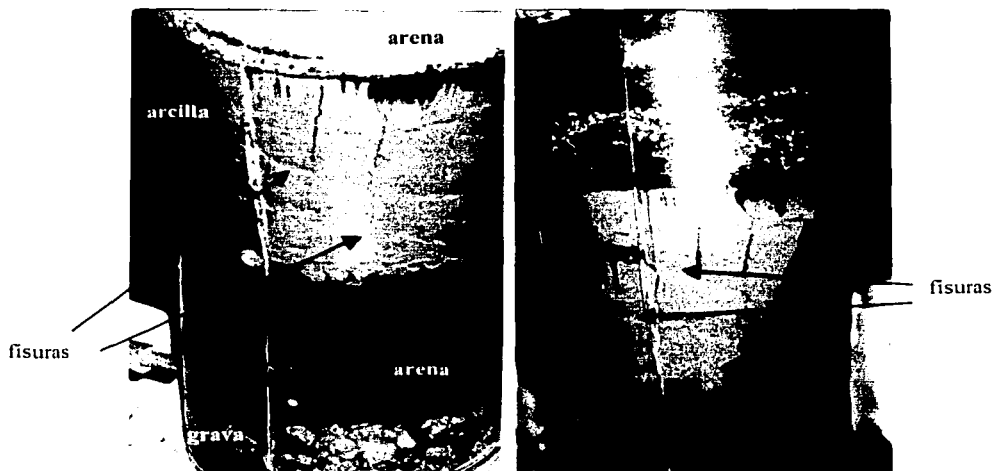
*Fig. 6.1.A Zamora 1.1.b  
(vista superior)*

Marcas de colorante



Flujo lateral

*Fig. 6.1.B Zamora 1.1.c  
(vista superior)*



*Fig. 6.1.C Zamora 1.1.d  
(vista lateral, antes y después del  
colorante)*

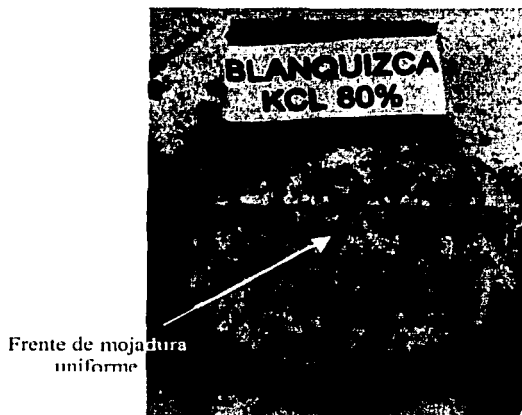


Fig. 6.1.D Blanquizca 1.2.c  
(vista superior)

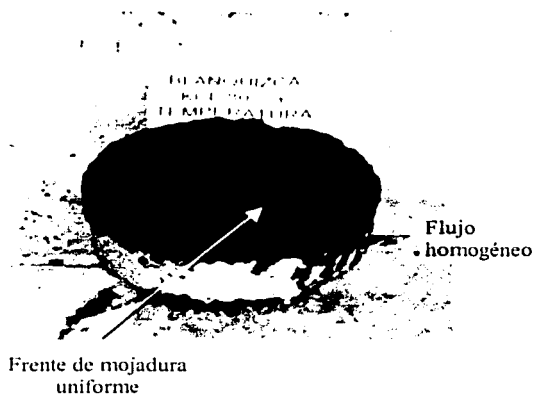


Fig. 6.1.E Blanquizca 1.2.d  
(vista superior)

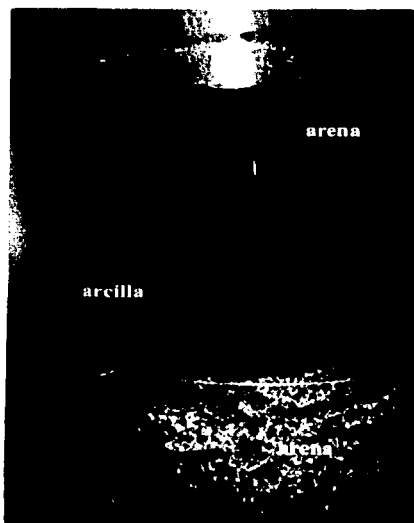


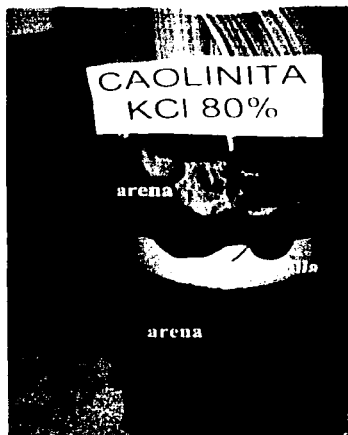
Fig. 6.1.F Morelos 1.4.c  
(izq: vista lateral, der: vista superior)

TRUCO CON  
FALSA... GEN



Marcas de flujo  
cercanas a las  
zonas de resistencia

*Fig. 6.1.G Caolinita 2.1.a  
(vista inferior, cerca de superficie)*



Frente de  
mojadura  
uniforme

*Fig. 6.1.H Caolinita 2.1.b  
(izq: vista lateral; der: vista inferior,  
cerca de superficie)*





Fig. 6.1.I Caolinita 2.1.c  
(izq: vista inferior de la superficie; der:  
vista superior del corte)

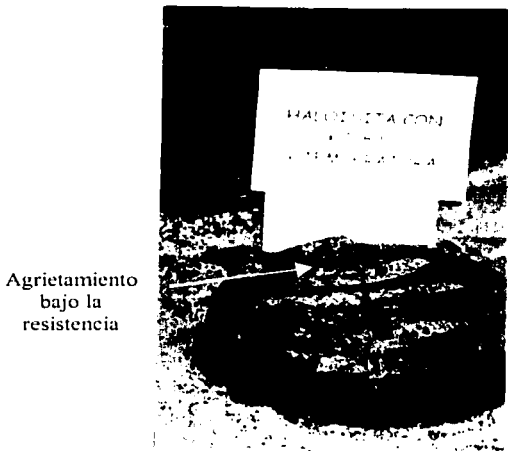


Fig. 6.1.J Haloisita 2.2.b  
(vista inferior)

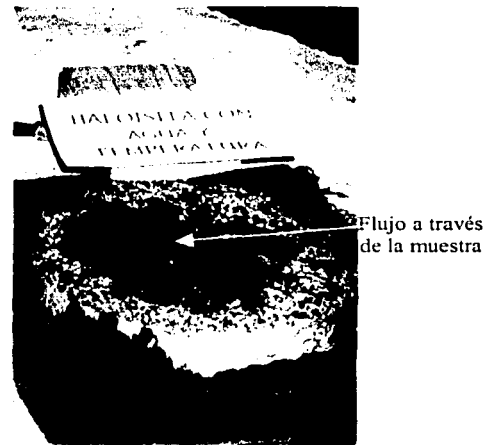
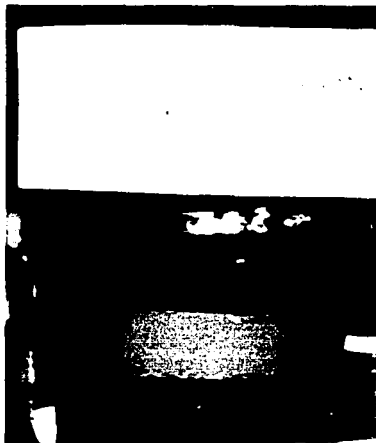


Fig. 6.1.K Haloisita 2.2.c  
(vista inferior)

TESIS  
FALLA DE



Frente de mojadura  
uniforme

*Fig. 6.1.L Atapulgita 2.3.a  
(izq: vista lateral; der: vista superior)*



Flujo lateral

*Fig. 6.1.M Bna 3.2.b  
(vista superior)*

*Fig. 6.1.N Volclay CRC 3.5.a  
(vista superior)*

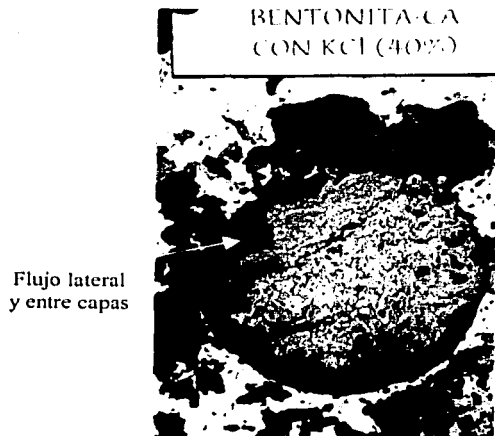


Fig. 6.1.O BCa-2 3.6.a  
(vista inferior de  
superficie)

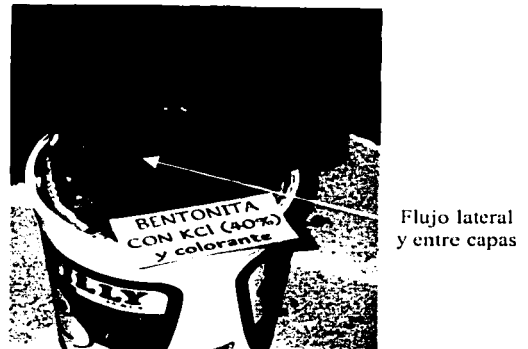


Fig. 6.1.P BCa-2  
(vista superior)

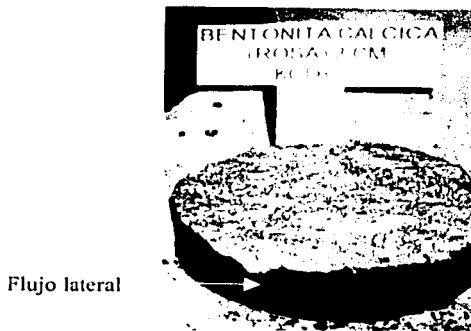


Fig. 6.1.Q BCa-2 3.6.b  
(vista superior)



Fig. 6.1.R BCa-2 3.6.c

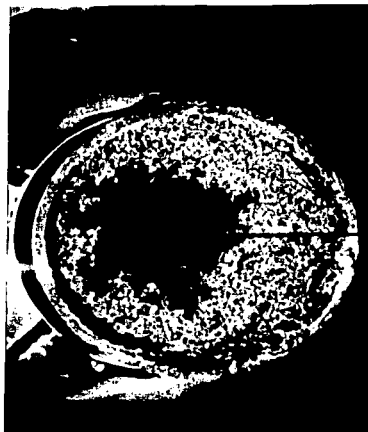
TESIS CON  
FALLA DE CARGA.

Avance de  
flujo lateral



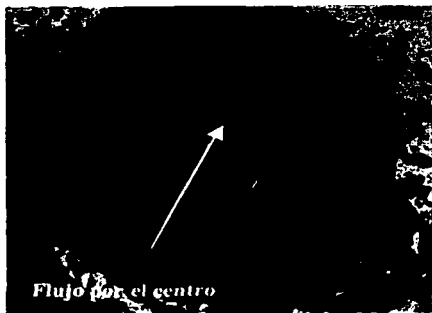
*Fig. 6.1.S BCa-3 3.7.a*

Flujo por  
el centro



*Fig. 6.1.T BCa 3.7.a*

Flujo por el centro



*Fig. 6.1.U BCa-3 3.7.b*

Flujo lateral



*Fig. 6.1.V BCa 3.7.b*

## 6.2 Pruebas de Límites de Atterberg Modificadas

### 6.2.1 Primera etapa

Las figuras 6.2.1 a 6.2.8 muestran los efectos de la contaminación sobre los límites líquido y plástico de las dos bentonitas cálcicas y de la sódica. Para cada concentración (respecto a la saturación) se presentan los datos correspondientes a distintos tiempos de tratamiento, antes y después de eliminar el exceso de sales mediante uno o más ciclos de lavado. En cada una de ellas se incluyen los datos de la muestra original (Silva *et al*, 2000).

En las figuras 6.2.1 a 6.2.6 aparecen líneas de tendencia que unen puntos asignados de acuerdo con el tratamiento que recibió la muestra y a su correspondiente contenido de agua (LL, IP y LP); en ellas se incluyen en las líneas de tendencia los puntos correspondientes a tratamientos con distinta duración, antes y después de uno o varios ciclos de lavado, en tanto que en otras, además, se grafican puntos aislados que corresponden a muestras obtenidas de permeámetros. En las figuras 6.2.7 y 6.2.8 se muestran las líneas de tendencia que unen puntos cuyas coordenadas corresponden a la concentración (%) de la solución de NaCl utilizada para el tratamiento de la muestra y a su respectivo contenido de agua (LL, IP y LP). En todas las figuras se incluyen como referencia los contenidos de agua correspondientes a la muestra original.

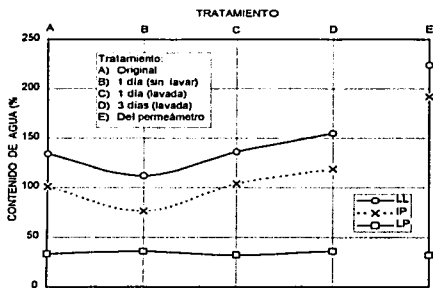


Fig. 6.2.1 BCa-1 (NaCl al 5%)

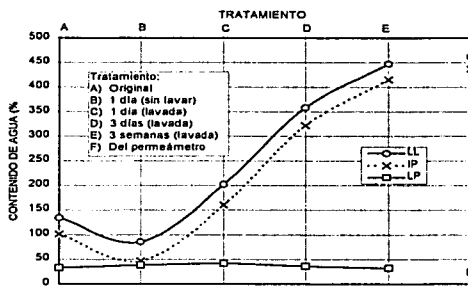


Fig. 6.2.2 BCa-1 (NaCl al 35%)

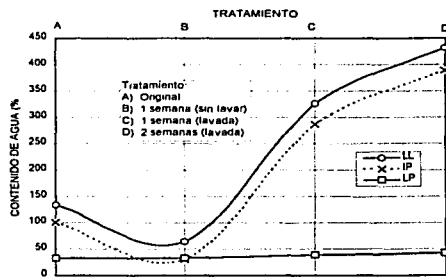


Fig. 6.2.3 BCa-1 (NaCl al 80%)

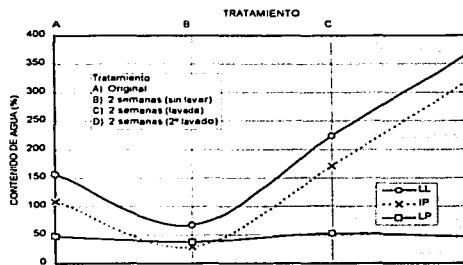


Fig. 6.2.4 BCa-1 (NaCl al 100%)

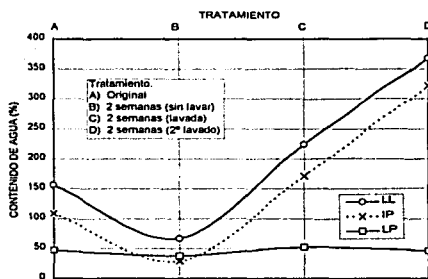


Fig. 6.2.5 BCa-2 (NaCl al 100%)

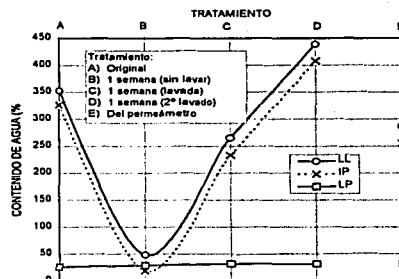


Fig. 6.2.6 BNa (NaCl al 100%)

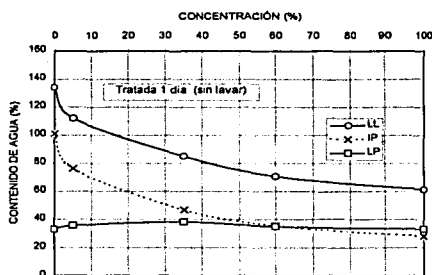


Fig. 6.2.7 BCa-1 (NaCl sin lavado)

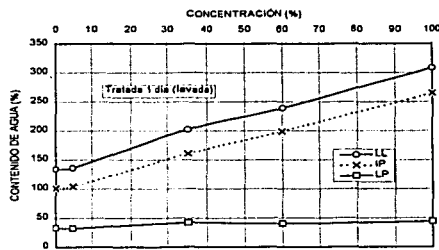


Fig. 6.2.8 BCa-1 (NaCl con lavado)

Con base en los anteriores resultados se determinaron siete figuras más; las figuras 6.2.9 a 6.2.14 corresponden a las figuras 6.2.1 a 6.2.6, respectivamente, mientras que la figura 6.2.15 reúne los resultados de las figuras 6.2.7 y 6.2.8, correspondientes exclusivamente a la muestra BCa-1 tratada 1 día. Se graficaron en la carta de plasticidad varios puntos

correspondientes a los valores de plasticidad determinados en muestras tratadas con distintas concentraciones y tiempos de exposición, así como también los correspondientes a las muestras sin ningún tratamiento (originales), como punto de referencia; en las figuras se indica cuando los límites de plasticidad se obtuvieron con o sin lavar el exceso de sales. Asimismo, en cada gráfica se muestra la ecuación de línea de tendencia de los puntos obtenidos y el coeficiente de correlación del IP respecto del LL, así como la línea A de Casagrande.

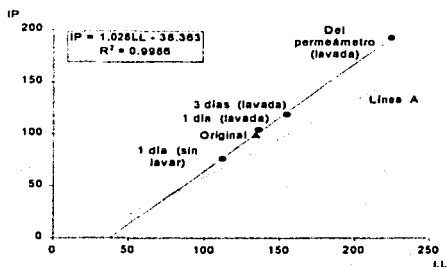


Fig. 6.2.9 BCa-1 (NaCl al 5%)

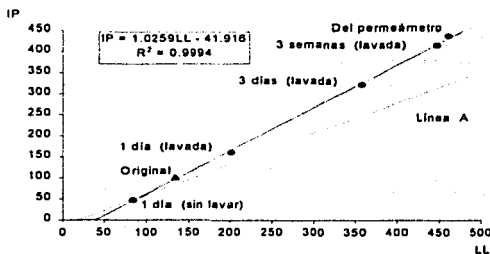


Fig. 6.2.10 BCa-1 (NaCl al 35%)

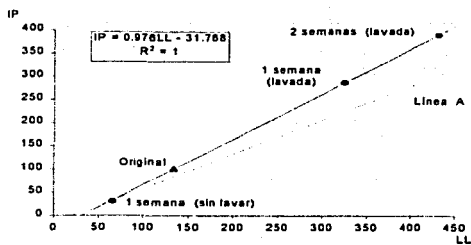


Fig. 6.2.11 BCa-1 (NaCl al 80%)

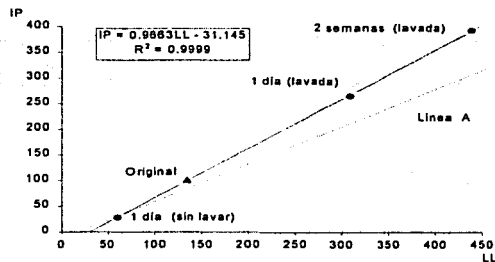


Fig. 6.2.12 BCa-1 (NaCl al 100%)

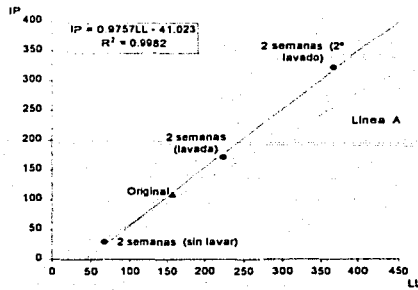


Fig. 6.2.13 BCa-2 (NaCl al 100%)

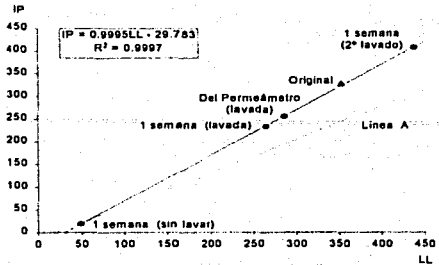


Fig. 6.2.14 BNa (NaCl al 100%)

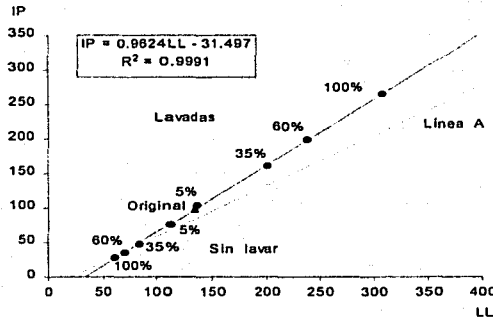


Fig. 6.2.15 BCa-1 (NaCl; lavadas y sin lavar)

En la tabla 6.2.3 se presentan datos estadísticos obtenidos con los datos de las figuras 6.2.9 a 6.2.15, correspondientes a las cartas de plasticidad. En ella se observan los siguientes datos: el número de especímenes (n), el coeficiente de correlación (r) y el error estándar de estimación (S<sub>e</sub>) para un análisis de regresión lineal, así como la ecuación de la recta correspondiente.

Tabla 6.2.3

Figura	n	r	S <sub>e</sub>	Ecuación de la recta
6.2.9	5	0.999	1.48	1.028x - 38.363
6.2.10	6	0.999	3.70	1.026x - 41.916
6.2.11	4	0.999	0.42	0.976x - 31.768
6.2.12	4	1.000	1.13	0.966x - 31.145
6.2.13	4	0.999	4.56	0.976x - 41.023
6.2.14	5	0.999	2.14	0.999x - 29.783
6.2.15	9	0.999	2.23	0.962x - 31.497



Para complementar este estudio se realizaron pruebas que involucran otras concentraciones y materiales, algunos de cuyos resultados se muestran en la tabla 6.2.4.

Tabla 6.2.4 Variación de límites de Atterberg

Muestra	LL	LP	IP
BCa-2 original	156.0	47.0	109.0
BCa-2 - NaCl 5%	119.5	49.8	69.7
BCa-2 - NaCl 80%	69.2	42.4	26.8
Caolinita original	37.0	26.0	11.0
Caolinita - NaCl 5%	33.1	23.2	9.9
Caolinita - NaCl 80%	26.3	18.4	7.9

### 6.2.2 Segunda etapa

En la tabla 6.2.5 se reportan los límites de plasticidad antes y después de tratar las muestras en los permeámetros correspondientes; asimismo, se indica la diferencia entre el contenido de agua de la parte central de la muestra desmontada y la original (el signo negativo significa desecación). Los espacios en blanco señalan que no se tienen disponibles los valores correspondientes.

Tabla 6.2.5 Contenidos de agua de muestras de permeámetros

Especimen	SUCS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\Delta W_f$ (%)
1.1 Zamora	CH	79.0	31.0	48.0	
1.1.a KCl 35%	MH	64.6	37.1	27.5	+ 22.5
1.1.c KCl al 40%					+ 12.0
1.1.d NaCl al 35%	CH	88.1	33.7	54.4	+ 43.7
1.1.e KCl al 40%					+ 6.7
1.2 Blanquizca	CL	40.0	21.0	19.0	
1.2.a KCl al 35%	CL	32.5	16.5	16.0	+ 3.4
1.2.b anillo BNa					+ 19.0
1.2.c KCl al 80%					- 3.0
1.2.d KCl 80% y T					- 3.5
1.3 Café	CL	46.0	20.0	26.0	
1.3.a KCl 35% y T	CL	31.1	17.2	13.9	+ 8.0
1.4 Morelos	MH	54.0	40.0	14.0	
1.4.a KCl 35%	ML	36.0	31.2	4.8	+ 0.8
1.4.b anillo de BNa					+ 3.3
1.4.d KCl 40 y 80%					- 11.0
2.1 Caolinita	ML	37.0	26.0	11.0	
2.1.a KCl 80%	ML	35.1	23.8	11.3	+ 2.9
2.1.b KCl 80%					- 8.0
2.2 Haloisita	MH	78.0	66.0	12.0	
2.2.a KCl 35%	MH	76.6	59.2	17.4	+ 13.8
2.2.b KCl 80%					- 15.7
2.2.c con agua					+ 0.9
2.3 Atapulgita	CH	380.0	105.0	275.0	
2.3.a KCl 80%	MH	317.6	110.6	207.0	- 23.3
3.1 BCa-1	CH	134.0	33.0	101.0	

TESIS  
FALLA DE

3.1.a NaCl al 5%	CH	234.6	31.1	203.6	+ 36.8
3.1.b NaCl al 100%	CH	448.3	32.6	415.7	+ 54.2
3.1.c KCl 40%	CH	119.7	41.6	78.1	+ 17.1
3.1.d LiCl 35%	CH	410.1	27.5	382.6	+ 69.7
3.2 BNa	CH	353.0	26.0	327.0	
3.2.a NaCl 100%	CH	286.5	31.3	255.2	+ 16.8
3.2.b KCl 40%					+ 51.9
3.2.c Geotextil					- 212.4
3.3 Zeolita-BNa	CH	97.0	32.0	65.0	
3.3.a KCl al 35%	CH	67.7	31.9	35.8	+ 7.3
3.4 Volclay CS50	CH	548.0	41.0	507.0	
3.4.a KCl al 35%	CH	329.2	61.3	267.9	+ 353.0
3.4.b Geotextil	CH	393.5	44.3	349.2	-171.0
3.5 Volclay CRC	CH	438.0	35.0	403.0	
3.5.a KCl al 80%	MH	126.4	66.0	60.4	+ 149.0
3.5.b Geotextil	CH	339.0	53.0	286.0	
3.6 BCa-2	CH	156.0	47.0	109.0	
3.6.a KCl 40%					+ 10.6
3.6.b KCl 60%					+ 10.5
3.7 BCa-3	CH	135.6	31.9	103.7	
3.7.b KCl 60%					+ 12.4

En la tabla 6.2.6 se muestran los contenidos de agua ( $W_{des}$ ) después de desmontar la muestra, en tres niveles, de las muestras de BCa-1 sometidas a salmueras de NaCl y KCl en primera exposición.

Tabla 6.2.6 Deseccación en muestras

Muestra	$W_{des}$ (%)	
3.1.e BCa-1 con NaCl	superior	53.8
	intermedia	45.4
	inferior	39.7
3.1.f BCa-1 con KCl	superior	52.7
	intermedia	49.0
	inferior	46.2

### 6.2.2 Tercera etapa

En la tabla 6.2.7 se presenta la variación de los límites de Atterberg, incluso el de contracción (LC), índice plástico (IP) y de contracción ( $IC = LP - LC$ ) de las muestras tratadas con las concentraciones de salmueras propuestas. Para cada concentración se presentan los resultados antes y después de eliminar el exceso de sales mediante uno o dos ciclos de lavado. En las últimas dos columnas se presentan los valores del incremento de concentración de sal, ( $\Delta c = c'' - c'$ ), obtenidos a través de la ecuación 2.3.9 en función del límite líquido y plástico, respectivamente.

Tabla 6.2.7 Límites de plasticidad de BCa-2 tratada con NaCl y KCl

Tratamiento	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	IC (%)	$\Delta c$ [LL] (%)	$\Delta c$ [LP] (%)
Original	156.3	47.3	109.0	14.5	32.8	0.00	0.00
NaCl 0.1 N sin lavar	131.4	44.5	86.9	18.5	25.9	12.15	13.64
NaCl 0.1 N 1. <sup>er</sup> lavado	150.5	40.4	110.1	22.2	18.2	2.49	35.95
NaCl 0.1 N 2. <sup>o</sup> lavado	196.2	43.2	152.9	15.4	27.8	-12.98	19.94
NaCl 0.4 N sin lavar	118.7	43.2	75.5	21.0	22.2	20.30	20.15
NaCl 0.4 N 1. <sup>er</sup> lavado	151.3	45.5	105.8	22.5	23.0	2.13	8.55
NaCl 0.4 N 2. <sup>o</sup> lavado	202.0	47.4	154.6	22.4	24.9	-14.46	-0.22
KCl 0.1 N sin lavar	139.1	47.9	91.1	19.4	28.5	7.95	-2.60
KCl 0.1 N 1. <sup>er</sup> lavado	167.0	46.7	120.3	26.3	20.4	-4.06	2.85
KCl 0.1 N 2. <sup>o</sup> lavado	172.2	45.4	126.9	24.2	21.2	-5.90	9.13
KCl 0.4 N sin lavar	113.2	50.0	63.2	16.2	33.8	24.38	-11.33
KCl 0.4 N 1. <sup>er</sup> lavado	129.9	47.4	82.5	25.6	21.8	13.03	-0.49
KCl 0.4 N 2. <sup>o</sup> lavado	134.9	44.1	90.8	23.3	20.8	10.17	15.43

Con base en la tabla anterior se graficaron en la carta de plasticidad (según Casagrande) varios puntos correspondientes a los valores de plasticidad determinados en muestras tratadas con distintas sales y concentraciones, así como también se graficaron los puntos correspondientes a las muestras sin ningún tratamiento (originales) como punto de referencia. Las figuras 6.2.16 y 6.2.17 corresponden a los tratamientos con NaCl y KCl, respectivamente; en ellas se indica cuando los límites de plasticidad de la muestra se obtuvieron con o sin lavar el exceso de sales. Asimismo, en cada gráfica se muestra la ecuación de línea de tendencia de los puntos obtenidos y el coeficiente de correlación del IP respecto del LL, así como la línea A de Casagrande.

TESIS CON  
VALOR EN  
LEEN

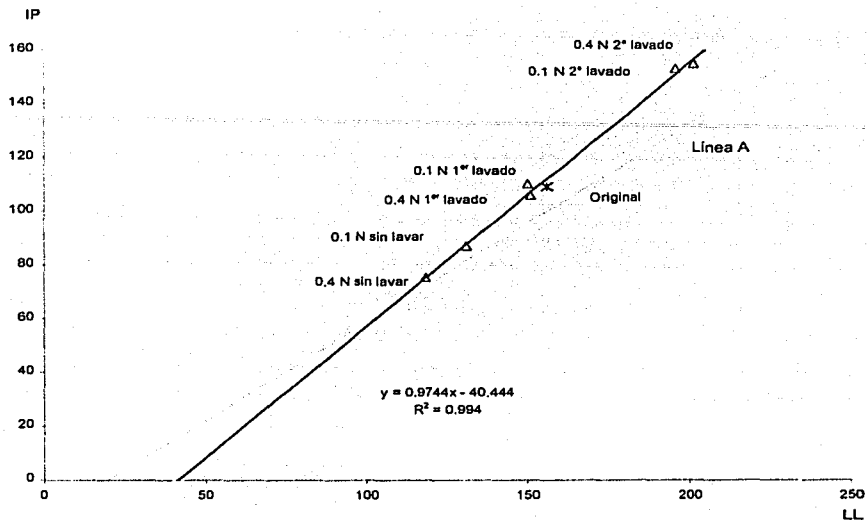


Fig 6.2.16 BCa-2 (NaCl)

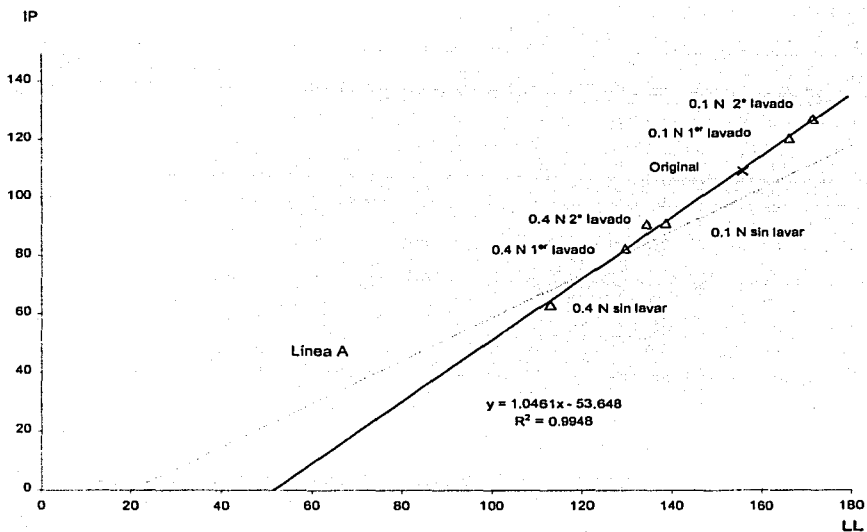


Fig 6.2.17 BCa-2 (KCl)

### 6.3 Pruebas Físicoquímicas

#### 6.3.1 Análisis del agua de poro, y de iones en solución e intercambiables

A. 1.<sup>a</sup> etapa (análisis realizados en el Laboratorio de Edafología "Mtro. Nicolás Aguilera" de la Facultad de Ciencias de la UNAM)

En la tabla 6.3.1 se muestran los resultados obtenidos con extractos de las pastas de saturación preparadas con la muestra BCa-1 original y tratada con distintas concentraciones de NaCl. Para cada tratamiento se indica el contenido de agua de dicha pasta ( $\omega$ ), los valores de pH y conductividad (CE), el total de sales disueltas (TSD), y las concentraciones equivalentes de sodio y cloruro solubles. El valor numérico de la relación: sólidos disueltos en ppmil dividido por la conductividad en mS/cm, debe ser aproximadamente 0.64; de aquí que el contenido total de sales en ppm puede ser estimado aproximadamente de la conductividad específica. Esto se verifica en la columna TSD/CE.

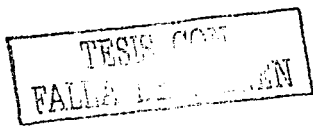
Tabla 6.3.1 Extractos de pasta de saturación (BCa-1 con NaCl)

Muestra	% Sat. (%)	$\omega$ (%)	pH	CE (mS/cm)	TSD (ppmil)	TSD/CE	Na <sup>+</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)
Original	0	202.5	8.3	5.6	3	0.54	23.5	1.6
	5	296.0	8.2	16.3	9.6	0.59	113.1	30.1
Sin lavar	35	142.0	7.3	149.6	144	0.96	nd	450
	60	120.0	7.1	210	nd	nd	nd	640
	85	131.0	7.2	220	nd	nd	nd	800
	5	352.2	8.9	1.78	1.0	0.56	12.2	3.7
Lavada	35	560.0	8.5	11.61	6.6	0.57	92.1	21.6
	60	747.0	8.4	12.1	6.9	0.57	99.8	23.6
	85	659.0	8.0	13.12	7.6	0.58	111.3	25.5

Para comprobar el efecto del exceso de sales del agua de poro en la plasticidad, se eligieron las muestras correspondientes a la BCa-2 (Figs. 6.2.5 y 6.2.13) y a la BNa (Figs. 6.2.6 y 6.2.14); para ello se realizó un análisis químico del agua de poro, determinando la concentración de sodio y cloro solubles de las muestras en su estado original, así como después de ser tratadas con soluciones saturadas de NaCl (Tabla 6.3.2).

Tabla 6.3.2 Sodio y cloro solubles (BCa-2 y BNa)

Muestra	Na <sup>+</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	IP (%)	
BCa-2	Original	25.0	2.0	109
	NaCl 100% (lavada)	37.8	10.2	171.1
	NaCl 100% (2.º lavado)	7.2	2.3	322
BNa	Original	9.8	1.7	327
	NaCl 100% (lavada)	68.9	13.5	233.2
	NaCl 100% (2.º lavado)	6.3	2.0	407.8



En la tabla 6.3.3 se muestran cationes intercambiables de algunas muestras, tanto en su estado original como después del tratamiento con salmuera en permeámetros o directamente por medio de ciclos de agitación.

Tabla 6.3.3 Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> intercambiables

Muestra	Na <sup>+</sup> (meq/100 g)	K <sup>+</sup> (meq/100 g)
Zamora	1.96	0.66
& KCl 35% (permeámetro)	0.40	54.60
BCa-1	19.4	2.0
& NaCl 35% (permeámetro)	59	1.55
& NaCl 35%	63.5	1.72
& NaCl 80% lavada	137.38	1.78
& NaCl 100% lavada	149	1.78
& KCl 40% (permeámetro)	7.65	47.42
& KCl 40% lavada	6.52	39.02
BNa	42.61	1.74
Geotextil-BNa & KCl 35% lavada (permeámetro)	4.98	25.12

B. 2.<sup>a</sup> etapa (análisis realizados en el Laboratorio de Físicoquímica de Arcillas del Instituto de Ingeniería de la UNAM)

Tabla 6.3.4 Datos de extractos de pastas de saturación

Muestra	Wpsat (%)	pH	CE (mS/cm)	TSD (ppmil)	Na <sup>+</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	K <sup>+</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)
Zamora	91.12	7.81	6.1	4.28	8.24	22.86	0.71	59.90	0.00	4.80
& KCl 35% [0%]	53.44	9.41	3.83	2.69	2.14	0.54	22.04	5.00	1.72	9.68
Blanquiza	36.94	7.57	4.33	3.02	13.35	10.22	0.31	7.70	0.00	3.24
& KCl 35% [0%]	38.20	9.1	1.12	0.79	1.21	0.11	7.45	1.65	0.98	4.90
Café oscuro	47.49	7.8	2.63	1.88	3.15	12.78	0.27	12.75	0.00	2.45
& KCl 35% [0%]	30.39	9.31	3.14	2.69	3.88	0.58	18.18	6.80	1.18	11.57
Morelos	75.89	7.35	0.26	0.18	0.80	0.01	0.03	0.90	0.00	1.18
& KCl 35% [0%]	56.32	8.4	0.64	0.45	0.68	0.08	3.76	2.20	0.00	2.75
Caolinita	59.68	5.12	0.92	0.65	3.46	0.13	0.29	4.90	0.00	0.69
& KCl 80%	53.73	7.69	1.58	1.12	0.95	0.11	7.67	12.0	0.00	0.69
Haloisita	79.75	7.66	7.26	5.11	4.97	28.24	0.80	67.85	0.00	1.76
& KCl 35% [0%]	87.26	9.02	1.24	0.86	0.69	0.09	9.24	4.00	1.18	4.12
Atapulgita	585.82	9.7	0.39	0.27	0.61	0.13	0.22	0.65	1.96	1.08
& KCl 85%	417.26	8.68	19.95*	14.05*	7.88	1.61	5 846.2	4 250	0.39	1.57
BCa-1	179.19	8.05	6.24	4.39	37.95	7.53	1.87	5.00	0.00	2.35
& NaCl 5% [≤ 5%]	366.89	8.59	3	2.11	15.32	1.01	0.57	20.5	0.00	3.14
& NaCl 35% [≤ 11%]	646.29	8.92	3.56	2.5	15.89	0.32	0.37	15.25	0.20	1.37
& KCl 40% [≤ 17%]	154.05	7.85	17.3*	12.11*	11.28	14.25	100.71	255.0	0.00	1.18
& LiCl 40% [≤ 31%]	130.62	8.92	4.6	3.2	1.34	0.05	0.39	47.60	0.20	1.86
Zeolita BNa	119.2	8.79	1.68	1.19	11.83	0.16	0.44	1.57	1.6	5.0
& KCl 35% [0%]	83.37	9.11	0.97	0.68	4.87	0.12	3.12	1.55	0.39	3.14
Volclay CS50	593.16	8.89	1.52	1.07	11.28	0.13	0.19	3.00	0.39	4.12
& KCl 35% [≤ 31%]	411.65	8.27	9.0	6.3	11.42	3.09	52.09	40.00	0.00	1.37

Tabla 6.3.4 (continuación)

Volclay CRC	625.00	7.7	2.75	1.43	10.35	0.20	0.04	6.7	0.00	7.9
& KCl 80%	130.62	7.5	20.80*	14.65*	17.48	9.01	4 046.2	5 450	0.00	1.76

- indica que los valores exceden la capacidad del conductímetro
- [# %] significa que la muestra del permeámetro se lavó del exceso de sales hasta ese valor

En la tabla 6.3.4 se exponen resultados obtenidos con extractos de las pastas de saturación preparadas con muestras originales y después de su extracción de los permeámetros. En la primera columna se indica entre paréntesis cuadrados el máximo porcentaje que se detectó en las muestras lavadas con agua destilada al final de la prueba. A continuación aparecen el contenido de agua de la pasta ( $W_{psat}$ ), los valores de pH y conductividad (CE), el total de sólidos disueltos (TSD), y los iones solubles de interés particular (Na, K y Cl).

### C. 3.ª etapa (análisis realizados en el Laboratorio de Fisicoquímica de Arcillas)

En la tabla 6.3.5 se muestran los resultados de conductividad eléctrica (CE), total de sólidos disueltos (TSD), pH y cloruros ( $Cl^-$ ), obtenidos con suspensiones y soluciones de arcilla y con los extractos de las pastas de saturación preparadas con la muestra BCa-2, tanto en su estado original como después de ser tratada con distintas concentraciones de salmueras y agua.

Tabla 6.3.5 Resultados de tratamientos con sales (BCa-2)

Tratamiento		CE (mS/cm)	TSD (g/L)	TSD/CE	pH	$Cl^-$ (meq/L)
Original	en suspensión	1.65	1.16	0.70	8.57	1.5
	en solución	1.31	0.92	0.70		
NaCl 0.1 N sin lavar	en suspensión	2.87	2.02	0.70	8.58	34.7
	en solución	2.74	1.92	0.70		
NaCl 0.1 N 1er lavado	en suspensión	1.39	0.98	0.70	8.56	6.3
	en solución	1.23	0.86	0.70		
NaCl 0.1 N 2º lavado	en suspensión	0.86	0.61	0.71	8.31	1.8
	en solución	0.66	0.45	0.69		
NaCl 0.4 N sin lavar	en suspensión	5.73	4.01	0.70	8.35	99.0
	en solución	6.01	4.21	0.70		
NaCl 0.4 N 1er lavado	en suspensión	1.75	1.23	0.70	8.68	13.0
	en solución	1.68	1.18	0.70		
NaCl 0.4 N 2º lavado	en suspensión	1.02	0.72	0.70	9.00	3.9
	en solución	0.65	0.57	0.88		
KCl 0.1 N sin lavar	en suspensión	1.65	1.15	0.70	9.12	29.8
	en solución	1.57	1.10	0.70		
KCl 0.1 N 1er lavado	en suspensión	1.18	0.83	0.70	8.81	5.2
	en solución	1.03	0.73	0.70		
KCl 0.1 N 2º lavado	en suspensión	0.91	0.64	0.70	8.39	3.1
	en solución	0.87	0.64	0.73		
KCl 0.4 N sin lavar	en suspensión	3.23	2.25	0.70	8.22	64.0
	en solución	3.08	2.15	0.70		

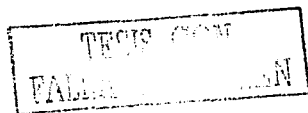


Tabla 6.3.5 (continuación)

KCl 0.4 N 1er lavado	en suspensión	1.35	0.94	0.70	7.93	8.3
	en solución	1.28	0.90	0.70		
KCl 0.4 N 2º lavado	en suspensión	0.50	0.35	0.70	8.24	2.5
	en solución	0.44	0.31	0.69		

### 6.3.2 Difracción de rayos X

Tabla 6.3.6 Análisis por medio de difracción de rayos X

Muestra	Especies mineralógicas	d (001) Å
Zamora	Albita (plagioclasa), sist. triclinico (P)	Es 16.05 *
	cuarzo, sist. hexagonal (A)	Ha 7.49 (12º)**
	haloisita (s), esmectita (s)	
& KCl 40% sin lavar	Silvita, KCl, sist. Cúbico. (m)	- *
	haloisita 7 Å, sist. monoclinico (s)	MHa 4.5 (20º)**
	cristobalita, sist. tetragonal (s)	
& KCl 40% lavada	Albita (plagioclasa), sist. triclinico (s)	Es 13.58- 12.8 *
	haloisita, sist. monoclinico (s)	Ha 7.43 **
	esmectita (s), cuarzo (s)	
BCa-I	Montmorilonita, sist. ortorrómbico (P)	14.24
	cuarzo, sist. hexagonal (A)	
	cristobalita (m)	
& NaCl 5% sin lavar	Cuarzo, sist. hexagonal (P)	13.18
	montmorilonita 15 Å, sist. ortorrómbico (A)	
	cristobalita ?	
& NaCl 5% lavada	Montmorilonita 15 Å, sist. ortorrómbico (P)	16.97
	cuarzo, sist. hexagonal (A)	
	cristobalita (b)	
& NaCl 35% sin lavar	Cuarzo (P)	12.26
	esmectita (A)	
	halita, NaCl, sist. cúbico (A)	
& NaCl 35% lavada	cristobalita (m)	
	Montmorilonita 15 Å (P)	12.44
	cuarzo (A), calcita (A)	
& NaCl 60% sin lavar	cristobalita (A)	
	Halita (P), cuarzo (A)	11.77
	montmorilonita 15 Å (s)	
& NaCl 60% lavada	Montmorilonita 15 Å (P)	12.26
	cuarzo (A), cristobalita (s)	
	Cuarzo (P), halita (A)	13.6
& NaCl 85% sin lavar	montmorilonita 15 Å (A), cristobalita (A)	
	Cuarzo (P)	12.98
	montmorilonita 15 Å (A)	
& NaCl 85% lavada	calcita (A), cristobalita (A)	
	Halita (P), cuarzo (m)	12.26
	cristobalita (s), esmectita (s)	
& NaCl 100% sin lavar	Montmorilonita (P)	11.93
	cuarzo (A), halita (m)	



Tabla 6.3.6 (continuación)

& KCl 40% sin lavar	Silvita, KCl, sist. cúbico (P) cuarzo, sist. hexagonal (A) montmorilonita 15 Å, sist. ortorrómbico (s)	11.18
& KCl 40% lavada	Esmectita (P) cuarzo, sist. hexagonal (A) cristobalita (m)	11.18 +
BNa	Montmorilonita 15 Å, sist. monoclinico (P) cuarzo, sist. hexagonal (A)	13.4
& KCl 40% sin lavar	Cuarzo, sist. hexagonal (P) silvita, KCl, sist. cúbico (P) montmorilonita 15 Å, sist. ortorrómbico (b) halita ?	11.77
& KCl 40% lavada	Montmorilonita, sist. ortorrómbico (P) cuarzo, sist. hexagonal (P) interestratificados (s)	11.93
BCa-Na (ES)***	Montmorilonita Na 15 Å, sist. monoclinico (P) cuarzo (m), cristobalita (b) halita, NaCl, sist. cúbico (m)	12.61

donde: P = Fase predominante; A = Fase abundante; m = Fase en concentración media, b = Fase en concentración baja; s = Fase en concentración muy baja. Nota: el símbolo de interrogación (?) se emplea en caso de no registrarse un número suficiente de picos para asegurar la presencia de la especie mineralógica en cuestión.

& Indica el tratamiento

\* Valor obtenido para la esmectita (Es) para un ángulo  $2\theta$  menor de  $8^\circ$

\*\* Valor obtenido para la haloisita o metahaloisita (Ha o MHa) para un ángulo  $2\theta$  mayor de  $10^\circ$

\*\*\* Muestra correspondiente a una Bentonita originalmente cálcica (Almanza *et al*, 1993)

### 6.3.3 Expansión unidimensional de pastillas comprimidas estáticamente

La bentonita cálcica tratada con agua destilada durante 22 días varió su volumen de 90.09 a 186.98 cm<sup>3</sup>, es decir, un porcentaje de expansión de 107.55. Al ser tratada con KCl al 40% la bentonita no mostró cambio alguno en su volumen, después de 17 días de tratamiento (Fig 6.3.1).

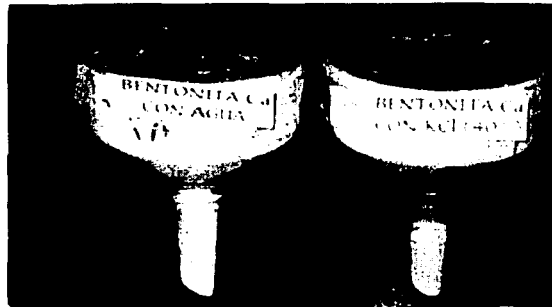


Fig 6.3.1 Expansión unidimensional

### 6.3.4 Pruebas de permeabilidad en embudos (influencia del catión)

En la tabla 6.3.7 se presentan los resultados obtenidos de tres pruebas con la BCa-1; se indica el tipo de sal y su concentración normal, el tiempo de tratamiento, los porcentajes de agua iniciales ( $W_i$ ), finales ( $W_f$ ), y el correspondiente incremento ( $\Delta\omega$ ).

Tabla 6.3.7 (BCa-1)

Prueba	Sal	Normalidad	Tiempo (h)	$W_i$ (%)	$W_f$ (%)	$\Delta\omega$ (%)
(1)	KCl	1 N	26	32.74	67.15	34.41
		2 N	16			
	NaCl	1 N	26	32.38	68.52	36.14
		2 N	27			
(2)	KCl	2 N	15.5	33.90	73.16	39.26
		2 N	28.5	34.31	77.36	43.05
	LiCl	2 N	34.7	34.01	73.45	39.44
		2 N	34.7	34.01	73.45	39.44
(3)	NaCl	2.94 N	13.75	34.58	62.38	27.80
		3.76 N	21.7	34.69	67.02	32.33
	LiCl	5.18 N	19.75	34.66	72.69	38.03

Solución equivalente al 18%, en peso

### 6.3.5 Capacidad de expansión libre y prueba de volumen de sedimentación

En la tabla 6.3.8 se presentan los resultados de estas dos pruebas en aquellas muestras que presentaron mayor actividad y capacidad de expansión.

Tabla 6.3.8 Pruebas de expansión y volumen de sedimentación en bentonitas

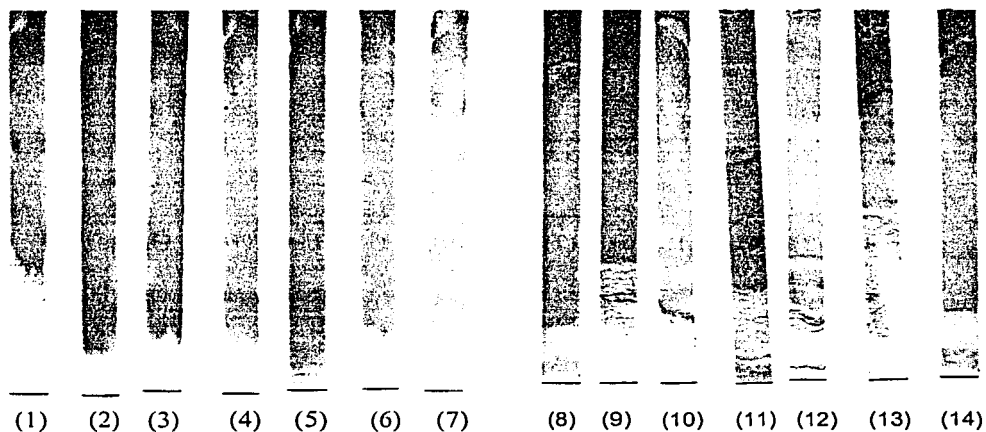
Muestra	Líquido	Expansión (mL)	Volumen de sedimentación (mL)
Zamora	agua	3.5	2.5
	KCl 5%	2	-
	KCl 40%	1	-
Atapulgita	Agua	6	8.5
	KCl 40%	-	6
BCa-1	agua	4	16
	KCl 5%	3	3.8
	NaCl 5%	4	9.5
	LiCl 5%	6	11
	KCl 40%	1.6	-
	NaCl 100%	0	-
BCa-1 tratada con NaCl al 5% y lavada	agua	-	37.5
	NaCl 5%	10	36
BCa-2	KCl 40%	-	6
	agua	7	29
	KCl 40%	0.5	3

BCa-3	agua	3	13
	agua	18	42
BNa	KCl 40%	1.5	3
	NaCl 40%	-	3
Volclay CS 50	agua	17	23
	agua	27	93
Volclay CRC	NaCl 40%	-	4
	KCl 40%	-	4
	LiCl 5%	-	24
	LiCl 40%	-	3.5

Nota: los espacios vacíos equivalen a valores no disponibles

### 6.3.6 Cromatografía

En la fig. 6.3.2 aparecen los resultados de muestras originales.



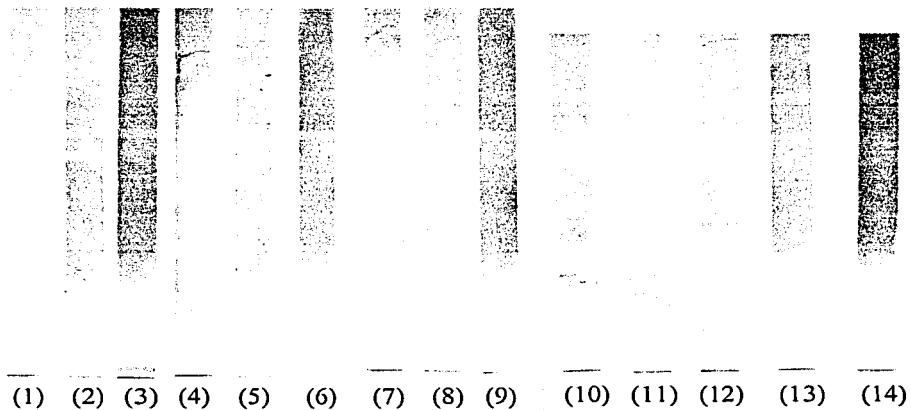
- (1) Zamora
- (2) Blanquiza
- (3) Café
- (4) Morelos
- (5) Caolinita
- (6) Haloisita
- (7) Atapulgita

- (8) BCa-1
- (9) BNa
- (10) Zeolita
- (11) Volclay CS50
- (12) Volclay CRC
- (13) BCa-2
- (14) BCa-3

Fig 6.3.2 Muestras sin tratar

Estos resultados corresponden con los reportados en la tabla 5.1.5.

En la figura 6.3.3 se comparan los datos con agua, NaCl 5% y KCl 5% obtenidos, respectivamente, con los siguientes especímenes:



- (1) Volclay CRC + agua
- (2) Volclay CRC + NaCl (al 5%)
- (3) Volclay CRC + KCl (al 5%)
- (4) BCa-1 + agua
- (5) BCa-1 + NaCl (al 5%)
- (6) BCa-1 + KCl (al 5%)
- (7) BCa-3 + agua
- (8) BCa-3 + NaCl (al 5%)
- (9) BCa-3 + KCl (al 5%)

- (10) BNa
- (11) Zeolita
- (12) mezcla Zeolita-BNa
- (13) mezcla Zeolita-BNa + NaCl (al 5%)
- (14) mezcla Zeolita-BNa + KCl (al 5%)

Fig 6.3.3 Muestras tratadas y mezclas con zeolita

6.3.7 Patrón de agrietamiento



Fig 6.3.4 Atapulgeta vs BCa-1

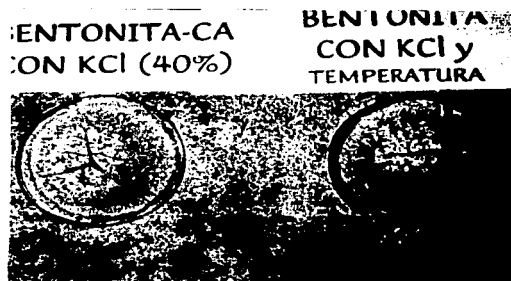


Fig 6.3.5 Efecto de temperatura

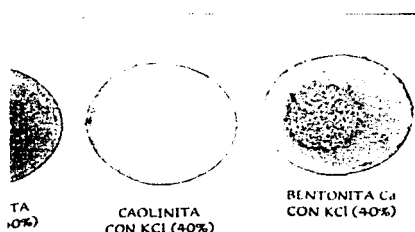


Fig 6.3.6 Caolinita vs BCa-1



Fig 6.3.7 Caolinita vs BCa-1 (azul)

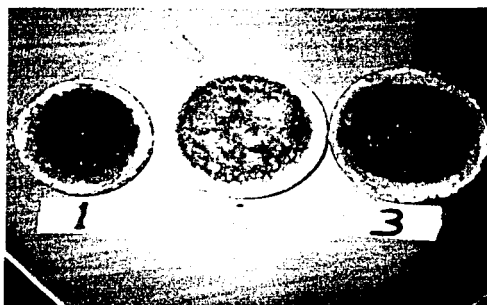


Fig 6.3.8 BCa-1 NaCl vs KCl 50%

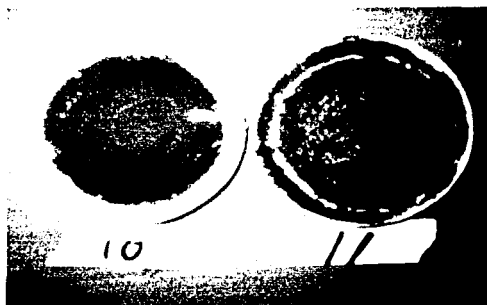
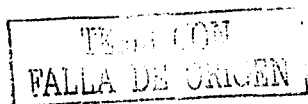


Fig 6.3.9 BCa-1 KCl 10% (agua vs metanol)



### 6.3.8 Cambio de color

Tabla 6.3.9 Cambio de color (Tablas Munsell)

Muestra	Color	Muestra	Color
Zamora	10YR 5/1 gris	Zamora KCl 35%	10YR 5/1 gris
Blanquizeca	5Y 8/1 blanco	Blanquizeca KCl 35%	5Y 8/1 blanco
Café	10YR 6/3 café pálido	Café KCl 35%	10YR 6/3 café pálido
Morelos	2.5Y 5/4 café olivo claro	Morelos KCl 35%	2.5Y 6/4 café amarillento claro
Caolinita	10YR 8/2 café muy pálido	Caolinita KCl 80%	10YR 8/2 café muy pálido
Haloisita	5Y 8/1 blanco	Haloisita KCl 35%	2.5Y 8/2 amarillo pálido
Atapulgita	5Y 8/1 blanco	Atapulgita KCl 85%	5Y 7/3 amarillo pálido
BCa-1	5Y 8/1 blanco	BCa-1 NaCl 5%	5Y 8/1 blanco
		BCa-1 NaCl 35%	2.5Y 8/2 amarillo pálido
		BCa-1 KCl 40%	5Y 8/1 blanco
		BCa-1 LiCl 40%	2.5Y 8/2 amarillo pálido
BNa	2.5Y 8/1 blanco		
Zeolita	10GY 8/1 gris verdoso claro		
Zeolita-BNa	5GY 8/1 gris verdoso claro	Zeolita-BNa KCl 35%	5GY 8/2 gris verdoso claro
Volclay CS 50	5Y 7/1 gris claro	Volclay CS50 KCl 35%	5Y 6/2 gris olivo claro
Volclay CRC	5Y 8/1 blanco	Volclay CRC KCl 80%	5Y 6/2 gris olivo claro

### 6.3.9 Cambio de la capacidad de intercambio catiónico

Tabla 6.3.10 Variación de la CIC entre muestras originales y tratadas (mh)

Muestra original	CIC (1) (meq/100 g)	Muestra tratada	CIC (2) (meq/100 g)	Variación entre (2) y (1) (%)
Zamora	67	(1.1.c) KCl 40%	42	62.7
		(1.1.d) NaCl 35%	46	68.7
Blanquizeca	13		7	53.8
Café	24		12.5	52.1
Morelos	20		5	25.0
Caolinita	3.6		1.5	41.7
Haloisita	33		8	24.2
Atapulgita	42		18	42.9
BCa-1	86	NaCl 5%	66	76.7
		NaCl 35%	69	80.2
		KCl 40%	60	69.8
		LiCl 35%	68	79.1
BNa	66	Geotextil	30	45.5
Zeolita - BNa	14		9	64.3
Volclay CS 50	84		73	86.9
		Geotextil	73	86.9
Volclay CRC	80		40	50.0
		Geotextil	59	73.8

### 6.3.10 Resultados del MEB

En las figuras 6.3.10 a 6.3.12, que corresponden a la muestra de Zamora original y a las tratadas con sales en el permeámetro, se presentan los análisis elementales (EDS) de las distintas fases identificadas en la línea K (capa electrónica). En la figura 6.3.13 se comparan los tejidos de cada muestra para una amplificación aproximadamente semejante. En el resto de las figuras, en cada imagen se muestra la escala en micras y se indica el espécimen y equipo utilizado, y en algunas los resultados del análisis con EDS.

El tiempo y la necesidad de una preparación especial limitaron las posibilidades de observar resultados que pudieran servir para determinar alguna característica o cambio estructural las muestras. Al no contar con la celda para fluidos, la preparación de la muestra, en este caso partículas de suelo, dificulta la observación, pues este microscopio requiere de superficies suficientemente lisas.

En las figuras 6.3.23 a 6.3.31 se pueden comparar los efectos de la salmuera en pruebas de ciclos de carga hidráulica, química y térmica de una caolinita.

En la figura 6.3.36 se comparan el arreglo y forma de partícula de una bentonita y una muestra superficial (0-60 cm) (pasada por malla 200), cercana al Caracol, en el exlago de Texcoco, México D.F.

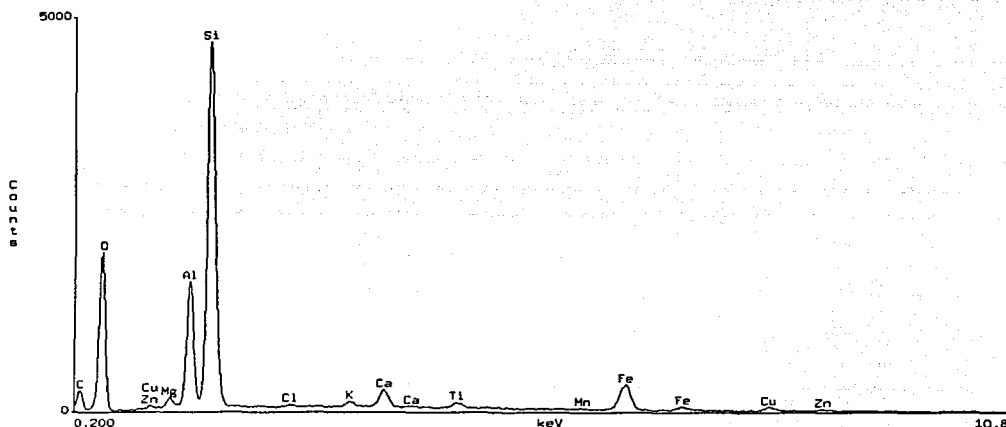


Fig. 6.3.10 Zamora Original (EDS con JSM 5600 LV)

TESIS CON  
FALLA DE CALIFICACION

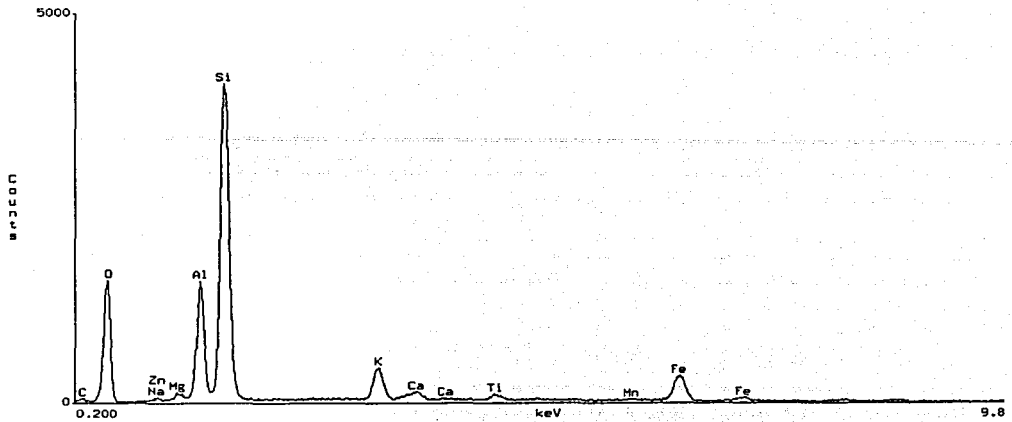


Fig. 6.3.11 Zamora con KCl (EDS con JSM 5600 LV)

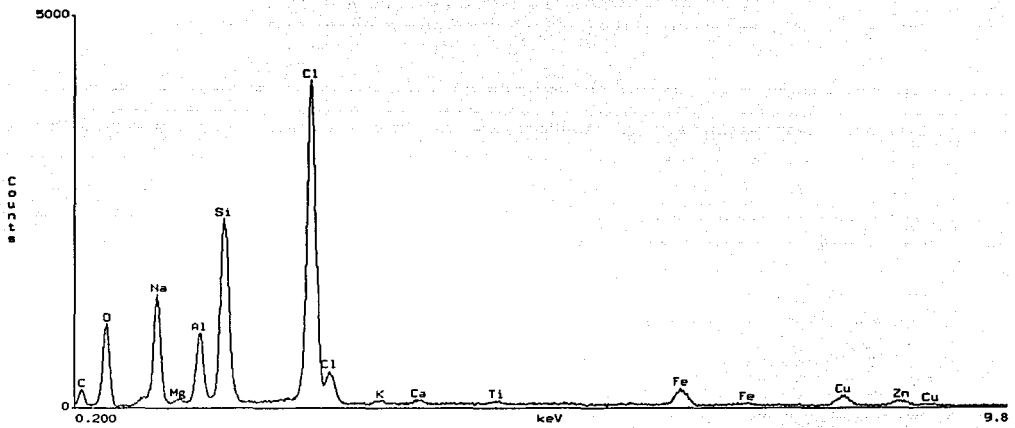


Fig. 6.3.12 Zamora con NaCl (EDS con JSM 5600 LV)



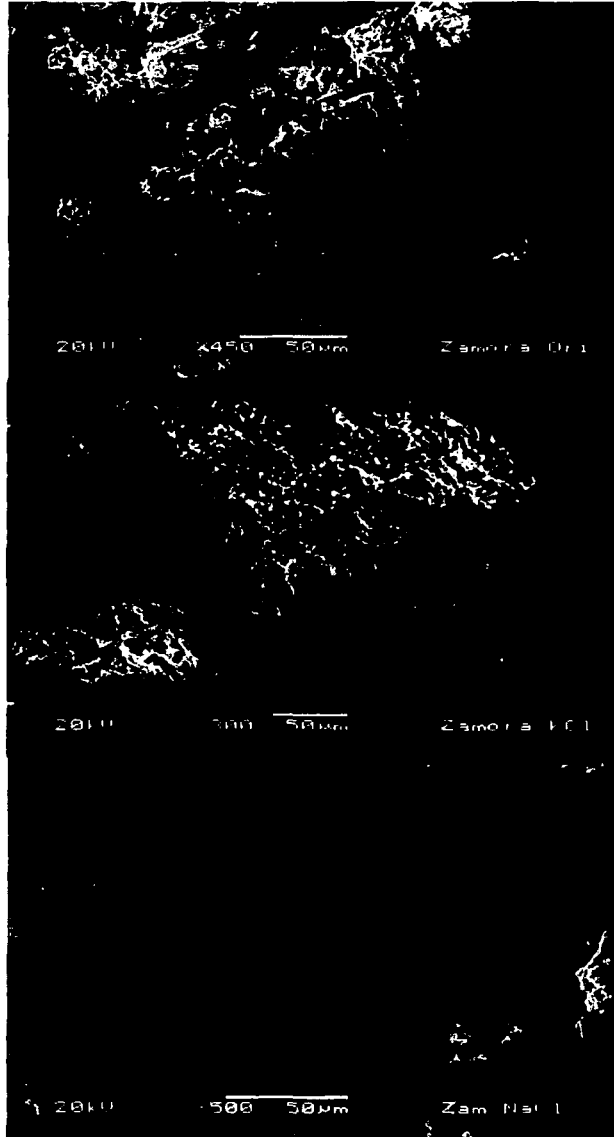


Fig. 6.3.13 Zamora original, con KCl y NaCl (JSM 5600 LV)

TR  
FALLA

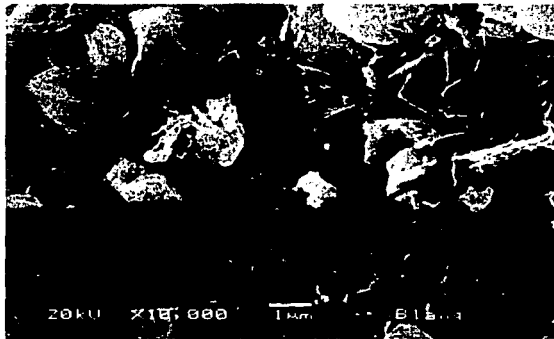


Fig. 6.3.14 Blanquizza con Au (JSM 5600 LV)



Fig. 6.3.15 Blanquizza (JSM 5200)

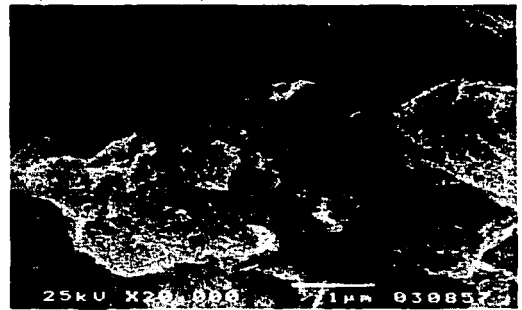


Fig. 6.3.16 Blanquizza (JSM 5200)

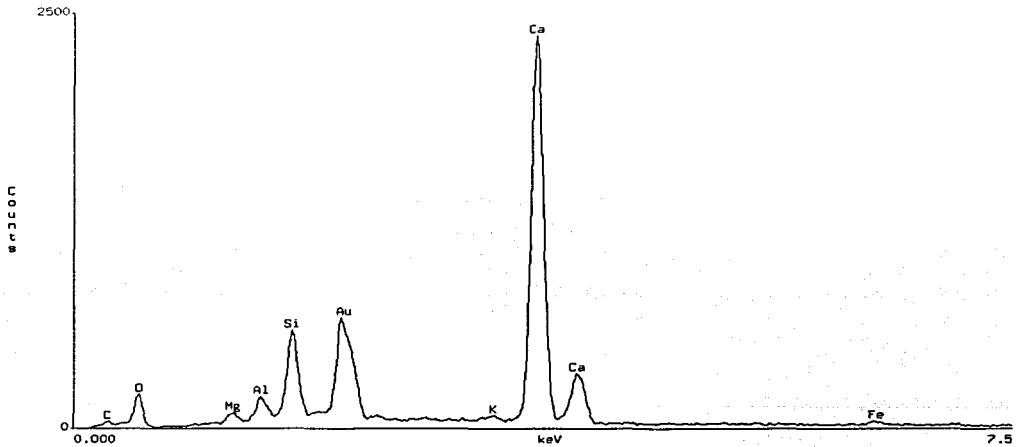


Fig. 6.3.17 Blanquizza con Au (EDS con JSM 5600 LV)

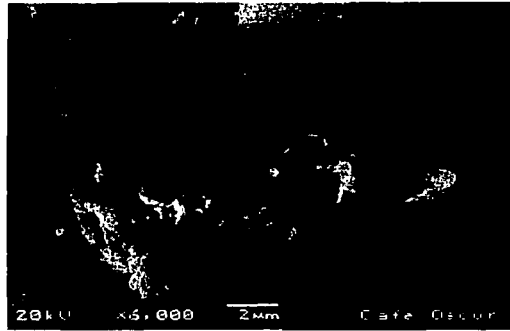


Fig. 6.3.18 Cafè (JSM 5600 LV)



Fig. 6.3.19 Cafè (JSM 5200)



Fig. 6.3.20 (Cafè JSM 5200)

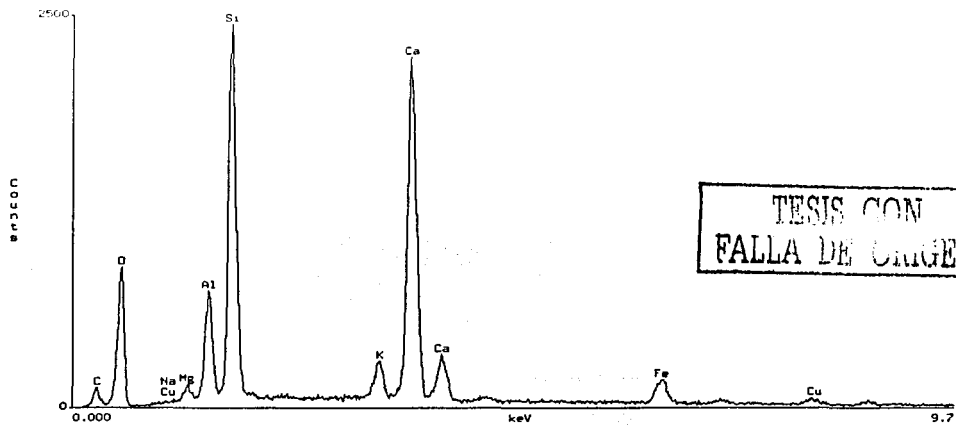


Fig. 6.3.21 Cafè (EDS con JSM 5600 LV)

TRIS CON  
FALLER DE BERGEN

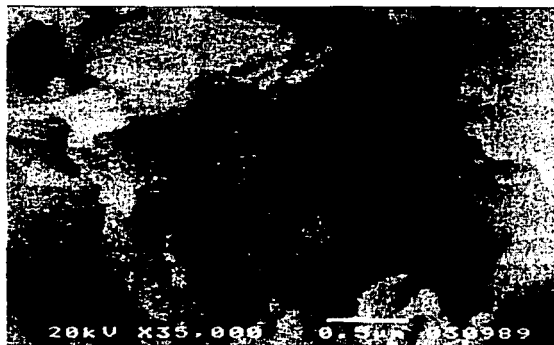


Fig. 6.3.22 Caolinita (JSM 5200)

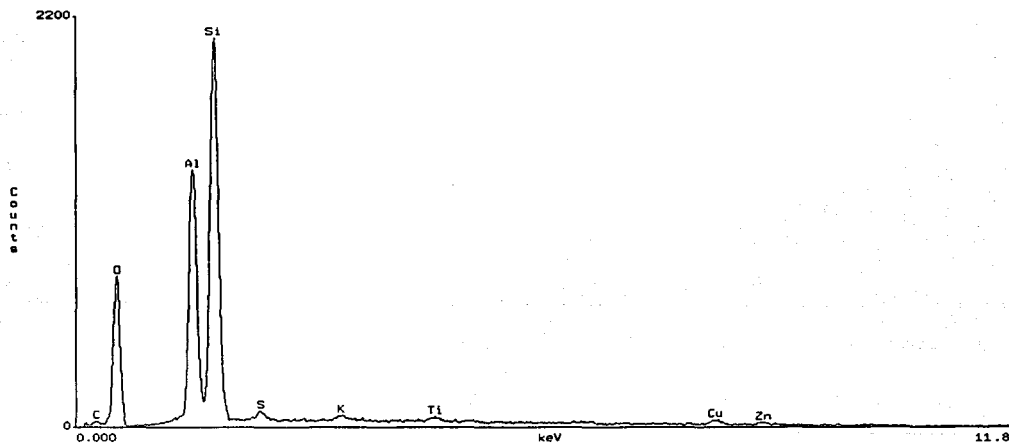


Fig. 6.3.23 Caolinita (EDS con JSM 5600 LV)

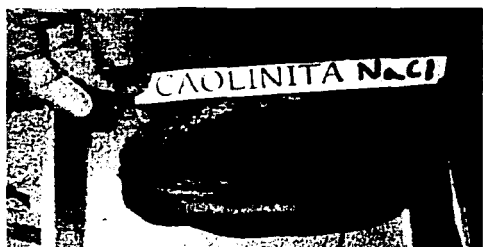


Fig. 6.3.24 Caolinita con NaCl 80% y temperatura

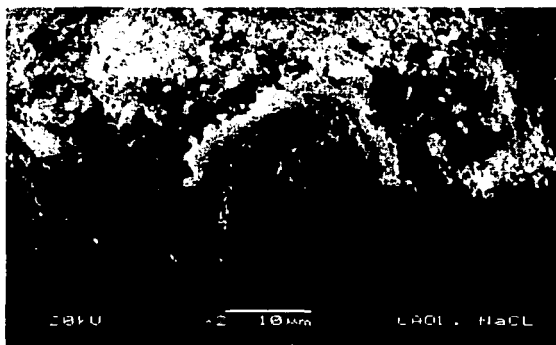


Fig 6.3.25 Agregado (JSM 5600 LV)

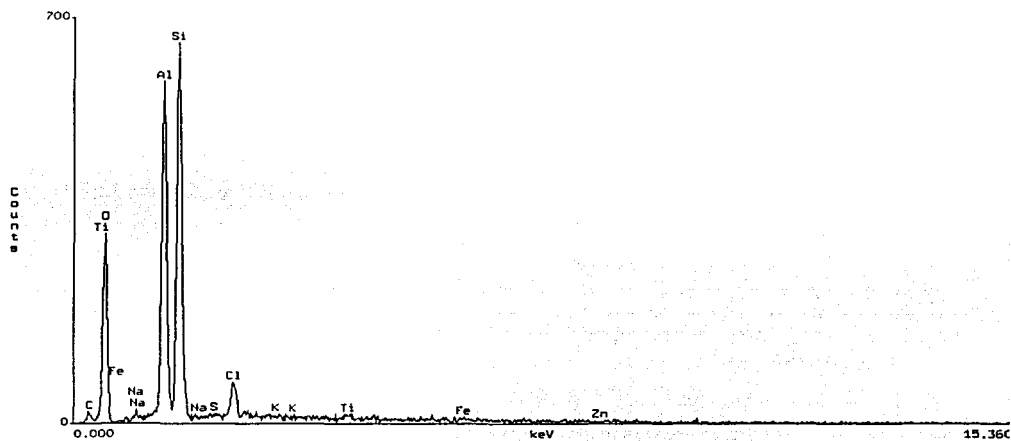


Fig. 6.3.26 Agregado (EDS con JSM 5600 LV)



Fig. 6.3.27 Caolinita con KCl 80% y temperatura

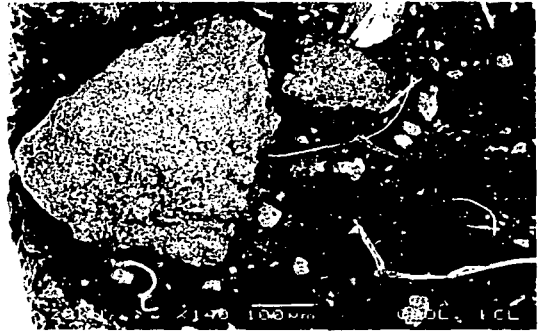


Fig. 6.3.28 Agregado de caolinita

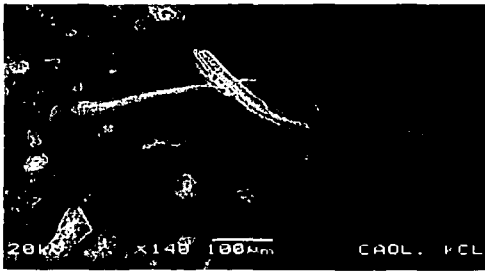


Fig. 6.3.29 Partícula fibrosa

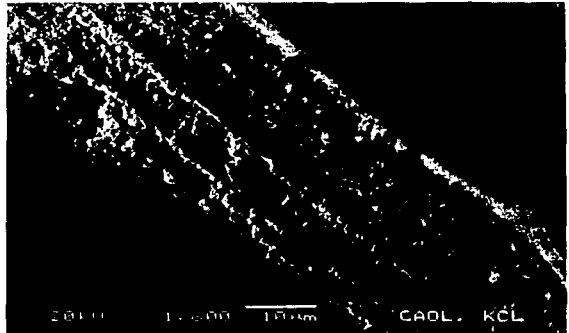


Fig. 6.3.30 Ampliación de partícula fibrosa

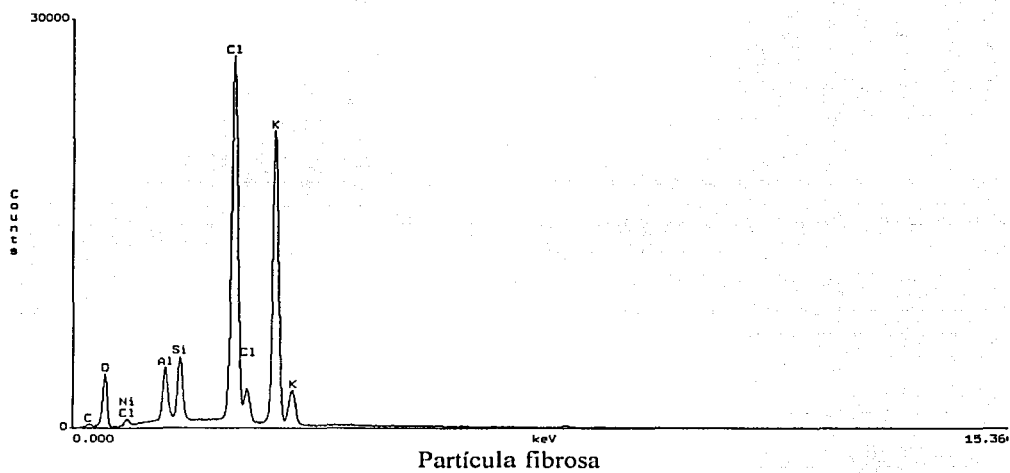
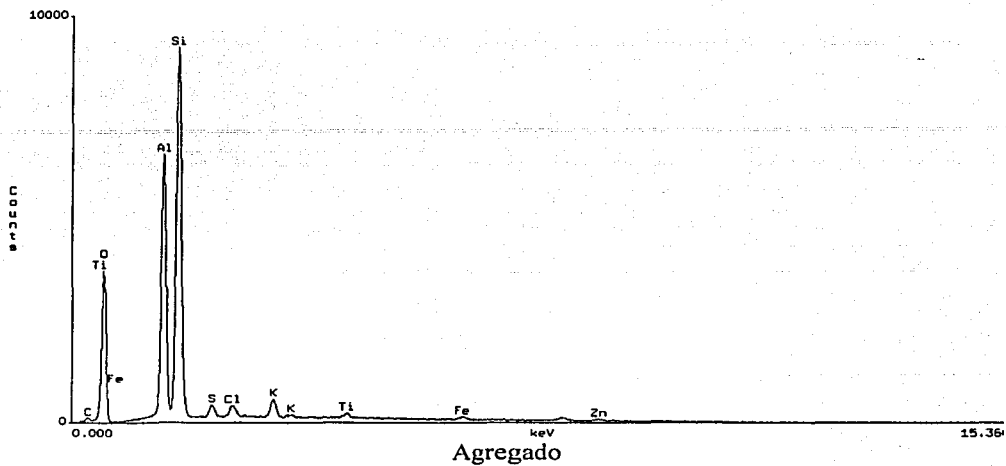


Fig. 6.3.31 EDS del agregado y de la partícula fibrosa en Caolinita con KCl

TRICOM  
E.C.

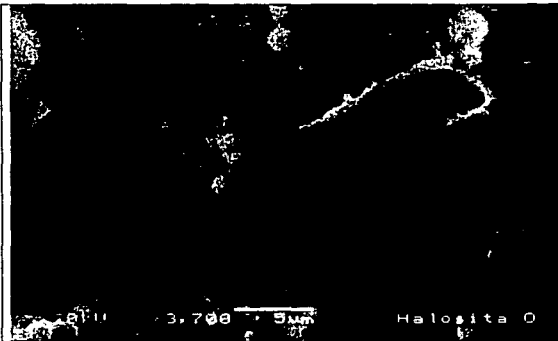


Fig 6.3.32 Halosita (JSM 5600 LV)



Fig 6.3.33 Halosita (JSM 5200)



Fig 6.3.34 Atapulgita (JSM 5200)

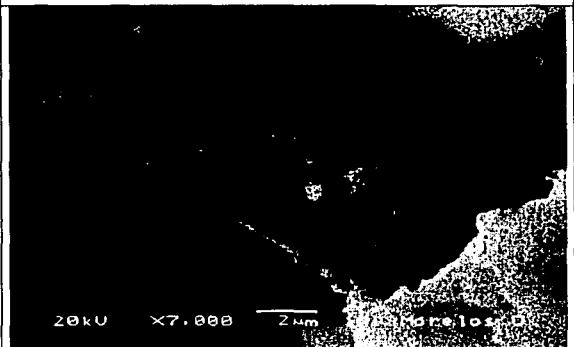


Fig 6.3.35 Morelos (JSM 5600 LV)





Agrietamiento cerca del Caracol, exlago de Texcoco



BCa-1 NaCl 5% (JSM 5200)



Suelo de Texcoco (JSM 5200)

Fig. 6.3.36 Tejido semejante en bentonita tratada y suelo de Texcoco

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

"Two roads diverged in a wood, and I-

I took the one less traveled by,  
And that has made all the difference"

Robert Frost: *The Road Not Taken*

### 7.1 Permeabilidad

A continuación se presentan una serie de tablas, una para cada muestra ensayada, y sus respectivos comentarios, que resumen los datos más significativos de las pruebas de permeabilidad mostrados en las gráficas correspondientes (figuras 6.1.1 a 6.1.32). En las tablas se indica cronológicamente el tiempo de la prueba de permeabilidad de carga variable y el líquido de entrada, la duración en días y el número de mediciones de temperatura y permeabilidad tomadas durante dicho intervalo, aproximadamente cada 24 horas (# datos). Asimismo, se reportan valores medidos de temperatura (T), permeabilidad (k), así como pH y salinidad del efluente; en los intervalos donde se tiene más de un dato, se reporta el valor medido promedio más o menos la desviación absoluta máxima, tal que no excediera límites preestablecidos; si el número de mediciones de pH y salinidad es menor que el de datos de permeabilidad, aquél se indica después de su valor con el símbolo #. Se utiliza un asterisco a la izquierda del dato de una determinada celda para indicar la mayor influencia estimada de factores como el tiempo, temperatura o salinidad en el valor de permeabilidad reportado, dos y tres asteriscos a la derecha de la cifra para señalar un valor mínimo y un valor máximo, respectivamente. En general, las siglas nd significan no disponible, ya sea porque por diversas razones el valor correspondiente no se determinó, o bien no se consideró suficientemente confiable; los coeficientes de permeabilidad están referidos a una temperatura de 20°C y se expresan como una mantisa separada por la letra *E* de la potencia de diez correspondiente. Finalmente, se subrayan aquellos valores donde se presenta una variación significativa por temperatura, líquido de entrada o terminación de una prueba. En función de la homogeneidad y capacidad de imbibición, las muestras se dividieron en tres grupos: (1) suelos nativos, (2) comerciales sin capacidad apreciable de expansión, y (3) con notable capacidad de expansión (bentonitas). Respecto de estas muestras, en cada tabla se indica el espesor final de la muestra con las siglas tf; en caso de que el espesor inicial sea distinto de 5 cm, éste se indica con las siglas ti. En estos resultados se incluye la prueba de permeabilidad realizada en un permeámetro de pared flexible con la muestra de Zamora.

En cada tabla, en el primer renglón se puede determinar el tiempo en que empezó a registrarse un flujo de las muestras originales montadas en permeámetros nuevos, mientras que en la última fila queda registrado el tiempo total de duración de la prueba. Se denomina con el término de "reutilizada" a las muestras ya montadas previamente a

este conjunto de pruebas, mismas que se aprovecharon para efectuar algunos ensayos adicionales. Cuando se utilizó agua de la llave, o bien, se reutilizaron los efluentes recuperados, esto queda asentado en las tablas en la columna correspondiente como "agua dulce" o "salmuera reciclada".

1) Suelos nativos

Tabla 7.1.1 Zamora 1.1.a  
(con KCl 35% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 6.2$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
16 - 21	5	*1	22.0	1.61 E-9	nd	Agua	
32 - 63	31	10	21.98 ± 3.42	1.71 ± 0.63 E-8	8.77 ± 0.25 #4		
80 - 81	1	1	*44.2	7.13 E-8***	8.22		
151 - 191	40	16	52.98 ± 1.98	1.22 ± 0.16 E-8	7.08 ± 0.38 #8		
338 - 339	1	1	23.3	1.56 E-9	nd		
357						KCl 35%	
366 - 367	1	1	19.4	6.1 E-7	6.08**		*13%
369 - 371	2	1	20.4	8.6 E-6***	8.02		*30%
371						Agua	
371 - 372	1	1	19.9	1.18 E-5***	8.02		9%
438 - 441	3	*1	57.10	1.05 E-8	7.79		0%
469 - 473	4	4	19.33 ± 1.13	1.21 ± 0.15 E-8	nd		0%
499						KCl 35%	
504 - 505	1	1	19.3	2.34 E-6***	7.45**		*30%
512 - 513	1	1	18.5	1.72 E-6	8.40		*35%***
513 - 514	1	1	18.3	8.49 E-7	nd		35%
547						Agua	
610 - 616	6	*1	29.4	1.02 E-8	nd		0%
619 - 652	33	12	13.66 ± 1.34	1.04 ± 0.59 E-8	nd		0%

Presenta un aumento transitorio de permeabilidad con agua por incremento de temperatura, aproximadamente por un factor de cuatro; esto no se repite en posteriores ciclos de calentamiento. La permeabilidad tiene un súbito incremento de cerca de tres órdenes de magnitud por efecto de la salmuera. El aumento de permeabilidad se presenta antes de registrar la salinidad máxima, lo que puede significar que aparte del flujo lateral existe flujo a través de la muestra. El pH disminuye inicialmente al aumentar la permeabilidad. La permeabilidad disminuye con el lavado, y llega a valores similares a los del inicio; el aumento de permeabilidad al subir la temperatura durante el lavado, indica que el efecto de la salmuera sería mayor con el calentamiento. El contenido final de agua fue mayor en 22.5%, respecto del contenido de agua con el que se montó la muestra.

Tabla 7.1.2 Zamora 1.1.b  
(con KCl al 80 y 86%; reutilizada; con colorante;  $t_f = 6$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 2	1	*1	19.1	6.74 E-9	nd	Agua	
3 - 4	1	1	19.1	2.53 E-9	nd		
4						KCl 60%	
7 - 8	1	1	19.1	5.93 E-8	7.77		*nd
11 - 14	3	1	19.1	9.32 E-7	6.77**		50%
18 - 36	18	10	16.58 ± 2.52	8.83 ± 3.21 E-7	7.1 ± 0.34		*60% #4

Tabla 7.1.2 (continuación)

36							KCl 80%	
45 - 49	4	1	15.4	9.34 E-6	6.88**			78%
56 - 87	31	17	15.97 ± 2.87	1.52 ± 0.47 E-6	7.38 ± 0.15 #16			*80% #6
87							KCl 86%	
91 - 126	35	23	16.41 ± 1.59	1.53 ± 0.38 E-6	7.36 ± 0.32 #19			86%*** #10
127							Azul	
127 - 138	11	8	16.61 ± 0.79	1.31 ± 0.29 E-6	7.40 ± 0.14 #5			86

Se observa que el efecto de la salmuera es inmediato y la muestra no lo amortigua con el tiempo; presenta aumento de alrededor de tres órdenes de magnitud. El pH disminuye ligeramente y luego se recupera. Luego de 11 días con colorante se observó flujo a través de la muestra; el azul marca caminos ya establecidos (Fig. 6.1.A).

Tabla 7.1.3 Zamora 1.1.c  
(con KCl al 40%; reutilizada; lavada; sin gráfica;  $t_f = 6.2$  cm)

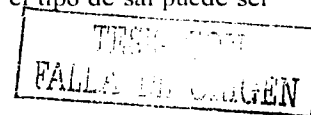
Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 11	10	7	15.59 ± 0.49	2.01 ± 2.17 E-8	8.96 ± 0.03 #3	KCl 40%	Nd
11 - 12	1	1	15.6	4.43 E-7	7.95		14%
12						Azul	
12 - 13	1	1	15	9.35 E-7	7.29**		*33%***

Se registra un aumento de la permeabilidad de más de un orden de magnitud para una salinidad de salida de 33%. El pH disminuye, lo que puede deberse a flujo lateral o en combinación con el que atraviesa la muestra; el colorante marca filtraciones, tanto laterales como a través de la muestra (Fig. 6.1.B). El contenido final de agua fue 12.0% superior al inicial; comparando dicho valor con el correspondiente a la primera muestra se observa que es menor, posiblemente porque esta muestra no tuvo lavado.

Tabla 7.1.4 Zamora 1.1.d  
(con NaCl al 35%; reutilizada [montada 7 años]; sin gráfica;  $t_i = 10$ ;  $t_f = 11$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 8	7	5	18.5 ± 0.40	6.02 ± 1.10 E-9	8.41 ± 0.3 #2	Agua	
11 - 12	1	1	17.6	2.47 E-6***	7.00**	*NaCl 35%	33%

Esta muestra había trabajado anteriormente de la siguiente manera: 119 días con agua, 476 días con NaCl 100% y con periodos de temperatura, y luego 1638 días con agua, algunos de ellos sin aplicación de toda la carga. Con la salmuera se registraron aumentos transitorios de permeabilidad de aproximadamente tres órdenes de magnitud y disminución de pH. Con el colorante se observa flujo lateral y a través de la muestra, atribuido a un posible efecto de contracción por envejecimiento, quizá debido al fenómeno de sinéresis, como se puede observar por medio de las fotografías de ciertas fisuras observadas en la muestra, justo antes y después del avance del colorante (Fig. 6.1.C). El contenido de agua final es 43.7% superior al inicial, aproximadamente; este contenido es mayor que en muestras tratadas con KCl, por lo que el tipo de sal puede ser



importante en este aspecto, así como el efecto de activación por el ion sodio al que estuvo sujeta la muestra tras el periodo de lavado posterior al tratamiento inicial con salmuera saturada de NaCl.

Tabla 7.1.5 Zamora 1.1.e

(con KCl al 40% en permeámetro de pared flexible;  $t_i = 5$  cm;  $t_f = 5.1$  cm)

Tiempo [s]	Presión confinante (kg/cm <sup>2</sup> )	Contrapresión (kg/cm <sup>2</sup> )	H <sub>1</sub> [cm]	H <sub>2</sub> [cm]	T [°C]	k [cm/s]	Líquido
1200	3	2.5	71.7	70.3	20	2.5 E-7	Agua
1200	3	2.5	71.7	41.7	20	6.9 E-6	KCl (40%)

En esta tabla en particular sólo se indica la duración en segundos de la respectiva prueba con agua y con salmuera. luego de que ésta interaccionara durante dos semanas con la muestra. El aumento de permeabilidad respecto del agua es de un orden de magnitud, por lo que el efecto de la salmuera todavía es notable, y podría incrementarse aún más por efecto de la temperatura, aun cuando es menor que el observado en el permeámetro de pared rígida. esto por efecto de la presión de confinamiento que restringe el flujo lateral, así como por el menor gradiente aplicado (15.6). El contenido de agua final es sólo 6.7% superior, que es el menor valor de los obtenidos con esta muestra, lo cual puede atribuirse a que la presión confinante obligó a que la salmuera tuviera mayor contacto con toda la muestra.

Tabla 7.1.6 Blanquiza 1.2.a

(con KCl al 35% y cambios de temperatura; lavada)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
11 - 14	3	*1	17.8	8.4 E-9	nd	Agua	
14 - 42	28	10	18.71 ± 2.39	6.17 ± 2.79 E-9	8.52 ± 0.07 #2		
73 - 74	1	1	*39.2	7.06 E-7***	7.75		
186 - 226	40	16	53.32 ± 2.22	1.24 ± 0.17 E-8	7.97 ± 0.18 # 8		
374 - 375	1	1	51.4	1.15 E-8	8.3		
392						KCl 35%	
408 - 412	4	1	19.1	5.50 E-8	7.43**		10%
457 - 458	1	1	24.1	1.27 E-6***	8.37		*33%
546 - 554	8	6	18.3 ± 0.9	1.24 ± 0.48 E-7	8.53 ± 0.07 #4		32.67 ± 0.67% #3
554 - 555	1	1	*47.7	2.64 E-5***	8.51		≥ 33%***
582						Agua	
644 - 645	1	*1	29.4	1.02 E-8	nd		0%
651 - 687	36	12	13.93 ± 2.87	1.35 ± 0.70 E-8	nd		0%

Durante las pruebas con agua se observan grandes aumentos de permeabilidad por efecto de la temperatura. Se presenta un incremento de permeabilidad de dos órdenes de magnitud en el primer ciclo de calentamiento; posteriormente, estos aumentos son menores o nulos. La permeabilidad aumenta gradualmente por efecto de la salmuera, hasta en dos órdenes de magnitud, pero dicho cambio es amortiguado por el suelo a temperatura ambiente, mas no al incrementar ésta. El pH es uniforme, aunque disminuyó durante algunos de los incrementos de permeabilidad. La salinidad de salida es variable;

llega al máximo y luego disminuye, lo que se puede explicar por flujos laterales y combinación de éstos con flujos propiamente a través de la muestra. La permeabilidad de la muestra disminuye con el lavado y regresa a valores similares a los del inicio. El contenido de agua final es sólo 3% superior.

Tabla 7.1.7 Blanquiza 1.2.b  
(con anillo de BNa con agua y cambios de temperatura)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido
1 - 31	30	*1	18.9	2.16 E-9	nd	Agua
89 - 92	3	1	*19.2	3.10 E-9**	nd	
100 - 101	1	1	*56.8	2.26 E-8***	8.38	
155 - 183	28	10	18.58 ± 0.92	1.06 ± 0.33 E-8	9.57 ± 0.05 #3	
186 - 193	7	5	51.14 ± 1.26	1.16 ± 0.04 E-8	9.43 ± 0.08	

Se verificó el efecto de flujo lateral por aumento de temperatura, mismo que disminuyó al confinar la muestra con un anillo de bentonita sódica. Hay flujos transitorios por aumento y disminución de temperatura, pero menores de un orden de magnitud. El pH inicial de 8.5 tiende a aumentar con el tiempo, sobre todo después de los incrementos de temperatura, alcanzando valores de 9.6, que puede indicar mayor interacción con la muestra, así como quizá la liberación de carbonatos; el pH disminuye ligera y momentáneamente tras el aumento de temperatura. El contenido de agua final fue 19% superior, mucho mayor que el valor obtenido en la muestra anterior.

Tabla 7.1.8 Blanquiza 1.2.c 5 cm  
(con KCl al 80%; con colorante)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 4	3	*1	10.4	1.26 E-8	nd	Agua	
6 - 19	13	8	14.16 ± 1.26	3.24 ± 1.79 E-9	9.16 ± 0.06		
19						KCl 80%	
25 - 26	1	1	11.30	4.37 E-9	7.20**		*nd
50						Azul	
83 - 84	1	1	26.4	6.01 E-8***	8.38		*≥ 56%
84 - 88	4	3	25.77 ± 1.13	3.10 ± 1.41 E-8	8.49 ± 0.11		≥ 72%***

La temperatura varió ligeramente, sin cambios bruscos. Se observa un aumento gradual de la permeabilidad por efecto de la salmuera, que llega a ser un orden de magnitud mayor, el cual es amortiguado por el suelo. La salinidad sube gradualmente; el máximo valor de salinidad de salida coincide con el máximo aumento de permeabilidad. El pH es aproximadamente uniforme, y disminuye tras el intercambio del agua por la salmuera. Mediante el colorante, el cual actúa durante 38 días, se observó que el flujo no es lateral en su totalidad, sino que se tiene también un avance homogéneo, observado a través de un frente de mojadura azul (Fig. 6.1.D). El contenido de agua final es 3% menor que el inicial, lo que indica desecación de la muestra por efecto de la sal.

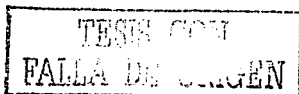


Tabla 7.1.9 Blanquiza 1.2.d 5 cm  
(con KCl 80% y temperatura; con colorante)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 2	1	*1	15.7	6.25 E-9	8.56	Agua	
2 - 9	5	4	15.6 ± 0.3	8.94 ± 1.3 E-9	8.33 ± 0.32 #3		
							KCl 80% ± Azul
9 - 12	3	1	15.0	1.38 E-8	7.12**		*nd
12 - 19	7	3	16.2 ± 1.2	1.25 ± 0.15 E-8	7.29 ± 0.17		nd
20 - 33	13	9	18.6 ± 1	1.33 ± 0.46 E-8	7.95 ± 0.46 #6		nd
33 - 34	1	1	*47	6.53 E-6***	nd		nd

En el momento de intercambiar el agua por la salmuera se nota un ligero aumento de permeabilidad acompañado de una disminución de pH. Esta prueba es de menor duración de la anterior, y se observa que al incrementar la temperatura la muestra no amortigua el efecto de la salmuera. El colorante se agrega al mismo tiempo que la salmuera, y tiene una interacción de 25 días; se observa prácticamente flujo lateral, posiblemente por el menor tiempo de interacción de la salmuera con la muestra (Fig. 6.1.E). El contenido final de agua fue menor en 3.5%, similar al de la prueba anterior, aunque con diferencias en el menor tiempo de prueba total y en el aumento de temperatura.

Tabla 7.1.10 Café 1.3.a  
(KCl 35% y temperatura; lavada)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
27 - 29	2	*1	11.4	2.62 E-9	nd	Agua	
36 - 58	22	9	14.59 ± 2.31	3.59 ± 0.62 E-9	nd		
89 - 110	21	14	49.9 ± 0.5	1.19 ± 0.53 E-8	8.44 ± 0.23 #7		
115 - 117	2	1	50.7	2.85 E-8***	7.85**		
							KCl 35%
127							
144 - 145	1	1	19	6.46 E-9	7.82**		nd
164 - 165	1	1	24.3	8.75 E-7	8.18		*27%
165 - 166	1	1	24.3	1.06 E-6***	nd		*28%
262 - 263	1	1	*49.9	2.54 E-5***	8.4		35%***
							Agua
289							
358 - 361	3	1	39.8	8.85 E-9	nd		0%
361 - 394	33	11	13.61 ± 1.39	1.06 ± 0.62 E-8	nd		0%

Se puede decir que esta muestra que es no expansiva, pero a diferencia de la blanquiza no presenta sensibilidad respecto del flujo ante cambios de temperatura con agua. El efecto de la salmuera no es inmediato y la muestra amortigua las variaciones de permeabilidad a temperatura ambiente, que llegan a ser dos órdenes de magnitud mayores, pero no al incrementar ésta. Después de que el efluente alcanza la concentración máxima se tiene una disminución; esto puede indicar un flujo lateral inicial y posteriormente a través de la muestra. El pH es aproximadamente constante; tiene disminución inicial con el KCl, quizá por flujo lateral o liberación de la acidez de reserva de la muestra. La muestra se recupera rápidamente con el lavado y regresa a valores similares a los de inicio. El contenido de agua final es 8 % superior; esta humedad

relativamente alta, y la tolerancia a los gradientes de temperatura pueden indicar que esta muestra contiene material con mayor capacidad de adsorción de agua que la Blanquizca.

Tabla 7.1.11 Morelos 1.4.a  
(con KCl 35% y cambios de temperatura; lavada)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
4 - 5	1	*1	19	2.16 E-8	nd	Agua	
53 - 63	10	8	48.51 ± 0.81	3.08 ± 0.53 E-8	8.82 ± 0.26 #4		
106 - 116	10	6	22.17 ± 3.67	3.23 ± 0.59 E-8	8.85 ± 0.3 #4		
116 - 117	1	1	*54	2.70 E-6***	7.41		
181						KCl 35%	
224 - 228	4	1	13.60	-4.06 E-8	6.14**		27% <sub>a</sub>
239 - 250	11	7	13.2 ± 0.2	-4.11 ± 0.12 E-8	6.91 ± 0.34 #5		34 ± 1% #2
250 - 251	1	1	*20.1	2.33 E-5***	7.05		35%
251						Agua	
323 - 326	3	1	15.1	-4.28 E-8	8.45		0% <sub>a</sub>

Se observa alta sensibilidad del flujo a los cambios de temperatura con agua; la sensibilidad es menor si la temperatura incrementada se mantiene más o menos constante, si se repite en corto tiempo el incremento o si éste es gradual. Al intercambiar el agua por la salmuera se observa una disminución de pH conforme aumenta la salinidad del efluente, mientras que la permeabilidad permanece constante, posiblemente por interacción con la muestra. Al incrementar ligeramente la temperatura se produce un mayor aumento de permeabilidad que los reportados con agua y mayor temperatura. La muestra se lava con agua y el pH y la permeabilidad tienden a valores similares a los del inicio de la prueba con agua. El contenido de agua final es sólo 0.85% superior.

Tabla 7.1.12 Morelos con anillo de BNa 1.4.b  
(con agua y cambios de temperatura)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido
3 - 4	1	1	18.8	2.31 E-8	nd	Agua
28 - 29	1	1	*52.6	1.04 E-7***	8.96	
45 - 46	1	1	57.6	1.31 E-8**	8.57	
57 - 79	23	16	18.74 ± 1.34	3.69 ± 0.52 E-8	9.15 ± 0.56	
88 - 95	7	6	56.3 ± 2.7	2.72 ± 0.1 E-8	8.64 ± 0.15	
98 - 99	1	1	20.5	5.28 E-8	8.61	

El confinamiento con el anillo de bentonita sódica disminuyó considerablemente el efecto de los gradientes térmicos en la permeabilidad. El pH tiene una ligera tendencia a disminuir tras una elevación de temperatura; en general, se mantiene constante. El contenido final de agua es ligeramente superior (3.3%).

TESIS CON  
FALSA DE CUGEN



Tabla 7.1.13 Morelos 1.4.c  
(con agua y cambios de temperatura; t = 10 cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido
8-9	1	*1	14	4.46 E-9	9.56	Agua
26-36	10	3	12.5 ± 0.5	1.94 ± 0.18 E-8	9.19 ± 0.06	
36-37	1	1	22.8	3.57 E-8	9.26	
37-38	1	1	*35.8	9.93 E-7	8.95	
170-171	1	1	18	2.42 E-8	8.97	
171-172	1	1	*43.1	2.65 E-6***	7.92	
178-222	44	27	18.01 ± 4.21	2.53 ± 0.41 E-8	9.11 ± 0.21 #26	
302-340	38	23	16.22 ± 33.72	2.69 ± 0.74 E-8	8.85 ± 0.09 #10	

El aumento de espesor en la muestra prácticamente no redujo la sensibilidad de ésta a los cambios de temperatura. El pH se conserva constante, tendiendo a disminuir al presentarse un aumento de flujo por temperatura. Con el colorante se observó flujo lateral al elevar la temperatura (Fig. 6.1.F).

Tabla 7.1.14 Morelos 1.4.d  
(con KCl 40 y 80% y temperatura; con colorante)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
5-9	4	*1	16.9	3.14 E-8	nd	Agua	
9-11	2	2	16.55 ± 0.05	6.15 ± 0.01 E-8	8.71 #1		
12						KCl 40%	
33-39	6	4	17 ± 0.2	8.09 ± 0.48 E-8	7.03 ± 0.07		39.5 ± 0.5% #2
40						KCl 80%	
40-43	3	1	17.40	8.44 E-8	6.95**		43%
96-134	38	19	12.57 ± 2.17	8.78 ± 1.66 E-8	7.74 ± 0.41 #17		77.33 ± 0.67% #6
134						Azul	
134-135	1	1	*42.4	4.04 E-6***	nd		78%***

La permeabilidad de la muestra se mantiene constante al interactuar con las salmueras y el pH disminuye gradualmente con el aumento de la salinidad del efluente, para luego mantenerse constante. Dicha muestra no amortigua el efecto de la sal combinado con la temperatura. Con el colorante actuando sólo un día se observó flujo lateral, sin grietas en la muestra. La humedad final es 11 % menor, indicativo de desecación por efecto de la sal, o combinación de ésta con la temperatura.

2) Muestras comerciales (sin capacidad apreciable de expansión)

Tabla 7.1.15 Caolinita 2.1.a  
(con KCl concentración creciente; temperatura; con colorante)

Tiempo	Días	# datos	T°C	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
2 - 3	1	*1	20.3	5.63 E-8	nd	Agua	
3 - 41	38	15	18.23 ± 3.63	1.30 ± 0.15 E-7	8.22 ± 0.37 #6		
43 - 45	2	1	*32	6.87 E-7***	7.36		
45 - 66	21	7	32.3 ± 1.1	1.20 ± 0.05 E-7	7.46 ± 0.14		
98 - 118	20	13	48.62 ± 3.62	1.53 ± 0.15 E-7	7.40 ± 0.34 #3		
120						KCl 35%	
142 - 143	1	1	54.60	1.77 E-7	6.55**		*5%
164 - 169	5	4	53.15 ± 0.35	1.54 ± 0.14 E-7	7.00 ± 0.22		20%
213 - 217	4	2	54.4 ± 0.4	1.48 ± 0.01 E-7	7.49 ± 0.03		35%***
217						KCl 45%	
234 - 238	4	2	52.85 ± 0.85	1.51 ± 0.01 E-7	7.36		40%***
239						KCl 70%	
241 - 242	1	1	*53.3	9.6 E-7***	6.67**		*63%
248 - 252	4	2	19.4 ± 0.2	1.80 E-7	7.35 ± 0.01		68% #1***
258						KCl 80%	
272 - 280	8	6	18.85 ± 0.65	1.85 ± 0.06 E-7	7.44 ± 0.13		80%***
280 - 281	1	1	44	7.97 E-7	7.21		80%
281 - 282	1	1	*50	1.85 E-6***	7.20		*80%
322 - 323	1	1	56.9	1.02 E-7	7.73		80%
324 - 325	1	1	58.8	1.44 E-6***	6.76**		*80%
345						Agua	
694 - 695	1	1	9.3	1.15 ± E-7	9.18		0%
701						KCl 80%	
702 - 706	4	1	18.20	1.59 E-7	7.20		33%
727 - 728	1	1	16.5	1.71 E-7	7.6		≥ 76%***
728						Azul	
728 - 730	2	1	*50	1.27 E-5***	nd		≥ 76%

Al principio de la prueba hay un flujo transitorio por efecto de la temperatura. La muestra presenta incrementos de permeabilidad, de un orden de magnitud, para concentraciones superiores a 70%. al aplicar gradientes térmicos, aunque el efecto no es inmediato. Se observan variaciones de pH ante los incrementos de permeabilidad.

Para una concentración del 80%, al mantener el incremento de temperatura la permeabilidad disminuyó a su valor anterior. El lavado con agua duró 350 días, y el pH final fue mayor que el inicial (esto puede indicar la transformación a un complejo alcalino). Después se volvió a tratar a la muestra con salmuera directamente al 80% durante 27 días a temperatura ambiente, disminuyendo el pH. Tras un aumento súbito de temperatura se da un incremento de permeabilidad de dos órdenes de magnitud. El colorante actúa por dos días y permite observar un flujo lateral y dos franjas que atraviesan toda la muestra, de manera continua y sin aparente agrietamiento de la muestra; dichas franjas coinciden con la ubicación de las dos resistencias utilizadas en este permeámetro en particular (Fig. 6.1.G). El contenido de agua final, de la parte central de la muestra, es 2.9% superior, pese al largo tiempo lavado con agua, previo a la prueba final con salmuera.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 7.1.16 Caolinita 2.1.b  
(KCl 80% sin temperatura; con colorante)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1-2	1	*1	16.5	2.76 E-8	nd	Agua	
7-16	9	6	16.1 ± 0.7	9.67 ± 0.53 E-8	8.64 ± 0.33		
16						KCl 80%	
23-27	4	4	16.7	1.03 E-7	6.85		33%
29-30	1	1	17	8.68 E-8	5.13		55%
42-43	1	1	13.7	1.16 E-7	4.61**		75%
77						Azul	
98-134	36	24	14.22 ± 3.52	1.01 ± 0.1 E-7	5.22 ± 0.68 #23		80% #7***

La muestra soporta la salmuera con una permeabilidad constante; el pH disminuye con la salmuera, casi inmediatamente; alcanza los valores más bajos para una salinidad de salida superior al 50%. Esta disminución puede deberse a que la muestra es sometida rápidamente a una alta concentración, por lo que el catión de la sal neutra se intercambia con el aluminio adsorbido o el H<sup>+</sup> y esto produce un aumento en la acidez (de reserva). El colorante actúa 57 días, ya con salinidades de salida superiores al 75%; un frente de mojadora azul uniforme permite notar un flujo homogéneo a través de la muestra (Fig. 6.1.H). El contenido de agua final, 8% inferior, indica desecación.

Tabla 7.1.17 Caolinita 2.1.c  
(con agua y cambios de temperatura; sin gráfica)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido
2-8	2	*1	14	5.61 E-8	8.61	Agua
9-16	7	4	13.75 ± 0.35	1.30 ± 0.19 E-7	9.21 ± 0.05	
19						Azul
19	1	1	46.5	7.29 E-8	9.07**	

Mediante el colorante, se observa sólo flujo lateral al elevar la temperatura, por lo que parece ser que el efecto combinado de temperatura y salmuera concentrada es lo que afecta la permeabilidad de la caolinita.

Tabla 7.1.18 Haloisita 2.2.a  
(con KCl 35% y cambios de temperatura; lavada)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	PH	Líquido	Salinidad
1-4	3	*1	19.5	1.11 E-7	8.19	Agua	
8-27	19	12	18.58 ± 1.18	1.81 ± 0.19 E-7	8.79 ± 0.41 #10		
37-57	20	14	37.69 ± 3.61	1.36 ± 0.09 E-7	8.35 ± 0.22		
63-65	2	1	*56.2	1.33 E-7	7.27**		
88						KCl 35%	
88-89	1	1	15.8	1.66 E-7	8.3		
95-96	1	1	16.70	2.90 E-7	6.90**		*14%
102-130	28	13	14.05 ± 1.15	3.24 ± 0.39 E-7	8.19 ± 0.7		32.77 ± 1.8%***
130-131	1	1	*50.8	2.51 E-5***	8.11		32%
132						Agua	
152-162	10	7	13.01 ± 1.99	2.65 ± 0.12 E-7	9.78 ± 0.22		0%

Al incrementar la temperatura en la prueba con agua, no se observó aumento por flujo lateral, sino antes bien una leve disminución, producto quizá de una diferencia de expansión térmica de los materiales. La muestra soporta el efecto de la salmuera a temperatura ambiente, con algunas disminuciones de pH al principio, pero no amortigua el cambio de temperatura, como se observa al aumentar súbitamente la permeabilidad. La permeabilidad vuelve a su valor anterior rápidamente durante el lavado y el pH aumenta notablemente, lo que puede indicar que hubo intercambio iónico y el material se volvió alcalino. El contenido de agua final fue 13.8% superior.

Tabla 7.1.19 Haloisita 2.2.b  
(con KCl 80% y cambios de temperatura; con colorante)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
2 - 5	3	*1	16.7	5.15 E-8	8.8	Agua	
6 - 9	4	4	16.83 ± 0.23	7.37 ± 1.03 E-8	8.2 ± 0.07		
9	1					KCl 80%	
15 - 19	4	1	13.50	1.21 E-7	7.39**		*29%
43 - 85	42	19	12.38 ± 2.62	1.00 ± 0.12 E-7	8.6 ± 0.41 #17		77.13 ± 1.87% #8
85						Azul	
85 - 86	1	1	*39	4.32 E-6***	nd		nd

Se observa que la salmuera no afecta la permeabilidad de la muestra, excepto al aumentar la temperatura. El pH disminuye ligeramente al principio por causa de la salmuera, pero posteriormente se recupera. El colorante sólo actúa al final; se observa flujo lateral y una franja (grieta) que atraviesa la muestra (Fig. 6.1.J), que coincide aproximadamente con la ubicación de la resistencia. El aumento de flujo implica que esta muestra es sensible al efecto combinado de salmuera y temperatura. El contenido de agua final de la muestra fue 15.7% menor, lo que implica su desecación.

#### Halosisita 2.2.c

(con agua y cambios de temperatura; t = 3 cm; con colorante; sin tabla ni gráfica)

La prueba dura sólo cinco días. Al aumentar la temperatura no aumentó el flujo. El colorante actuó un día y atravesó principalmente por el centro; no se observó flujo lateral en todo el espesor ni se presentaron franjas como en la muestra con salmuera y temperatura; la compactación puede ser menos uniforme en esta muestra debido al menor espesor (Fig. 6.1.K). El contenido de agua final fue 1% superior, lo que indica que la sola temperatura no fue suficiente para desecar la muestra.

Tabla 7.1.20 Atapulgita 2.3.a  
(con KCl 80% y cambios de temperatura)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
11 - 12	1	*1	16.7	7.61 E-9	8.74	Agua	
18 - 29	11	8	16.43 ± 4.17	1.39 ± 0.28 E-8	9.18 ± 0.06 #7		
40 - 42	2	1	*44.1	9.34 E-9**	9.28		
47 - 64	17	9	50.84 ± 2.24	2.34 ± 0.21 E-8	9.13 ± 0.55		
64 - 66	2	1	*16.50	5.10 E-8***	8.99		
89						KCl 35%	
209 - 222	13	9	50.84 ± 1.34	3.59 ± 0.56 E-8	8.83 ± 0.09		34% #1
228						KCl 50%	
281 - 288	7	5	52.02 ± 2.58	3.61 ± 0.1 E-8	8.71 ± 0.44		48.5 ± 1.5% #2
291						KCl 60%	
341 - 361	20	13	51.42 ± 1.78	3.57 ± 0.44 E-8	8.63 ± 0.14		60% #5
365						KCl 75%	
440 - 449	9	6	50.32 ± 0.78	3.03 ± 0.44 E-8	8.66 ± 0.08		75% #2
453						KCl 85%	
481 - 490	9	6	50.37 ± 1.13	2.29 ± 0.71 E-8	8.68 ± 0.08		80% #3***
497 - 501	4	1	16.6	2.47 E-8	8.68		80%
842						KCl 80%	
898 - 908	10	7	18.41 ± 1.21	1.89 ± 0.61 E-8	9.20 ± 0.13 #4		80%
908						Azul	
918 - 921	3	1	45.1	2.55 E-8	nd		80%

De los 921 días de prueba sólo se grafican los primeros 501. En pruebas con agua y temperatura no se detectan variaciones importantes. Presenta leve disminución o aumento de permeabilidad cuando, respectivamente, la temperatura aumenta o disminuye. Tras el intercambio de la salmuera por el agua, el pH inicialmente disminuye, y luego aumenta y se estabiliza, a menor valor que el inicial. Se hicieron pruebas con varias concentraciones gradualmente mayores, a temperatura ambiente y elevando ésta bruscamente, así como manteniendo por unos días dicho incremento, observándose que casi no cambia la permeabilidad ni el pH. La salinidad máxima que se probó fue de 85%. Después de 341 días de inactividad (sin carga) se reactiva la prueba con KCl al 80%; el pH tiende a subir. A los 66 días se pone colorante durante 13 días y se observa flujo por la muestra por medio de un frente de mojadura azul (Fig. 6.1.L). El contenido de agua final es 23.3% menor; no obstante, en comparación con las muestras anteriores, este material tiene una gran capacidad de adsorción de agua.

### 3) Bentonitas

Tabla 7.1.20 BCa-1 3.1.a  
(con NaCl al 5% y cambios de temperatura;  $t_f = 6.2$  cm)

Días	Tiempo	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
19 - 21	2	*1	19.5	7.52 E-9	nd	Agua	
21 - 25	4	1	19.5	5.97E-9	8.68		
26	1					NaCl 5%	
43 - 46	3	1	17.6	9.95 E-9	9.12		2%
63 - 85	22	14	14.86 ± 2.66	1.08 ± 0.25 E-8	8.05 ± 0.36 # 13		≥ 2%
74 - 75	1	1	14.1	1.15 E-8	6.06**		5%
75 - 85	10	7	13.83 ± 1.13	1.11 ± 0.22 E-8	8.06 ± 0.25		
104						Agua	
113 - 116	3	1	13.4	2.02 E-8	7.61**		3%
126 - 144	18	11	36.94 ± 1.14	1.27 ± 0.15 E-8	7.89 ± 0.2		5% #2***
153 - 154	1	1	37.2	1.59 E-8	7.9		≤ 5%

No presentan variaciones importantes de permeabilidad ante el flujo con la salmuera, ni al aumentar la temperatura. El pH tiende a disminuir al avanzar la prueba. La muestra se lavó 50 días aplicando incrementos de temperatura y el pH tiende a aumentar. El contenido de agua final fue 36.8% superior.

Tabla 7.1.21 BCa-1 3.1.b  
(con NaCl al 100% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 6$  cm)

Días	Tiempo	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
98 - 111	13	*1	22.2	2.40 E-10	nd	Agua	
153 - 161	8	6	52.37 ± 1.57	3.96 ± 0.9 E-9	8.34 ± 0.04 #2		
170	1					NaCl 100%	
253 - 254	1	1	23.3	2.94 E-5	7.74		77%
255						Agua	
275 - 276	1	1	18.4	1.29 E-8	7.83		51%
281	1					NaCl 20%	
363 - 366	3	1	44.2	7.95 E-9	7.53		20%**
363 - 377	14	5	43.34 ± 3.34	7.96 ± 0.07 E-9	7.59 ± 0.07		20% #1
378						NaCl 35%	
378 - 379	1	1	17.40	1.76 E-8***	7.71		≥ 20%
406 - 412	6	3	52.23 ± 0.97	9.44 ± 1.1 E-9	7.6 ± 0.04		34% #1***
413						Agua	
498 - 499	1	1	50.2	4.24 E-9	7.98		≤ 11%

Mostró baja permeabilidad con agua destilada. El aumento de la permeabilidad por la salmuera es alto, pero el efecto no es inmediato; el pH disminuyó respecto de los valores con agua. La permeabilidad disminuye rápidamente al lavar con agua; esto indica que el efecto en la muestra fue superficial. Soporta los aumentos de temperatura, tanto con agua como con salmuera al 35%; durante gran parte del lavado final se elevó la temperatura. El contenido de agua final es 54.2% superior.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TRABAJO CON  
FALLA DE URGENCIA

Tabla 7.1.22 BCa-1 3.1.c  
(con KCl al 35 y 40% y cambios de temperatura; lavada;  $t_i = 10$  cm;  $t_f = 11$  cm)

Días	tiempo	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
103 - 104	1	*1	41.6	4.18 E-9	nd	agua	
124 - 140	16	12	50.16 ± 0.94	1.35 ± 0.9 E-9	nd		
144			-	-		KCl 35%	
194 - 222	29	3	49.03 ± 0.97	< 1 E-10			0%
223			-	-		KCl 40%	
267 - 305	39	16	55.39 ± 3.69	2.05 ± 3.2 E-9	7.54 ± 0.56 #9		nd
307 - 308	1	1	53.6	4.73 E-5	7.21		*37%***
313						Agua	
371	1	1	33.2	1.21 E-7	nd		17%
376 - 377	1	1	34.2	5.87 E-9	nd		nd

La muestra es prácticamente impermeable con agua y a temperatura ambiente. Al elevar la temperatura los flujos son irregulares, y la permeabilidad asociada muy baja, por lo que es difícil determinar valores de pH del efluente. El efecto de la salmuera y la temperatura en el incremento de permeabilidad no es inmediato. La muestra se lava con agua, pero aunque el flujo disminuye la salinidad no llega a ser nula. El contenido de agua final es 17.1% superior.

Tabla 7.1.23 BCa-1 3.1.d  
(con LiCl al 30 y 35% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 8$  cm)

Días	Tiempo	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
50 - 54	4	*1	31.3	1.20 E-9	nd	Agua	
111 - 131	20	14	49.24	1.07 ± 0.24 E-8	8.03 ± 0.1		
133						LiCl 30%	
274 - 307	33	11	18.46 ± 1.16	6.55 ± 2.8 E-9	7.20 ± 0.51 #9		nd
312 - 313	1	1	*56.7	1.38 E-7	6.93		≥ 20%
313 - 314	1	1	57.2	3.14 E-7***	7.3		*28%***
333 - 334	1	1	56.2	1.31 E-8	6.27**		≥ 23%
334 - 335	1	1	56.2	1.21 E-8	6.82		≥ 23%
356						LiCl 35%	
378 - 379	1	1	*54.7	2.98 E-5***	6.31**		35%***
382 - 411	29					Agua	
406 - 410	4	1	13.5	7.31 E-8	nd		31%
410 - 411	1	1	14.1	6.92 E-8	nd		≤ 31%

La muestra tiene poco o nulo flujo a temperatura ambiente. Soporta una concentración de 30% con permeabilidad baja, y amortigua su aumento al incrementar la temperatura. Al elevar la concentración al 35% y aumentar la temperatura en forma gradual sobreviene el aumento de permeabilidad. La permeabilidad se reduce con el lavado, pero no regresa a los mismos valores obtenidos con agua y la salinidad no disminuye menos de 30%. El contenido de agua final fue 69.7% superior y presenta la mayor expansión respecto de las demás muestras.

Tabla 7.1.24 BNa 3.2.a  
(con NaCl 100% y cambios de temperatura, lavada;  $t_f = 7.5$  cm)

Días	Días	# datos	T°C	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
121 - 124	3	*1	29.8	1.31 E-9		Agua	
153 - 167	14	10	51.25 ± 1.25	7.34 E-9	8.31 ± 0.18		
176						NaCl 100%	
180 - 181	1	1	17	4.79 E-5***	7.91		*40%
181						Agua	
181 - 182	1	1	18.6	2.20 E-6			20%
182						NaCl 50%	
182 - 183	1	1	19.4	8.38 E-6	8.51		42%
184						Agua	
247 - 250	3	1	22.4	4.09 E-9	8.73		≤ 5%
252	1		23	5.57 E-9			
252						NaCl 20%	
282 - 285	3	1	19.2	2.71 E-6***	8.14		20%
285						Agua	
324 - 328	4	2	18.35 ± 0.05	1.18 ± 0.08 E-8	8.17 #1		≤ 2%

La salmuera al 100% tiene un efecto inmediato en la permeabilidad a temperatura ambiente; aun a menor concentración, 20%, se produce un aumento importante, el cual se magnifica al incrementar la temperatura. Posteriormente, la muestra se lava con agua destilada y se aplican aumentos de temperatura, lográndose disminuir parcialmente la permeabilidad y reducir la salinidad al 2%. El contenido de agua final es 16.8% superior.

Tabla 7.1.25 BNa 3.2.b  
(con KCl 40% y cambios de temperatura; sin gráfica;  $t_f = 8$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 64	63	*4	13.32 ± 3.08	< 1 E-10		Agua	
66						KCl 40%	
107 - 108	1	1	13.9	2.26 E-7	8.11		30%***
108						Azul	
108 - 109	1	1	14	7.82 E-6***	nd		nd

La muestra sufre un aumento de permeabilidad como consecuencia de la salmuera. Al día siguiente de agregar el colorante se observa flujo lateral en gran parte de la pared (Fig. 6.1.M). El contenido final es 52% mayor.

TOP COPY  
ORIGINAL



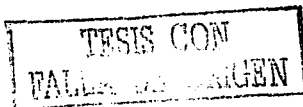


Tabla 7.1.26 BNa – geotextil 3.2.c  
(con KCl al 35% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 3.2$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	k [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 20	19	1	14.5	4.01 E-9	8.43	Agua	
37 - 51	14	6	14.75 ± 0.45	1.65 ± 0.15 E-8	8.56 ± 0.07 #2		
82 - 124	42	28	50.94 ± 0.94	1.58 ± 0.77 E-8	8.63 ± 0.39 #17		
169 - 209	40	28	47.61 ± 1.69	1.66 ± 0.43 E-8	8.37 ± 0.24 #12		
210 - 257	47	22	18.72 ± 1.42	2.13 ± 0.67 E-8	8.49 ± 0.55		
257						KCl 35%	
257 - 258	1	1	18.1	1.32 E-6	8.42		34%
258 - 259	1	1	18.5	5.84 E-5***	8.28		*35%***
259						Agua	
287 - 288	1	1	17.1	1.35 E-6	nd		0%
307 - 327	20	12	17.31 ± 1.11	7.43 ± 0.52 E-8	nd		0%

No se presentan aumentos de flujo por efecto de gradientes térmicos con agua; el pH tiende a un valor constante, disminuyendo un poco con el aumento de temperatura. La muestra súbitamente falla con la salmuera. El lavado es rápido debido a la baja interacción, lo que podría significar que el flujo fue principalmente lateral, aunque no se utilizó colorante en esta muestra. Al aumentar ligeramente la temperatura durante el lavado no se detectaron variaciones de flujo. La permeabilidad final es cerca de cinco veces mayor que la inicial. El contenido de agua final es 212.4% menor.

Tabla 7.1.27 Zeolita con BNa 3.3.a  
(con KCl al 35% y cambios de temperatura; lavada)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1-33	32	1	19.6	3.42 E-9	nd	Agua	
113 - 131	18	8	18.55 ± 1.25	4.27 ± 1.44 E-9	8.40 ± 0.12 #5		
132 - 148	16	12	62.21 ± 3.31	1.08 ± 0.51 E-9	8.48 ± 0.47 # 8		
152						KCl 35%	
159 - 160	1	1	17.8	3.77 E-7	7.32		7
161 - 162	1	1	17.4	1.80 E-6***	7.64		*32***
181						Agua	
202 - 203	1	1	27.2	4.07 E-5	nd		0
210 - 214	4	2	17.9	1.33 E-8	nd		0

La elevación de temperatura no causa aumento de flujo con agua. El efecto de la sal en la muestra es inmediato. El pH disminuye al aumentar el flujo con la salmuera. Durante el lavado la permeabilidad disminuye, pero a diferencia de la muestra sola de BNa, en esta mezcla se observa sensibilidad al aumento de temperatura, aun cuando la salinidad de salida es nula. No presenta expansión. El contenido de agua final es 7% superior.

El sodio de esta zeolita debe haber sido intercambiado por el potasio, que es de mayor dimensión, con lo que disminuiría el tamaño de su poro. No obstante, para la concentración utilizada ( $>1$  mol  $kg^{-1}$ ), la adsorción de sales neutras en la zeolita debe ser considerable, lo que quizá afecte en la reducción del contenido de agua; además, la bentonita con la que está mezclada pudo ser contraproducente al disminuir su expansión.

Tabla 7.1.28 Volclay CS 50 3.4.a  
(con KCl al 35% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 10$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K	pH	Líquido	Salinidad
124 - 127	3	*1	54.2	4.17 E-9	7.93	Agua	
158 - 171	13	8	52.81 ± 2.01	1.61 ± 0.2 E-8	7.90 ± 0.55 # 7		
176						KCl 35%	
236 - 239	3	1	48	9.47 E-8	7.12		12%
243 - 246	3	1	12.9	6.74 E-5***	8.40		*30%***
246						Agua	
414 - 417	3	1	14.6	1.37 E-8	7.26		≤ 8%

La muestra es prácticamente impermeable a temperatura ambiente y con agua. Al interactuar con la salmuera, la muestra no presenta aumento de permeabilidad de manera inmediata, ni al elevar la temperatura, sino incluso después de disminuir ésta. No obstante el lavado, la salinidad no llega a hacerse nula, aun cuando la temperatura no produce aumentos de permeabilidad durante el lavado. Debido al escaso flujo se tiene gran dispersión en los valores de pH. El contenido de agua final es 353% superior.

Tabla 7.1.29 Volclay - Geotextil 3.4.b  
con KCl 40% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 5$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 8	7	1	17.4	1.65 E-8	nd	Agua	
141 - 160	19	12	52.45 ± 1.15	1.62 ± 0.23 E-8	8.25 ± 0.32		
162 - 182	20	12	23.53 ± 1.17	1.14 ± 0.18 E-8	8.49 ± 0.47 #5		
182						KCl 40%	
183 - 184	1	1	22.90	5.23 E-5***	8.59		*40%***
188						Agua	
237 - 239	2	1	18.5	3.44 E-8	8.15		0%
241 - 311	70	32	18.43 ± 1.33	2.87 ± 0.69 E-8	9.05 ± 0.32 #11		0%
311 - 322	11	7	54.83 ± 1.07	1.88 ± 0.39 E-8	nd		0%

La muestra presenta un fuerte aumento al poco tiempo de interactuar con la salmuera. El pH no tiene un cambio notable al aumentar la permeabilidad. Para una concentración ligeramente mayor soporta menos tiempo que la anterior muestra antes del aumento en el flujo. El rápido lavado con agua implica que la arcilla casi no tuvo interacción con el electrólito. La permeabilidad retorna a valores similares a los anteriores, incluso al aumentar la temperatura. El pH registrado al final puede estar relacionado con el intercambio de potasio en el complejo de cambio. El contenido de agua final disminuye en 171%.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 7.1.30 Volclay CRC 3.5.a  
(con KCl al 80% y cambios de temperatura; lavada; con colorante;  $t_f = 10$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K	pH	Líquido	Salinidad
1 - 132	131	*1	55.8	3.06 E-9	9.19	Agua	
161 - 174	13	8	54.96 ± 3.36	1.23 ± 0.36 E-8	7.66 ± 0.36 # 7		
202						KCl 35%	
364 - 365	1	1	*44.8	3.43 E-6***	7.89		*34%
477 - 482	5	1	17.2	8.41 E-8	7.99		35%***
494						Agua	
607 - 615	8	5	51.5	4.85 ± 1.72 E-9	8.38 #2		≤ 22%
616 - 622	6	4	14.58 ± 5.02	< 1 E-10	-		-
637						KCl 40%	
659 - 691	32	15	17.63 ± 2.13	1.39 ± 1.28 E-9	nd		nd
693 - 706	13	5	36.56 ± 1.46	2.65 ± 1.61 E-9	nd		nd
714						KCl 60%	
755 - 756	1	1	23	1.6 E-6	7.75		50%
770 - 774	4	1	19.2	3.73 E-7	8.00		56%***
775						KCl 80%	
775 - 776	1	1	19.2	2.09 E-6	7.93		63%
776 - 777	1	1	20	4.12 E-6	7.59		72%
777 - 778	1	1	19.3	6.99 E-6	nd		78%***
778 - 781	3	1	19.3	3.01 E-5***	7.63		70%
781						KCl reciclado	
781 - 787	6	6	19.3	9.03 E-5	7.83 ± 0.2		70%
809						Agua	
873 - 874	1	*1	16.5	1.39 E-8	8.41		28%
1009 - 1023	14	8	15.54 ± 1.26	1.38 ± 0.3 E-9	nd		≤ 28%
1023						KCl 80% + Azul	
1026 - 1027	1	1	*53	4.42 E-5***	7.35**		70%

Prácticamente impermeable con agua. La muestra sufre contracciones a partir de la concentración más baja, pero logra amortiguar los efectos de la salmuera e incluso del aumento de temperatura, aunque éste no se sostuvo por mucho tiempo. La muestra presentó fuertes aumentos para concentraciones mayores de 70% y no se recuperó; los incrementos de permeabilidad fueron superiores a los 3 órdenes de magnitud. El experimento continuó durante 2 semanas, bajo las mismas condiciones y con resultados similares. Finalmente, se utilizó nuevamente un flujo de agua, obteniéndose inmediatamente menores permeabilidades. Por el escaso flujo se tiene gran dispersión del pH; se nota su disminución ante aumentos de flujo. El colorante sólo actúa unos días, al final de la prueba, y señala flujo lateral a través de la pared (Fig 6.1.N). El contenido de agua final es 149% superior.

Tabla 7.1.31 Geotextil Volclay-CRC 3.5.b  
(con KCl al 60% y cambios de temperatura; lavada;  $t_f = 6$  cm)

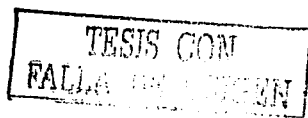
Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 4	3	*1	17.6	1.03 E-8	nd	Agua	
17 - 27	10	8	62.54 ± 0.34	1.18 ± 0.29 E-8	9.15 ± 0.08 #6		
27 - 59	32	14	18.4 ± 0.9	5.73 ± 3.07 E-9	9.17 ± 0.26 #8		
59						KCl 35%	
193 - 201	8	7	51.87 ± 3.43	1.21 ± 0.26 E-7	8.08 ± 0.17		33.29 ± 0.71%
204 - 218	14	10	13.74 ± 1.26	7.35 ± 0.32 E-8	8.18 ± 0.04 #7		33.5 ± 0.5% #4
218						KCl 50%	
330 - 338	8	6	52.33 ± 1.93	2.61 ± 0.1 E-7	8.07 ± 0.3		50%
344	1					KCl 60%	
354 - 379	25	14	15.85 ± 2.95	2.80 ± 0.19 E-7	8.11 ± 0.33		60%
379 - 380	1	1	*48.8	4.63 E-6***	7.26		60%
400						Agua	
438 - 446	8	1	17.5	4.3 E-8	8.67		0%
450 - 451	1	1	11.40	3.50 E-8	8.60		0%

Esta muestra demuestra que el geotextil ayuda a soportar los cambios de temperatura. El geotextil con la bentonita presenta menos variaciones de permeabilidad y soporta hasta una concentración del 60%, pero presenta un súbito aumento de permeabilidad al elevar la temperatura. El valor del pH disminuye inicialmente, tras el tratamiento con 35%, y luego se mantiene más o menos constante. Los menores valores de pH coinciden con el aumento de permeabilidad. El pH aumenta al lavar la muestra. La permeabilidad tiende a ser menor, pero con un valor seis veces mayor que el inicial con agua.

Tabla 7.1.32 BC'a-2 3.6.a  
(con KCl 40%; sin gráfica)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1 - 77	76	*1	15.85 ± 0.25			Agua	
77	1					KCl 40%	
77 - 86	9	6	11.63 ± 1.27	4.52 ± 2.37 E-9	nd		nd
90 - 91	1	1	14.7	2.64 E-6	8.22		32%
92						Azul	
92 - 97	5	4	14.78 ± 0.22	2.42 ± 0.79 E-6	nd		40%***

El colorante confirma flujo lateral y, en la parte superior, un flujo que penetra por la orilla entre capas compactadas (Fig. 6.1.O). Este flujo incipiente por entre las capas es más notable en una prueba alternativa en un embudo, con los mismos materiales pero con un mucho menor gradiente hidráulico (Fig. 6.1.P). El contenido de agua final es 10.6% superior.



TESIS CON  
FALLA DE CUBIEN

Tabla 7.1.33 BCa-2 3.6.b  
(con KCl 60%; sin gráfica;  $t_i = 3$  cm;  $t_f = 4.3$  cm)

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1-4	3	*1	10.7	2.06 E-9	8.47	Agua	
4-5	1	1	11	2.17 E-9	8.39		
6-8	2	2	13.8 ± 0.2	7.14 ± 0.04 E-10	nd		
8	1					KCl 60%	
13-15	2	1	14.4	1.45 E-7	7.70**		nd
15-18	3	1	14.4	5.84 E-6	8.07		nd

Con el colorante se observa flujo lateral en todo el espesor; las pequeñas manchas azules en la superficie se deben al contacto con la arena impregnada de colorante, pero no tienen continuidad (Fig. 6.1.Q).

Tabla 7.1.34 BCa-2 3.6.c  
(con KCl 40% y cambios de temperatura; con colorante; lavada; reutilizada;  $t_f = 6.5$ )

Tiempo	Días	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1-2	1	*1	16.7	7.69 E-9		KCl 40%	
2-5	3	1	15.4	1.86 E-8	9.96		nd
6-7	1	1	16.8	6.69 E-6	9.78		40%***
9-22	13	9	13.42 ± 3.98	6.28 ± 4.09 E-5	8.83 ± 0.46		40%
28						Agua dulce	
65-69	4	2	16.1	1.70 ± 0.06 E-8	9.65 #1		≤ 5%
69						KCl 40% ± Azul	
69-70	1	1	47.2	1.95 E-7	nd		nd

Se da un aumento inmediato de la permeabilidad, tanto a temperatura ambiente como al elevarla. El pH disminuye, junto con el incremento inmediato. Durante el lavado, la permeabilidad no es afectada por el aumento de temperatura, sin embargo, sí se nota un incremento de la permeabilidad al volver a tratar la muestra con salmuera y temperatura. Con colorante se observa flujo lateral, pero no en toda la profundidad, además de ligeras penetraciones por entre las capas compactadas (Fig. 6.1.R).

Tabla 7.1.35 BCa-1 3.7.a  
(con KCl 40%; sin gráfica)

Días	Tiempo	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
1-2	1	*1	18	1.4 E-7	8.02	Agua	
5-13	8	6	16.72 ± 1.28	3.48 ± 1.99 E-8	8.6 ± 0.2 #5		
13						KCl 40%	
15						Azul	
15-20	5	1	16.7	2.56 E-7***	8.55		*38%***

El alto flujo inicial con agua puede indicar una defectuosa compactación, o con una humedad del lado seco; el flujo se reduce y el pH aumenta conforme la prueba avanza. Al intercambiar la salmuera el pH disminuye ligeramente de momento, y el flujo aumenta un orden de magnitud, pero entonces el pH prácticamente no disminuye, lo que podría ser

por el paso de la salmuera a través de la muestra. El colorante indica que el flujo es parcialmente lateral y por el centro. La humedad final es 1 % inferior.

El aumento de flujo se notó en las paredes del permeámetro aproximadamente a las 2 h de iniciado el experimento, pero no en toda la profundidad. Al día siguiente sólo se observa un avance a lo largo de toda la pared sólo en una zona de la muestra, aunque el colorante todavía no aparecía en el efluente (Fig. 6.1.S). Se procedió a destapar el permeámetro y se observaron manchas al centro de la muestra en la parte inferior cubierta todavía por arena (Fig. 6.1.T). Se observó que esta mancha continuaba hasta la parte superior, con algunas ramificaciones hacia las paredes (Fig. 6.1.U).

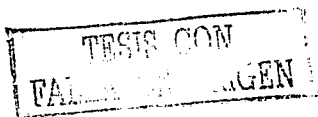
La BCa-3 podría dar idea de un valor de permeabilidad más real por efecto de la salmuera. La diferencia con otras arcillas podría ser la compactación del lado seco, alguna característica en la mineralogía de esta arcilla (menor cantidad de carbonatos), el efecto de gradiente hidráulico y de sal, o combinación de varios factores.

Tabla 7.1.36 B Ca-3 3.7.b  
(con KCl al 60%;  $t_i = 3$  cm;  $t_f = 4$  cm)

Días	Tiempo	# datos	T [°C]	K [cm/s]	pH	Líquido	Salinidad
10 - 13	3	*1	15.1	1.52 E-8	7.73	Agua	
13 - 14	1	1	15.4	2.57E-8	8.72		
14						KCl 60%	
21 - 22	1	1	15.2	3.99 E-7	6.97 E-8**	Azul	44%
22 - 23	1	1	15.7	1.35 E-6***	7.18		57%****

Se observa un aumento gradual de permeabilidad y disminución del pH al aumentar la salinidad de salida; aunque el espesor es menor y la concentración es mayor que en la muestra anterior, no se repitió el flujo por el centro. El colorante se agrega al final y se detecta flujo lateral todo el espesor (Figura 6.1.V). El contenido de agua es 12.4% superior.

En las últimas figuras, 6.1.31 y 6.1.32 (sin tablas), se puede ver el efecto de primera exposición, así como el mayor efecto del electrólito 1:1 no indiferente como lo es el KCl. La prueba comienza con dos pastillas de la misma muestra (BCa-1) expuesta desde un inicio a los dos cloruros, de sodio y potasio, respectivamente, con una misma concentración molar inicial (aproximadamente 0.85 M). El primer flujo y los mayores incrementos los manifestó la muestra contaminada con KCl. Otro aspecto interesante es que, en la muestra con NaCl, para una concentración tan alta como 51%, aproximadamente 13% en peso, la muestra amortigua con el tiempo el efecto de la salmuera a altas temperaturas.



### 7.1.1 Comentarios generales de los resultados

Se observaron cambios significativos de permeabilidad con agua atribuidos sólo al efecto del aumento de temperatura, lo que fue más notable en muestras que contienen ilita (Blanquizca) y en un suelo clasificado como andosol (Morelos), así como en menor proporción en una caolinita y en una muestra nativa que contiene haloisita y esmectita, entre otros componentes arcillosos (Zamora), donde se presentaron incrementos de permeabilidad hasta de dos órdenes de magnitud, no explicables por el cambio de viscosidad del fluido. Como se pudo comprobar con ayuda del colorante en algunas muestras (Blanquizca, Morelos y Caolinita), la razón es que el índice de expansión térmica de estos materiales y el del acrílico son diferentes, o bien, cuentan con propiedades de aislamiento térmico (alto contenido de micas), por lo que al incrementarse súbitamente la temperatura se presenta un flujo lateral extraordinario entre la muestra y la pared del permeámetro; sin embargo, faltó realizar una prueba con el colorante en la muestra Zamora que contiene haloisita, mineral susceptible de deshidratarse fácilmente. Asimismo, es posible que el calentamiento ocasione una disminución de volumen en materiales poco compresibles, lo que facilita el drenaje lateral; en las muestras Blanquizca y Morelos se disminuyó notablemente dicho flujo al confinarlas mediante un anillo de bentonita sódica. En general, el aumento de flujo por gradiente térmico es transitorio y disminuye con el tiempo, lo que se puede explicar por un reajuste de la estructura del suelo; en algunas muestras, el tiempo contribuye a un mayor grado de saturación del material, a su acomodamiento o, si es el caso, ligera expansión. Los valores de pH que acompañan al aumento del efluente son parecidos a los del agua, lo que significa que se filtró muy rápidamente y que tuvo un escaso contacto con el suelo, generalmente porque migró principalmente por la pared del permeámetro. Por otra parte, faltaron hacer pruebas con menores gradientes hidráulicos, con el objeto de evaluar su efecto en los aumentos de flujo con temperatura.

Algunos especímenes no presentaron cambios en su permeabilidad al agua al incrementar la temperatura, pero sí los tuvieron al estar expuestos a la salmuera, tal es el caso de la Café, Haloisita, la mezcla de Zeolita con BNa y todas las bentonitas; esto indica que el efecto de la solución electrolítica afecta su estructura al elevarse la temperatura. En muestras con bajo potencial de expansión, el aumento de permeabilidad con salmueras e incrementos de temperatura fue hasta de tres órdenes de magnitud, mientras que en aquéllas con montmorilonita los valores fueron aún mayores.

A temperatura ambiente, las muestras Morelos, Caolinita y Haloisita no presentaron cambios en su permeabilidad ante altas concentraciones de salmuera de KCl (80%). La Blanquizca también se expuso a estas concentraciones y sólo manifestó incrementos marginales con el tiempo. Asimismo, la muestra Café amortiguó el impacto inicial de la salmuera de KCl al 35%. Las pruebas con salmueras de KCl a temperatura ambiente parecen alcanzar un estado estable durante el tiempo registrado solamente en especímenes como Morelos, Haloisita, Caolinita, Atapulgita y GCL con Volclay CRC. En general, el incremento de permeabilidad en estos especímenes fue nulo o menor que en los otros.

Las muestras que tuvieron mejor comportamiento como impermeabilizante al interactuar con salmueras a temperatura ambiente fueron las que están compuestas por minerales del tipo de la atapulgita, caolinita e ilita, es de decir, de bajo potencial de expansión; en estas arcillas se observa un cambio más gradual de la salinidad del efluente, en comparación con las muestras que contienen esmectita. Las muestras con altos contenidos de carbonatos y óxidos de hierro presentaron mayor capacidad de amortiguamiento, como se refleja por valores de pH estables. Por el contrario, los especímenes compuestos por esmectitas, e incluso mezclas de éstos con una zeolita, que había presentado características notables de estabilidad (tabla 5.1.9), presentan susceptibilidad al flujo con salmueras, debido a que su capacidad de expansión se anula por altas salinidades, presentando caminos preferenciales a través de todo su espesor y área transversal como consecuencia de fenómenos explicados en parte por la acción de fuerzas electrostáticas.

La muestra Zamora tuvo una gran susceptibilidad al exponerse, a temperatura ambiente, a salmueras de KCl en concentraciones mayores o iguales a 35%, e incluso con salmuera de NaCl. Esto se verificó en varias pruebas, incluida una efectuada en otro tipo de permeámetro de carga variable; la menor permeabilidad obtenida en la respectiva prueba de pared flexible se atribuye a la considerable presión de confinamiento. La prueba con el líquido colorante trazador confirmó la existencia de caminos preferenciales en varias zonas de la muestra, además de la pared. A diferencia de la muestra tratada con KCl, en la pastilla tratada largo tiempo con NaCl se observaron por medio del colorante varias fisuras en diversas zonas, a través de las cuales ocurrió el flujo; estas diferencias pueden depender del tipo de sal y del efecto de envejecimiento, lo que podría ser crítico a largo plazo y causar inestabilidad en revestimientos y taludes, respectivamente.

La composición mineralógica del suelo influye en variaciones de permeabilidad por aumentos de temperatura. La posibilidad de un microfisuramiento en muestras con límites líquidos cercanos al contenido óptimo de humedad no se aplica en general, sino que depende del tipo de coloides, su capacidad aislante, y de la presencia de cementantes y de su solubilidad con la temperatura; si no fuera así, este microfisuramiento no sólo habría ocurrido en la Haloisita. Lo observado en la muestra de Haloisita y sobre todo en la de Caolinita podría ser un fenómeno parecido a la transmisión de líquidos calientes en la cerámica, con la diferencia de que en estas pruebas las partículas de arcilla tienen un arreglo que es poco permeable al agua caliente, pero que permite el paso de la salmuera caliente. Este efecto parece deberse a la concentración que generó la resistencia cerca de la muestra, lo que se comprueba por la correspondencia entre el número y localización de las franjas marcadas por el colorante y de resistencias del permeámetro. En pruebas posteriores con la Caolinita se observó mediante el colorante que con el tiempo el avance del flujo abarcaba la muestra entera. El efecto de la salmuera y la temperatura en muestras como la Caolinita y la Haloisita puede deberse solamente a un calentamiento excesivo de la muestra por la cercanía de la resistencia, sin embargo, dicho efecto no se reprodujo al repetir la prueba con agua y temperatura ni se notó en muestras expansivas, donde incluso la resistencia estaba aun más cercana a la pastilla de suelo, ni tampoco en muestras compuestas predominantemente por otro tipo de arcillas (ilita), minerales accesorios, o con ciertos contenido de carbonatos y quizás otros cementantes inorgánicos, como



sulfatos, sílice y óxidos e hidróxidos de Fe. El fenómeno de un acoplamiento de gradientes, en este caso, la termoósmosis, puede ser relevante.

Según se vio en el capítulo 3, la sinéresis debe ser principalmente un proceso de contracción química que no ocurre si existe suficiente vinculación en la interfase gel-matriz, al menos en un corto plazo y si no se incrementa la temperatura. Lo anterior podría tener relación con los efectos observados en las muestras de Zamora expuesta varios años a altas concentraciones de NaCl y gradientes térmicos, así como con las muestras de Caolinita y Haloisita que presentaron franjas en zonas cercanas a mayores gradientes de temperatura y sal. La muestra Haloisita no es afectada por el aumento de la temperatura del agua, quizá porque este incremento no sea suficiente para producir una deshidratación, o bien, se trata de una haloisita deshidratada; además, tiene mucho material cementante, a diferencia de la de Zamora, que también tiene haloisita. No obstante, la sal y el gradiente de temperatura sí la afectaron, posiblemente por una combinación de la disolución del cementante y deshidratación de la muestra. Cabe recordar que el calentamiento de un sol favorece la floculación. La formación de un gel se puede considerar como una precipitación incompleta de un sol. Al calentar un gel disminuye el componente líquido, por lo que el material se encoge en forma considerable y es difícil evitar la formación de espacios vacíos y otras imperfecciones (proceso sol-gel). Este fenómeno podría explicar el comportamiento de la Caolinita y la Haloisita afectadas por gradientes de sal y temperatura. Las condiciones de exposición de la muestra Zamora pueden haber transformado el estado inicial de gel poco rígido (hidrogel) a uno más rígido (xerogel); en lo anterior debe considerarse el efecto del acoplamiento de gradientes.

Todas las muestras de bentonita presentaron aumentos de flujo por efecto de las salmueras; esto se observa por los súbitos incrementos de concentración en el efluente y disminución de pH. En algunas muestras, como la BNa, y Volclay CS 50 existe un impacto inmediato de la salmuera en la permeabilidad, mientras que en otras el cambio es menos brusco y a veces atenuado con el tiempo; asimismo, en otras muestras la temperatura es un factor adicional que provoca, o al menos acelera, el aumento de flujo. Para bajas concentraciones, el aumento llega a ser amortiguado, incluso al aumentar la temperatura. La diferencia entre las distintas bentonitas probadas puede deberse a que en las bentonitas sódicas el impacto es inmediato, pues éstas forman tactoides y cuentan con un mayor espesor de doble capa respecto de las cálcicas, mientras que en éstas son más importantes las reacciones de intercambio de iones, y que por contar con más sitios de canje en las entrecapas son más lentas. Por ello, se sugiere no descartar el empleo de la Zeolita, pues la falla se atribuye al efecto en la bentonita con la que se mezcló; las propiedades de estabilidad de esta muestra, así como de las zeolitas en general hacen atractivo investigar su empleo, quizá mezclada con otra arcilla menos activa. Por lo que respecta a la muestra Volclay CRC, aunque es sódica, el factor que le confiere mayor estabilidad es la adsorción de los polímeros con la que está tratada, lo que por una parte modifica la carga neta de la partícula y por otra aumenta la repulsión electrostática; no obstante, cuando la respectiva muestra compactada tuvo un flujo de KCl con una

concentración mayor del 70% la permeabilidad no disminuyó con el tiempo, sino sólo después de lavar la muestra.

Excepto las bentonitas compactadas, todas las muestras se pudieron lavar, aparentemente, del exceso de sal en los permeámetros, incluso la mezcla Zeolita-BNa; en algunas muestras se midió un pH más alcalino, lo que es evidencia del intercambio iónico. En pruebas de permeabilidad, tanto con agua como con salmueras, las permeabilidades de las muestras disminuyeron y en algunas de ellas regresaron a valores similares a las condiciones iniciales de prueba al disminuir la temperatura y regresar a flujo con agua, respectivamente. Esto se explica en parte por la recuperación de las fuerzas de repulsión, y por otro lado a que el enfriamiento favorece la expansión de los suelos cohesivos, o al menos la recuperación de su volumen original, y además que el aire salga de solución y obstruya los poros; además, como se comentó anteriormente, los fenómenos de transformación de energía no son completamente reversibles. En pruebas donde sólo se utilizaron salmueras a temperatura ambiente, se aplicaron incrementos de temperatura durante el lavado final, lo que permite suponer el efecto que se tendría, sólo que a menores concentraciones, por supuesto, al combinar los dos parámetros.

Como se comentó anteriormente (7.2.2), las muestras compactadas que incrementaron en mayor medida su humedad final fueron aquéllas con contenido significativo de esmectita; algunas muestras presentaron un contenido menor por efecto de la temperatura y/o la sal, sobre todo si no se lavaron previamente con agua, como la Blanquizca, Haloisita, Morelos y Atapulgita y las muestras correspondientes a los geotextiles; la capa inferior de material permeable (arena) no saturado pudo facilitar la desecación.

En los geotextiles, donde la arcilla tiene un mayor contenido de agua inicial respecto de las muestras compactadas, la desecación es mucho más marcada. Entre los geotextiles utilizados, la muestra de bentonita sódica tratada con polímeros presentó el mejor comportamiento. Las bentonitas tratadas (Volclay CRC) presentan menores incrementos de permeabilidad trabajando junto con los geotextiles; es posible que estos últimos contribuyan a reducir el efecto de contracción provocado por las salmueras, sobre todo al presentarse un aumento de temperatura. Para concentraciones iguales, el geotextil con Volclay CRC tuvo una permeabilidad menor que la respectiva muestra compactada. No obstante, los geotextiles no tuvieron el mismo comportamiento al ser sometidos a un efecto de primera exposición, presentando aumentos inmediatos de permeabilidad, lo que se atribuye a que a diferencia de los suelos compactados, en los geotextiles el sellado depende de la máxima expansión de sus minerales, la cual es inhibida por causa de una alta concentración de sales disueltas. Esto confirma la necesidad de una prehidratación de la arcilla con agua dulce antes de someter a la muestra a un ambiente salino.

Al comparar el comportamiento de los geotextiles respecto de los suelos compactados se puede verificar la presencia de iones formadores de complejos de superficie, y que la reducción de la carga neta es la propiedad determinante para una rápida coagulación, ya que la concentración que causó el aumento de permeabilidad fue menor y actuó más rápido con la reducción de la concentración coloidal en los GCL.

En general, la arcilla más estable al trabajar en condiciones no isotérmicas y ante altas concentraciones de sales fue la Atapulgita. Al no desarrollar un gran espesor de la doble capa no se ve fuertemente afectada por su brusca disminución, y tiene en cambio gran capacidad de absorción de agua, lo que por otra parte minimiza el efecto de la solvatación, asimismo, la paligorskita tiene el mayor valor de potencial de Stern, lo que ayuda a prevenir la agregación por desolvatación. La atapulgita se probó con altas concentraciones de KCl cerca de 1000 días, algunos de ellos con temperaturas de 50°C, y la mayoría aplicando gradientes hidráulicos cercanos a 40.

Las pruebas con el trazador mostraron la existencia de caminos preferenciales en el espécimen. El líquido colorante se observó principalmente en algunas áreas específicas, como la pared de la muestra. Sin embargo, también se encontraron conductos coloreados en varias secciones transversales en toda la profundidad de la muestra. Esto ayuda a determinar si la permeabilidad es la del conjunto muestra-pared o pared principalmente. El colorante aparece en los permeámetros en zonas centrales del acrílico, correspondientes a costuras, alrededor de la muestra y en las entrecapas de algunas de ellas: bentonitas, Morelos y Blanquizca, respectivamente; también a través del suelo y por el centro (Zamora y BCa-3) y en franjas (Caolinita y Haloisita). El colorante en las entrecapas y grietas puede revelar la importancia del tipo de compactación. Una compactación defectuosa, del lado seco, o quizá por ser del tipo dinámica, con golpes alrededor, y al centro, marcan zonas de menor resistencia o simplemente de frontera que para el flujo representan caminos más fáciles de transitar. El colorante marca las trayectorias del flujo en función del tiempo y condiciones con que se le esté aplicando, por lo que durante el desarrollo de la prueba puede ser que los trayectos hayan sido otros distintos de los de la condición final.

Por lo que respecta al comportamiento de pastillas, en ninguna de las pruebas se detectó migración de partículas en los efluentes, aunque la mayoría de las muestras y la arena utilizada como base cumplían con los criterios de filtros. En general, se observó que las muestras que presentaron expansión, ésta fue inversamente proporcional a su espesor y fue mayor en el centro de la pastilla; ésta expande más rápidamente mientras menor sea el espesor. Ya que el líquido permeante empleado en las pruebas es rico en un catión en particular, la muestra tiende a volverse homoiónica, empezando en la parte superior. Esto se pudo observar en las bentonitas, donde el colorante marcó principalmente la parte lateral superior. Asimismo, el mayor espesor al centro crea un gradiente relativamente mayor en las orillas que favorece el flujo lateral, a diferencia de otros dispositivos empleados para determinar las variaciones de permeabilidad y trayectorias de flujo. En pruebas más parecidas a las de primera exposición, el tiempo para que se expanda es más corto, sobre todo si la muestra tiene menor contenido de agua que el óptimo, como pudo haber sucedido en la muestra BCa-3, donde el flujo ocurrió también por el centro de la pastilla, lo que se atribuye a una deficiente compactación, quizá con un bajo contenido de agua que originó una mayor succión, así como a un menor contenido de cementante (carbonatos). Esto también concuerda con pruebas de pastillas compactadas en embudos donde el gradiente es muy pequeño y el flujo no fue sólo lateral.

La sensibilidad a la temperatura y salmuera en muestras con baja o nula expansión se atribuye a la solvatación que afecta el coeficiente de actividad de la solución, aumentando el efecto de los iones por una concentración efectiva mayor, y reduciendo la hidratación de las muestras, lo que se acentúa por efecto de la temperatura; esto se refleja en contenidos de agua finales menores que los iniciales. En muestras que presentan expansión se observa que los contenidos de agua finales, en general, son mayores que los iniciales, por lo que se puede deducir que el efecto de la sal es menor y toma más tiempo que en muestras con menor capacidad de absorción de agua; lo que rige es el efecto de reducción de la doble capa por alta concentración iónica, que se refleja en la contracción y flujo predominantemente lateral.

Al aumentar de concentración, las propiedades coligativas cambian y la actividad de las sales inorgánicas puede aumentar la tensión superficial (el agua moja menos), mientras que las arcillas pueden dar origen a la formación de micelas de tensoactivos por medio del denominado enlace hidrófobo (se forman agregados).

La solvatación y el colapso del solvente contribuyen a la electrorestricción, la cual puede ser afectada también por la temperatura. Al utilizar altas concentraciones de sales y aumentar la temperatura se disminuye la constante dieléctrica de la interfase, lo que influye en las fuerzas de atracción interparticulares. La teoría de la doble capa se aplica sólo a bajas concentraciones de sales (menores de 1.6% respecto a la saturación). A mayores concentraciones no hay fuerzas de repulsión; con la adsorción adicional de cationes y aniones en complejos de superficie pueden anularse las componentes de la carga de superficie responsables de la fuerza de repulsión, y la muestra es menos estable, pues las fuerzas de atracción, para una menor constante dieléctrica de la interfase, pueden vencer a las de solvatación y resultar en una rápida coagulación y quizá mayor agregación.

La anulación de la carga de superficie no requiere de adsorción específica, sino sólo la formación de complejos de superficie; no obstante, el KCl se considera como un electrólito no inerte. El ion monovalente  $K^+$  causa la menor hinchazón en las arcillas del tipo de las montmorilonitas como resultado de la adsorción específica o formación de complejos de superficie del ion  $K^+$ . Esto ocurre debido a la electronegatividad y tamaño iónico de este catión.

El sistema de pared flexible permite obtener un valor más aproximado de la permeabilidad real del suelo; en este tipo de permeámetro se debe considerar que puede presentarse con el tiempo un problema potencial de corrosión e incrustación de sales en los conductos de pequeño diámetro y deterioro de la membrana. Por otra parte, el sistema de pared rígida es adecuado como prueba de compatibilidad a largo plazo para determinar si pueden existir interacciones arcilla-especies químicas y conductiones no isotérmicas. Para ello, se sugiere medir en el efluente valores de pH y conductividad, así como el contenido de varias especies, como sílice libre, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, con el objeto de determinar si existen filtraciones laterales, intercambio iónico y reacciones químicas, disolución y lavado, o bien acumulación y posible cementación.

El tipo de pruebas realizadas en los permeámetros implica ciertas consideraciones en cuanto a las mediciones obtenidas; no obstante, conociendo las limitaciones se pueden interpretar en consecuencia los fenómenos que ocurren dadas las condiciones modeladas. Se requiere un mayor número y clase de experimentos para comprender el comportamiento del agua y solutos y sus efectos en muestras compactadas sujetas a gradientes térmicos. Las pruebas realizadas sirven para programar nuevos experimentos y tener una mejor idea de cuándo variar la concentración y la temperatura y en qué magnitud, así como automatizar la adquisición de datos. Para un análisis más concluyente y comparativo entre las distintas arcillas es importante regular el tiempo de exposición al agua y a la salmuera, el tipo de sal y concentración, valores máximos de temperatura, duración y forma de aplicación de los gradientes (aumentos graduales o bruscos). En este sentido, es importante considerar que la mayoría de las pruebas de permeabilidad de carga variable utilizan gradientes hidráulicos altos a fin de incrementar la velocidad de filtración del agua y disminuir así los tiempos de prueba, pero que esto a la vez puede inducir un efecto de asociación de flujos en pruebas de compatibilidad. Asimismo, faltó analizar más la capacidad de recuperación de los distintos materiales (autosellado), pues las pruebas generalmente se concluían tan pronto se manifestaba un incremento súbito de permeabilidad.

El anillo de BNa fue útil para disminuir el flujo lateral por falta de confinamiento en ciertas muestras con mayor susceptibilidad a dicho efecto, sin embargo, este material no sería adecuado en pruebas con salmueras donde la bentonita podría ser la primera en afectarse. Se propone utilizar como sello grasa de silicón o bien, un anillo de un agente tixotrópico, por ejemplo la carboximetilcelulosa (CMC) que es transparente y permite tener un mayor control visual; no obstante habría que hacer pruebas previas de su tolerancia, pues altas concentraciones de sal pueden precipitar la CMC (Barajas, 1997); otra alternativa sería un producto denominado Natrosol® hidroxietilcelulosa, cuyo comportamiento no es afectado por electrólitos, pH o ingredientes como dispersantes, tensoactivos y coalescentes. Para mejorar la adherencia se sugiere que la parte de la pared del permeámetro que está en contacto con el suelo tenga mayor rugosidad. Asimismo, en vez de acrílico, para algunas pruebas se sugiere construir permeámetros con policarbonato, pues resiste mayores temperaturas y presiones. En pruebas con incrementos térmicos el aumento de flujo en ciertas muestras se observó en la zona de mayor temperatura, por lo que se sugiere considerar esto en el diseño del sistema para controlar la temperatura.

## *7.2 Límites de plasticidad*

### *7.2.1 Primera etapa*

En las figuras 6.2.1 a 6.2.8 se pueden observar la variación del índice de plasticidad de las bentonitas montadas en los permeámetros y su parecido con algunas de las muestras tratadas con agitación. En el caso de las figuras 6.2.1 y 6.2.2 se observa que el índice de

plasticidad fue el mayor de las muestras tratadas debido probablemente a la baja concentración y al tiempo de lavado y elevación de la temperatura, en tanto que en la muestra del permeámetro de la figura 6.2.6, la cual tuvo un menor periodo de lavado y de aplicación de temperatura, tiene mayor parecido con la muestra tratada al 100% y lavada sólo una vez. En general, las bentonitas cálcicas que interactuaron con salmueras de NaCl al 5% y 35%, respectivamente, presentan un incremento del índice de plasticidad, el cual es más notable en la muestra tratada con la mayor concentración. En el caso de la BNa, se observa un ligero incremento en su IP. Por otra parte, aun cuando todas las muestras contaminadas fueron percoladas con agua destilada, en la bentonita sódica se observa que el índice de plasticidad resultó menor que el correspondiente a la muestra sin contaminar.

Resumiendo los resultados obtenidos se tiene que, para las muestras tratadas sin lavar, los valores del LL disminuyen al incrementar la concentración de salmuera y el tiempo de exposición, en tanto que los valores del LP aumentan ligeramente; esto es más notable en la muestra de bentonita sódica. Por tanto, los valores del IP disminuyeron de acuerdo con el incremento de la concentración y las muestras se transformaron en un tipo de material menos plástico. Por otra parte, conforme se lava a la muestra del exceso de sales el límite líquido aumenta notablemente, en tanto que el LP muestra pequeñas variaciones que dependen del tiempo de exposición y de la concentración de la salmuera. A menor tiempo de exposición corresponde mayor IP, pues el lavado es más efectivo. Para pequeñas concentraciones (5 y 35%) y cortos periodos de tratamiento (1 día), el LP prácticamente no cambia (5%) y aún alcanza valores inferiores al de la muestra natural (35%); para concentraciones mayores (80 y 100%) el LP tiende a aumentar ligeramente con los lavados. En las figuras 6.2.3 a 6.2.7 se puede observar que, en el caso de las muestras tratadas sin lavar, el IP es menor que el LP; particularmente, en la figura 6.2.7 se observa que a partir de una concentración del 60% ocurre lo anterior.

De acuerdo con las figuras mostradas, el cambio en el límite líquido es el que determina principalmente la correspondiente variación del índice plástico, mientras que la variación del límite plástico es menor, y no se presenta en la misma dirección del líquido en todos los casos.

De acuerdo con las figuras 6.2.9 a 6.2.15, en general, todos los puntos correspondientes a muestras del mismo origen caen arriba de la línea A, excepto las muestras sin lavar, y tienen un comportamiento lineal que indica que en los valores de plasticidad domina la composición mineralógica. También se observa que a mayor tiempo de exposición se logra, una vez eliminado el exceso de sales, una mayor activación de las bentonitas. En el caso de altas concentraciones y mayores tiempos de exposición, el índice de plasticidad de las muestras después del primer ciclo de lavados es todavía menor que el correspondiente a la muestra original, lo cual se explica por la mayor exposición de la muestra a los contaminantes, esto es más notable en el caso de la muestra de bentonita sódica, la cual a su vez es una arcilla previamente tratada para su comercialización. El límite plástico aumenta ligeramente en muestras lavadas y sin lavar, respecto del valor de la muestra sin tratar, y este efecto es más notable al aumentar la concentración y el tiempo de exposición.

Resumiendo los resultados de las Figuras 6.2.9 a 6.2.15, se observa lo siguiente: un comportamiento lineal (coeficientes de correlación cercanos a 1) y una ecuación de la recta cuya pendiente es aproximadamente 1:1; una disminución del IP en muestras sin lavar y aumento del IP (activación) al lavar la muestra; en las muestras sin lavar se observa que a mayor concentración equivale un menor IP; en las muestras lavadas corresponde que, a mayor concentración y mayor tiempo de exposición, mayor es el IP.

En la tabla 6.2.3 Los coeficientes de correlación son cercanos a uno, lo que indica que se explica la mayoría de la variación y que las desviaciones tienen un patrón definido. Los errores medios de desviación (estimación de la varianza, que mide la dispersión de una densidad de probabilidad, en términos de las desviaciones verticales de los puntos del muestreo a partir de la línea de mínimos cuadrados) variaron de 0.42 a 4.56. En un análisis de regresión lineal el error medio sirve para medir la confiabilidad de la ecuación de estimación. Se parece a la desviación estándar (ambas son medidas de dispersión de un conjunto de observaciones en torno a la media). Con él se mide la variabilidad o dispersión de los valores observados alrededor de la línea de regresión y a lo largo del eje de las ordenadas. A mayor error estándar ( $S_e$ ), mayor dispersión (esparcimiento) de puntos alrededor de línea de regresión. Si  $S_e = 0$ , entonces la ecuación de estimación es un estimador perfecto de la variable dependiente.

De acuerdo con la tabla 6.2.4, se advierte una mayor variación del LP para altas concentraciones, lo que podría estar asociado con la agregación. Se observa que para altas concentraciones, el LP de la bentonita tiene la misma tendencia que en la caolinita, es decir, disminuye.

Los datos obtenidos en esta experimentación sistemática realizada con muestras de bentonitas tratadas con distintas concentraciones de salmueras, quedan señalados en varias gráficas por líneas con una tendencia general similar; esto comprueba que la plasticidad de muestras con la misma composición mineralógica varía de acuerdo con el tipo de intercambio catiónico y contenido de sales en el agua de poro, mientras que las características de la fracción coloidal permanecen esencialmente inalteradas. Se observó una relación entre muestras tratadas con salmueras en permeámetros y las tratadas con agitación, con diferencias derivadas del tiempo de lavado y posiblemente de la aplicación de temperatura.

Las muestras sin lavar son menos plásticas. La razón de esto se halla en el efecto floculante de las sales sódicas en exceso. Estas sales reprimen la *ionización* (espesor de la capa doble difusa) de los iones de sodio adsorbidos. Con esto disminuyen el potencial, la hidratación, el hinchamiento y la tendencia a la dispersión. El material coloidal es floculado. En cambio, en los suelos lavados la dilución ha sido la necesaria para lixiviar el exceso de sales, y los suelos se caracterizan por un complejo de intercambio catiónico saturado de sodio y una mayor plasticidad. Con un incremento en el porcentaje de sales en el agua de poro y tiempo de exposición, la plasticidad de las partículas de suelo disminuye. Se observa que los cambios registrados bajo condiciones de baja salinidad

pueden caer dentro de los límites de error en la determinación de las propiedades relevantes.

Puede ser dicho como conclusión, que los cambios mencionados en las propiedades del suelo que ocurren debido al efecto de las sales solubles y al de su lavado del suelo, deben ser tomadas en consideración al evaluar las propiedades estructurales de suelos salinos y predecir los cambios que pueden ocurrir con el tiempo. Se sugiere hacer pruebas para verificar el mayor efecto de otra sal, como el KCl, en el LP y LL.

### 7.2.2 Segunda etapa

De acuerdo con la tabla 6.2.5, la mayoría de las muestras tuvieron un mayor contenido de agua final. Las muestras compactadas que incrementaron en mayor medida su humedad fueron aquéllas con contenido significativo de esmectita; dicho aumento está en función del tiempo de exposición al líquido, tipo y concentración de sal, temperatura y lavado. No obstante, algunas muestras presentaron un contenido menor al tratarse con temperatura y/o KCl, entre las cuales están las muestras Blanquiza, Haloisita, Morelos y Atapulgita y sobre todo, las muestras correspondientes a los geotextiles. El menor contenido de agua final indica que hubo desecación, y esto fue más marcado en sistemas con alto contenido de agua inicial, como en los GCL, debido a su mayor susceptibilidad a sufrir contracciones. Asimismo, muestras como Zamora, Morelos y Atapulgita presentaron un cambio de clasificación de acuerdo con el SUCS.

Se observa que el lavar la muestra hasta disminuir la salinidad del flujo recolectado no garantiza que dicho lavado sea completo, como se puede advertir en los límites de plasticidad. Por otra parte, se observó el siguiente patrón: en las muestras nativas y comerciales no expansivas, tratadas y lavadas, el límite líquido y plástico, así como el índice de plasticidad disminuyeron. En las bentonitas, el límite líquido aumentó o disminuyó según la concentración a la que se trató y al tiempo de lavado, en tanto que la variación del límite plástico es en sentido contrario al del líquido.

En cuanto a los límites de plasticidad se observó una tendencia para las muestras con mayor capacidad de expansión y otra distinta para el resto de las muestras; en las primeras, en general, el sentido de cambio del límite líquido (LL) y el plástico (LP) es opuesto, y depende del tipo de catión y de las condiciones de exposición. Los límites líquidos son gobernados por distintos mecanismos en montmorilonitas y otras arcillas menos expansivas. En las montmorilonitas la contribución de la doble capa a la resistencia al corte es mayor y, por tanto, el espesor de la doble capa controla el comportamiento. La doble capa tiene una contribución marginal en las demás arcillas, y la resistencia al corte en la escala entre partículas es la que gobierna. El tejido (estructura) de las arcillas es controlado por fuerzas de atracción y repulsión entre partículas, que afectan el límite líquido de estos suelos. En las ilitas, y sobre todo en las caolinitas, el tejido no es tan sensible al tipo de catión y concentración.



Aunque el LL y el LP son controlados por los mismos factores, la resistencia al corte a la escala de las partículas a un contenido de agua del LP es necesariamente mayor que en el correspondiente al LL. Ya que el espesor de la doble capa es menor en el contenido de agua del LP, el LP de las arcillas más activas se incrementa por la adición de los cloruros, ya que hay un aumento en la resistencia al esfuerzo cortante por incremento en la concentración de sal; por otra parte, el LL de estas arcillas disminuye por el cambio en la doble capa. En arcillas menos activas el efecto del espesor de la doble capa es menor y está controlado por cambios de tejido, donde la mayor agregación por incremento en las fuerzas de atracción disminuyen tanto el LL como el LP.

En la tabla 6.2.6 se observa que el contenido de agua disminuye con la profundidad, lo que se atribuye principalmente a la mayor saturación de la parte superior que está en contacto con el líquido, y quizá también a un efecto de ósmosis. Cabe recordar que un revestimiento está expuesto al riesgo de desecación si está sobre un material permeable no saturado, como es el caso de la capa de arena que subyace a la muestra compactada.

Al deducir para cada muestra la concentración de sal a partir de la ecuación 2.3.6 propuesta por Marsal y Graue (1976) para el LL y LP, respectivamente, se tienen resultados que no corresponden con los esperados. Por ejemplo, para las muestra de Atapulgita (tabla 6.2.5) tratada con KCl, a partir del LL, LP y contenido de agua final se determinaron las respectivas concentraciones, expresadas en porcentaje en peso, de: (1) 5.17% y (-)4.28%, y 29.6%, respectivamente. Cabe recordar que esta muestra estuvo tratada en largo tiempo de exposición, con una salmuera de KCl al 80% (23.2% en peso). Como se puede ver, existen diferencias entre el LL y LP y contenido de agua que se atribuyen a que el efecto de la sal en cada uno de estos contenidos de agua son diferentes, y que tienen que ver con el mayor o menor desarrollo de una doble capa difusa y precipitación de la sal y potencial osmótico.

### 7.2.3 Tercera etapa

Resumiendo los resultados obtenidos en la tabla 6.2.7 se tiene que, para las muestras tratadas sin lavar, los valores del LL disminuyen al incrementar la concentración de salmuera, en tanto que los LP disminuyen con el NaCl y aumentan con el KCl, pero sólo ligeramente. Por tanto, los IP disminuyeron de acuerdo con el incremento de la concentración y las muestras se transformaron en un tipo de material menos plástico.

Por otra parte, conforme se lava la muestra del exceso de sales el LL aumenta notablemente, en tanto que el LP muestra pequeñas variaciones que dependen de la concentración de la salmuera, del tipo de sal y número de lavados; con KCl los valores del LP tienden a ser menores. Los valores del IP aumentan con el lavado proporcionalmente a la concentración de NaCl, no así en cambio con la sal de potasio.

De acuerdo con lo expuesto por las figuras anteriores, el cambio en el límite líquido es el que determina principalmente la correspondiente variación del índice plástico, mientras

que la variación del límite plástico es menor, y no se presenta en la misma dirección del líquido en todos los casos.

En general, los índices de contracción fueron menores que en la muestra original, excepto en la muestra tratada con KCl 0.4 N sin lavar. En cuanto a los límites de contracción, éstos resultaron en todos los casos mayores que en la muestra original. La forma en que varía el límite de contracción es marginal, de forma parecida a las variaciones del límite plástico. En el límite de contracción se observa un incremento cuando se somete la bentonita a tratamiento con la salmuera, e incluso se observa un incremento extra con el primer lavado, provocado posiblemente por la eliminación del exceso de sales que quedó después del tratamiento. Con el segundo lavado el valor de dicho límite comenzó a descender.

El comportamiento del índice de contracción también varía en una forma muy ligera debido a su dependencia de los límites plástico y de contracción. En general, se observó una disminución con respecto al valor inicial después del tratamiento con salmuera y un decremento extra con el primer lavado. Lo anterior está gobernado por el comportamiento del límite de contracción, que representa el intervalo del estado semisólido en forma más apreciable que el límite plástico. Después del segundo lavado se observa una ligera recuperación.

El límite de contracción ayuda en la predicción cualitativa de la variación de volumen de un suelo. El límite de contracción en las caolinitas es controlado por la resistencia al corte a pequeña escala; un tejido disperso y otro floculento producen, respectivamente, una mayor y menor contracción. En suelos con montmorilonita, la presión repulsiva es mayor y el tejido es relativamente orientado, lo que resulta en una mayor contracción.

En general, todos los puntos correspondientes a muestras del mismo origen caen arriba de la línea A y tienen un comportamiento lineal que indica que en los valores de plasticidad domina la composición mineralógica, y que el valor del espaciado interlamilar, que puede ser determinado por el parámetro de red mediante difracción de rayos X, es el que rige la ubicación de los distintos puntos.

En las gráficas de las cartas de plasticidad (figuras 6.2.16 y 6.2.17) resaltan ciertas características generales:

- Comportamiento lineal (coeficientes de correlación cercanos a uno).
- Disminución del IP en muestra sin lavar y aumento del IP (activación) al lavar la muestra.
- En las muestras sin lavar se observa que a mayor concentración corresponde un menor IP.
- En las muestras tratadas con NaCl y lavadas corresponde que a mayor concentración mayor es el IP, no así en las tratadas con KCl, donde el IP es menor para la mayor concentración.

La diferencia en la preparación de las muestras contaminadas con sal en esta etapa, respecto de la primera, no modificaron el comportamiento general reflejado por las líneas que unen los puntos obtenidos experimentalmente para cada tipo de sal, cuyas diferencias se atribuyen a que una es un electrólito 1:1 no indiferente (KCl).

### 7.3 Pruebas Fisicoquímicas

#### 7.3.1 Análisis del agua de poro, y de iones en solución e intercambiables

##### A. 1.ª etapa

En la tabla 6.3.1 se observa que, para el caso de las muestras sin lavar, el contenido de agua de la pasta de saturación disminuye al aumentar la concentración, excepto para el porcentaje de 85%, en el cual el contenido es ligeramente mayor que para el 60%, debido probablemente a la falta de precisión al agregar agua a la pasta de suelo, o a la posible solvatación del sodio. Por otra parte, en las muestras lavadas dicho contenido de agua aumenta al activarse la bentonita, excepto para el porcentaje de 85%; esto se debe quizás a que, a mayor concentración, el lavado puede ser insuficiente para eliminar el exceso de sales en el agua de poro, lo que ocasiona que la arcilla adsorba menos agua. El incremento en el contenido de agua de las muestras contaminadas y lavadas muestra que tienen una gran afinidad por el agua, lo cual implica que una cantidad apreciable de cationes de sodio, adsorbidos en la superficie de las partículas de arcilla para satisfacer su carga negativa, no fue removida por el flujo con agua destilada y originó una mayor expansión osmótica.

En cuanto al valor del pH, se observa que éste es mayor, respecto de la muestra sin contaminar, en las muestras lavadas correspondientes a las concentraciones del 5 y 35%, a partir de la cual disminuye al aumentar la concentración; en las muestras sin lavar, el pH es menor que la muestra original y disminuye conforme aumenta la concentración, excepto para el 85% que es similar a la del 60%. El aumento de pH se puede explicar por un mayor porcentaje de saturación de bases, así como también es un índice de las proporciones relativas de bases, que se traducen en un complejo sódico, en vez del cálcico original, donde el valor del pH es menor. Se verifica que para un bajo contenido de sales aumenta el porcentaje de cationes monovalentes adsorbidos en capas y el pH; la mayor densidad de carga a mayores valores de pH resulta en una mayor concentración de cationes en la doble capa y consecuentemente mayor repulsión y dispersión entre partículas. La disminución de pH puede deberse al intercambio de sal neutra concentrada por iones aluminio o hidrógeno, así como a un efecto similar al del secado, que produce una liberación de la acidez de reserva por un intercambio de cationes.

El total de sales disueltas (TSD) del extracto de la muestra no contaminada es aproximadamente de 0.003 g/mL, mientras que el TSD de la muestra tratada con 35% es de 0.144 g/mL. La diferencia entre estos valores de TSD es de aproximadamente 0.141 g/mL que corresponde a una concentración 2.41 N (46.7%). En cambio, para la

concentración del 5%, la diferencia es de 6.6 g/mL, que corresponde a una concentración de 0.113 N (2.48%). Este dato sugiere que el contenido de sales dentro del agua de poro de las muestras se incrementa al estar en contacto con mayores concentraciones, quizás porque el extracto se concentra más por efecto de la reducción en el contenido de agua de saturación debido a la contracción de la doble capa, o bien, a un efecto de membrana semipermeable. Los valores de conductividad se pueden relacionar con la salinidad, tal como se puede apreciar. No obstante, para altas concentraciones aumenta la relación de CE/TSD, y deja de ser aproximadamente constante.

En la tabla 7.3.1 se deducen concentraciones en función de la conductividad eléctrica del extracto, y del contenido de agua de la muestra, y se observa que no hay coincidencias, en general. En la última columna de la tabla se calculó la concentración  $c$  (% en peso) que, según se deduce de la ecuación 2.3.7 propuesta por Marsal y Graue (1976), correspondería a cierto contenido de agua, tomando como referencia dos muestras lavadas, la tratada con 5% (por su menor concentración de sal en el agua de poro) y la que tiene mayor activación (85%), y se compara con la concentración equivalente con la que se trató la respectiva muestra. El valor negativo para la concentración menor resulta de no considerar la activación de la arcilla que se vuelve más hidrófila y requiere de mayor cantidad de agua para alcanzar un valor semejante al del Límite Líquido. Para mayores concentraciones se observa una sobrestimación, excepto para la más alta de ellas, que resulta ser la mejor aproximación, posiblemente por reflejar mejor el efecto de la precipitación de la sal en los poros de la arcilla.

Tabla 7.3.1 Relaciones entre concentraciones

Muestra	% Sat. (%)	$c$ (%)	$\zeta$ (%)	$c$ (CE) (%)	$\frac{c}{\zeta}$ (%)	$\zeta'' =$ F(5%)	$\zeta''' =$ F(85%)
Original	0		202.5	0.358	0.00	189.2	-354.4
	5	1.7	296.0	1.043	-15.60	82.4	248.3
Sin lavar	35	9.3	142.0	9.574	21.04	10.3	11.2
	60	16.1	120.0	13.440	33.95	7.3	7.8
	85	22.0	131.0	14.080	26.95	7.0	7.4
Lavada	5		352.2	0.114	20.99	352.2	-189.9
	35		560.0	0.743	-31.53	109.5	975.5
	60		747.0	0.774	-36.00	105.9	747.0
	85		659.0	0.840	-34.21	99.0	502.1

\* valor estimado de la ecuación 2.3.7

Comparando los resultados de la tabla 6.3.2 con las figuras 6.2.5, 6.2.6, 6.2.13 y 6.2.14, se puede concluir que basta que en el agua de poro exista un exceso en la concentración

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

de iones para que disminuya el índice de plasticidad, debido principalmente a un decremento del límite líquido.

También se puede observar que, no obstante que las lecturas del salinómetro después de lavar las muestras indicaban que se había eliminado el excedente de electrólitos, no detectaban la presencia de un exceso de cloro en el agua de poro verificada mediante pruebas fisicoquímicas. La explicación para la disminución en el LL es que el exceso de iones mantiene más unidas a las hojas elementales cargadas negativamente; por tanto, la capacidad de adsorción de agua de la montmorilonita disminuye al incrementar la concentración. El incremento en el LP puede deberse a que la montmorilonita forme cada vez más una estructura floculada; hay más espacio para agua en los poros de esta estructura que en la dispersa; sin embargo, también cabe la posibilidad de que en el LP, por el mismo tipo de prueba, se lleva a una reducción de volumen por procesos mecánicos que consiga el secado de las sales y las vuelva agentes inertes, recuperándose entonces la expansión osmótica y el contenido de agua de la fracción activa. Debido a que las superficies basales de los minerales arcillosos están cargadas negativamente no hay una interacción relevante con los aniones. Sin embargo, tanto aniones como cationes contribuyen a incrementar el contenido electrolítico de la solución. Un mayor contenido resulta en una compresión de la doble capa y, por tanto, afecta el volumen de expansión. El cloro es muy soluble y la dilución es el único mecanismo de atenuación para este constituyente de lixiviado, mientras que el intercambio catiónico es el principal mecanismo de atenuación para el sodio. La concentración iónica producto de las sales libres del agua de poro causa un efecto osmótico transitorio, en tanto que la nube iónica neutralizada por cargas localizadas en las partículas de suelo resulta en una fuente de concentración más permanente. Adicionalmente, los potenciales osmóticos son mayores en sistemas sódicos.

Se pudo comprobar mediante un análisis químico del agua intersticial de los suelos en estudio, la influencia que tiene en el espesor de la doble capa difusa la presencia de un exceso de iones en el agua de poro; el efecto del anión (Cl) es tan notorio como el del catión (Na). Por tanto, se sugiere probar con otras sales, además del NaCl, y considerar el efecto tanto del catión como del anión para distintas concentraciones.

Los resultados de intercambio de cationes en suelos que contienen montmorilonita, y que fueron tratados con soluciones de NaCl y KCl, tanto en permeámetros como en pruebas directas de agitación con y sin lavado del exceso de sales, indican que al exponer las muestras a la acción del cloruro de potasio la cantidad de este catión aumenta en los sitios de intercambio, mientras que el valor correspondiente del sodio disminuye de manera considerable, lo que parece indicar un desplazamiento entre dichos cationes. Asimismo, se aprecia cómo el intercambio con el sodio produce un aumento de los sitios de intercambio ocupados por este catión, en tanto que los valores de potasio intercambiable prácticamente no varían respecto al valor original (Tabla 6.3.3).

Los resultados obtenidos en la muestra BNa indican un marcado aumento del ion potasio, así como un desplazamiento de los sitios de intercambio del sodio, inicialmente altos.

En esta tabla 6.3.3 se aprecia como el intercambio con el sodio produce un aumento de los sitios de intercambio ocupados por este catión, en tanto que los valores de potasio intercambiable prácticamente no varían respecto al valor original.

La muestra denominada como Zamora, que contiene esmectita, también presenta un intercambio notable de potasio después de interaccionar durante varias semanas en el permeámetro. En esta muestra el valor inicial de sodio intercambiable es relativamente bajo, sin embargo, también se presenta una disminución.

También es notable que los valores obtenidos con muestras de permeámetros y otras tratadas con agitación directa son similares, lo que se atribuye a que el efecto del intercambio quizá sea inmediato por efecto de las altas concentraciones que se manejan.

#### B. 2.<sup>a</sup> etapa

Si bien estos análisis se refieren a iones en la solución del agua de poro, se puede suponer que existe una relación aproximada con los iones del complejo de intercambio, de tal manera que se conserve el equilibrio de la interfase. El cambio en el total de la concentración iónica puede indicar la disolución de sales del suelo o su precipitación o retención. Por medio de estos resultados se puede juzgar en cierta medida la atenuación de los suelos y el posible efecto de membrana semipermeable imperfecta propuesta por Mitchell (1973).

De acuerdo con lo anterior, y analizando los resultados y el comportamiento de las muestras tratadas respecto de las originales, y de aquéllas entre sí, se plantean las siguientes notas respecto de la tabla 6.3.4:

- El contenido de agua de la pasta de saturación se reduce respecto de la muestra original, con excepción de las siguientes muestras: Blanquizca y Haloisita tratadas con KCl al 35%, y BCa-1 tratada con NaCl al 5 y 35%. En las primeras dos muestras esto se puede asociar con el alto contenido de carbonatos en ambas muestras (Tabla 5.1.4), mismo que pudo haber sido disuelto por efecto del tratamiento con sal y temperatura en el permeámetro: en el caso de la bentonita, el aumento se explica por una mayor capacidad de expansión resultado del intercambio iónico de  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$ . En condiciones naturales la influencia de la concentración y naturaleza del ion en la CIC es pequeña, sin embargo, para el caso de pruebas de salmueras con temperatura sería conveniente medir la CIC antes y después del tratamiento, dada la relación que existe entre la CIC y el LL de la muestra, lo que serviría además como una prueba más de compatibilidad.
- En general, el valor de pH aumentó y el incremento o disminución de carbonatos concuerda con el aumento o decremento del pH, respectivamente. El aumento de pH se puede explicar por un mayor porcentaje de saturación de bases, así como también es un índice de las proporciones relativas de bases, que en nuestro caso se traducen en un complejo alcalino, en vez del complejo alcalino-térreo original asociado con un menor pH. Se verifica que para un bajo contenido de sales aumenta el porcentaje de cationes monovalentes adsorbidos en capas y aumenta el pH. La disminución de pH puede

deberse a intercambio de sales neutras por iones aluminio o hidrógeno, así como a un efecto similar al del secado, que produce una liberación de la acidez de reserva por un intercambio de cationes por el tratamiento con salmueras concentradas de KCl (Atapulgita, BCa-1 y Volclay CS 50 y CRC); aunque la Caolinita tuvo un tratamiento similar, éste fue al final de la prueba, tras un prolongado lapso de lavado con agua (Fig. 6.1.12), lo que explicaría una menor interacción de la salmuera con la muestra entera y que el pH no haya disminuido, sino aumentado por el anterior tratamiento con sal y dilución dentro del permeámetro; lo contrario se presenta en la muestra correspondiente a la gráfica 6.1.13 (Tabla 7.1.16), donde se tiene prácticamente un efecto de primera exposición a la salmuera y ésta interactúa varios días, sin lavado final. Asimismo, la variación de pH puede indicar el cambio en la carga permanente de la arcilla debido a la formación de complejos de superficie, sin necesidad de que la adsorción del potasio sea irreversible.

- La conductividad eléctrica (CE) y el total de sólidos disueltos (TSD) disminuyeron en las muestras lavadas, excepto en las siguientes: Café oscuro, Morelos, BCa-1 y Volclay CS50, todas ellas tratadas con salmueras de KCl en concentraciones mayores o iguales a 35%; no obstante que las dos bentonitas no se lavaron completamente, en otras tratadas con NaCl y LiCl sí disminuyó la CE a pesar de que la salinidad de salida no fue nula. En las muestras sin lavar (Caolinita, Atapulgita y Volclay CRC) la CE y el TSD son mayores, y en las dos últimas se presentan valores que exceden el rango del aparato, por lo que se ve la necesidad de contar con aparatos adecuados tanto para salinidades bajas como altas. El efecto que tiene el lavado de las muestras tratadas en la disminución de la permeabilidad observada en mayor o menor grado, está asociado en parte con el incremento de la doble capa producida por la disminución de la concentración de electrólitos y la defloculación y dispersión.
- El sodio disminuyó en casi todas las muestras tratadas con KCl, e incluso con NaCl y lavadas; las únicas que presentaron aumento fueron la Café oscuro, Atapulgita, Volclay CS 50 y CRC, aunque dicho aumento fue muy pequeño comparativamente con el de potasio.
- El valor del  $\text{Na}^+$  en la BCa-1 es alto, coincidiendo con valores reportados anteriormente (tabla 6.3.1); esto se atribuye a que se trata de un suelo salino, lo que dificulta su análisis.
- El  $\text{K}^+$  aumenta notablemente en todas las muestras tratadas con KCl, incluso después de lavadas.
- El  $\text{K}^+$  en solución no aumenta tanto en las muestras con poca o sin esmectita, aun cuando la concentración de sales es alta.
- En general, el calcio disminuye con excepción de las muestras Morelos, Atapulgita y bentonitas tratadas con KCl; en la Haloisita el  $\text{Ca}^{2+}$  disminuye considerablemente, lo que podría estar asociado con una disolución y lavado del material cementante original.
- El cloro disminuye en las muestras lavadas, con excepción de la Morelos (posiblemente por tratarse de un andosol) y de las bentonitas, sobre todo en la cálcica; en la mezcla de Zeolita-BNa queda prácticamente igual. En cuanto a las muestras no lavadas, es notable el ligero aumento en la Caolinita, respecto del notorio aumento en la Atapulgita y Volclay CRC. La Caolinita prácticamente era una muestra muy lavada en el permeámetro y el efecto de la sal fue puntual (franjas azules de la figura 6.1.G),

por lo que la mayor parte de la pasta no refleja el efecto de la sal. El aumento del contenido de cloro, sobre todo en las muestras lavadas, puede implicar que el material logró atenuar más la difusión de esta especie, significativa en las aguas negras y con una alta movilidad.

- En muestras nativas y comerciales no expansivas lavadas, incluida la muestra Zamora y la mezcla Zeolita-BNa, la suma de iones disminuye, excepto en la Café oscuro y Morelos, donde sube ligeramente. Como sería de esperar, el conjunto de estas muestras sin lavar tienen un incremento en los iones.
- Los máximos valores de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{K}^+$  los presentan las muestras Atapulgita y Volclay CRC tratadas con KCl al 80% sin lavar. Los valores obtenidos implican que las muestras estaban saturadas con la sal, donde el valor máximo de potasio y cloro soluble es de 4 560 meq/L; los errores asociados pueden deberse a la falta de precisión en las diluciones que fue necesario hacer para hacer las determinaciones, lo que sobreestima su valor, y adicionalmente, en el caso de los cloruros, a la mayor incertidumbre del método. En la Caolinita se explica que no se haya detectado valores similares, puesto que el material seleccionado para la pasta no incluyó el marcado con el colorante, que es donde se acumuló la mayor cantidad de sal. En estas muestras sin lavar, para una concentración de salmuera de KCl mayor de 80%, aparentemente no se presentó el efecto de membrana semipermeable pues se obtuvieron extractos similares en concentración a las salmueras; sin embargo, aun cuando en estas condiciones desaparezca la doble capa y su efecto de membrana, los valores obtenidos de los extractos deben guardar cierto equilibrio con solución más próxima a la arcilla, por lo que se observa una capacidad alta de retención de estas muestras. En este sentido es importante resaltar que la bentonita tratada tuvo menor interacción con la salmuera (figura 6.1.26 y tabla 7.1.29).
- En cuanto a la relación de adsorción de sodio y potasio, RAS y RAP, respectivamente, la primera debe disminuir en todas las muestras tratadas con KCl, al igual que el porcentaje de sodio; mientras que la RAP sólo disminuye en las muestras tratadas con salmueras distintas de KCl. El valor de la RAP podría ser útil, junto con la RAS, para estudios de dispersión, pues altos valores asegurarían menor dispersión.

### C. 3.ª etapa

En la tabla 6.2.7 (capítulo 6) se observa que los valores de concentración  $\kappa_{sc}$ , calculados de acuerdo con la ecuación 2.3.9 y en función del límite líquido y del plástico, respectivamente, no coinciden. El valor negativo aparece cuando el respectivo contenido de agua de la muestra tratada es mayor que el original, lo que posiblemente se deba al resultado de su activación por el intercambio iónico y/o del lavado del exceso de sales.

En cuanto al valor de la conductividad y, en consecuencia, de las sales disueltas totales, en la tabla 6.3.6 se nota que con el tratamiento y sin lavar, toma valores que salen fuera del intervalo de medición del aparato, pero éstos se disminuyen con un primer lavado, y se llega a valores incluso menores que el original con el segundo lavado. El valor de conductividad en solución es menor que el medido en suspensión debido a la conductancia adicional inducida por las partículas de arcilla. En la tabla 7.3.2 se plantean



los valores de la diferencia del total de sólidos disueltos en suspensión y en solución ( $\Delta TSD$ ), y se correlacionan con los respectivos valores de pH (sólo de la solución), y los cloruros del extracto de la pasta de saturación correspondiente; se eligió el TSD en vez de la CE, con la que está relacionado, debido a que se cuentan con más datos del primero. Para facilitar la comparación los datos se han dispuesto en cada celda de la tabla de la siguiente manera: muestras sin lavar, a la izquierda; primer lavado, en medio; 2.º lavado, a la derecha.

- Se observa que todas las diferencias de CE son menores que la de la muestra original. En las muestras sin lavar las diferencias son mayores para el NaCl, a pesar de que la concentración equivalente en porcentaje en peso es mayor para el KCl. Por otro lado, las tendencias de cada sal son distintas en las muestras lavadas. Para las del primer ciclo de lavado, las diferencias de CE son prácticamente iguales, pero el cambio de pH es en sentido opuesto para cada sal. En cambio, para el segundo ciclo se observa una completa disminución de  $\Delta CE$  para las dos concentraciones de KCl (el valor no nulo corresponde al 0.4 N, lo que sugiere que no fue suficiente con el segundo lavado para una mayor concentración); estas pequeñas diferencias pueden ser evidencia de un ion no indiferente y de un PZC en vez de un PZNC. Asimismo, el cambio de pH vuelve a tener direcciones opuestas para cada sal.
- Tanto el catión  $K^+$  como el anión  $Cl^-$  pueden ser la causa de las menores diferencias obtenidas entre los valores de la solución y la suspensión, debido quizá a un menor desarrollo de doble capa difusa y efecto de membrana semipermeable. Además, la movilidad de ambos iones es parecida.
- El valor máximo de pH para cada sal corresponde a situaciones completamente opuestas. El valor del pH tiene una fluctuación menor por el efecto amortiguador del suelo, presentando mayor alcalinidad en algunos casos de tratamiento y lavado con menor concentración de NaCl, y tratamiento sin lavado con mayor concentración de KCl; esto último podría estar asociado con la formación de complejos de superficie con el potasio, lo que modifica el valor de la carga neta de protones ( $\sigma_{11}$ ).
- En las muestras sin lavar tratadas con KCl se determinó mayor cantidad de  $Cl^-$  respecto de las contaminadas con NaCl. El valor de  $Cl^-$  disminuye con los ciclos de lavado, pero en el primer lavado es proporcionalmente mayor la disminución en la muestra tratada con KCl. La variación del anión cloruro en el último lavado es opuesta para cada sal y su respectiva concentración, observándose que la muestra tratada con mayor concentración de KCl se lava más, al contrario del NaCl. La influencia de dicho anión es notable respecto a las variaciones de plasticidad, lo que se comprueba al observar la activación de la arcilla sólo cuando se ha diluido su concentración sensiblemente.

Tabla 7.3.2 Diferencias entre suspensiones y soluciones

Muestra	$\Delta CE$ [mS/L]	pH	Cl <sup>-</sup> [meq/L]
Original	0.34	8.57	1.5
NaCl 0.1 N sin lavar	0.14	8.58	34.7
NaCl 0.1 N 1er lavado	0.16	8.56	6.3
NaCl 0.1 N 2° lavado	0.20	8.31	1.8
NaCl 0.4 N sin lavar	-0.28	8.35	99.0
NaCl 0.4 N 1er lavado	0.07	8.68	13.0
NaCl 0.4 N 2° lavado	0.37	9.00	3.9
KCl 0.1 N sin lavar	0.08	9.12	29.8
KCl 0.1 N 1er lavado	0.15	8.81	5.2
KCl 0.1 N 2° lavado	0.03	8.40	3.1
KCl 0.4 N sin lavar	0.15	8.22	64.0
KCl 0.4 N 1er lavado	0.07	7.93	8.3
KCl 0.4 N 2° lavado	0.06	8.24	2.5

### 7.3.2 Difracción de rayos X

En las muestras tratadas con salmuera es evidente el hecho de la desaparición de fases predominantes de montmorilonita, o bien, su desplazamiento a menores concentraciones. Después de eliminar el exceso de sales existe una tendencia a regresar a los valores originales, principalmente a bajas concentraciones (Tabla 6.3.6). Por un lado, se aprecia que la técnica de difracción de rayos X es útil para identificar la composición del suelo, pero por otro, se manifiesta la importancia de un análisis fisicoquímico previo a la interpretación definitiva, que nos indique si existen especies químicas que puedan afectar los resultados.

Por medio del sistema cristalino, en estos análisis se identificaron a una bentonita cálcica (sistema ortorrómbico) de una sódica (sistema monoclinico); no obstante, no se tiene certidumbre sobre esto, pues según la literatura, la montmorilonita cristaliza en sistema monoclinico, pero no se hace referencia al complejo de intercambio.

Es importante considerar que la medida de la distancia entre planos,  $d$ , está sujeta a varias incertidumbres, sobre todo en ángulos bajos, cuya suma puede llegar a ser del orden de 0.5 a 1 Å. Entre las causas de las fluctuaciones de la posición  $d$  se consideran las siguientes: lectura, posición de la reflexión, colocación de la muestra y humedad del ambiente. Por ello, debe considerarse que el estudio de los cambios estructurales por medio de los difractogramas no es simple (Cordero A., IFUNAM, 2003, comunicación personal).

Pese a esta limitación, se puede observar que el parámetro de red disminuye en las muestras tratadas y se recupera para bajas concentraciones de NaCl, y menos con KCl, en las muestras lavadas; para altas concentraciones (85%), el resultado de la BCa-1 puede relacionarse con los contenidos de agua obtenidos de las pastas de saturación en la tabla 6.3.1. También es interesante notar que una muestra sometida en estudios anteriores a altas concentraciones de NaCl, y que originalmente era cálcica (Almanza *et al.*, 1993), en estos estudios aparece con características de sódica (sistema monoclinico y distancia de 12 Å).

En la muestra Zamora se observa que: el espacio basal de la forma deshidratada de la haloisita es alrededor de 7.2 Å, casi igual al espaciado basal de la caolinita, mientras que el de la forma hidratada es de 10.1 a 10.2 Å. La diferencia de espaciado entre ambas formas es aproximadamente de 2.9 Å, lo que equivale al grosor de una capa de moléculas de agua. A bajas temperaturas (60 a 75°C) se produce sólo una deshidratación parcial, y para que ésta sea total se requieren temperaturas de aproximadamente 400°C, o condiciones de vacío. La haloisita de morfología laminar es muy frecuente en suelos derivados de cenizas volcánicas. El hecho de que la haloisita se deshidrata irreversiblemente, si bien en forma incompleta, a la temperatura ambiente y con una humedad relativa mayor o igual a 100% hace extremadamente difícil estudiar este material sin alteración (Cordero, 1997). La deshidratación de la haloisita puede explicar el efecto de aumento de permeabilidad en la muestra Zamora; el hecho de que otras muestras que muy probablemente contienen haloisita no hayan presentado el mismo efecto a temperatura ambiente es quizá debido a la presencia de cementantes (carbonatos y óxidos de Fe), así como a la posibilidad de que se trate en sí mismo de una metahaloisita en mayor proporción; en la Haloisita, el carbonato de calcio puede ser quizá afectado al elevar la temperatura de la salmuera.

En las muestras BCa-1 tratadas con NaCl al 35% y 85% y lavadas, se detectó la presencia de calcita, lo cual podría estar relacionado con un lavado moderado y secado de material, por efecto de la sal, con la consecuente formación de calcita secundaria.

La mayor parte de los resultados obtenidos por difracción se basó en muestras expansivas; habría sido interesante obtener los difractogramas de las muestras de los permeámetros, sobre todo de aquellos en los que se tuvieron variaciones importantes de permeabilidad con salmueras y bajo el efecto combinado de éstas con la temperatura. Por ejemplo, además de las montmorilonitas, en arcillas como la illita, caolinita, haloisita e interestratificados, pues podría ser una manera de descubrir algún cambio en la estructura molecular, por ejemplo por penetración en el espacio interlaminar del potasio en las caolinitas y haloisitas (intersalación).

### 7.3.3 Expansión unidimensional de pastillas comprimidas estáticamente

En la figura 6.3.1 se puede observar claramente el efecto de la salmuera al reducir la expansión prácticamente a cero.

### 7.3.4 Pruebas de permeabilidad en embudos (influencia del catión)

Tabla 6.3.7 Observaciones:

- (1) Comportamiento similar para un tiempo igual de interacción con la sal 1 N; para una normalidad de dos, falla primero con KCl, pero la humedad final es similar aun cuando hubo una diferencia de tiempo de exposición para esta última concentración.
- (2) Se repite el orden en el tiempo de falla para KCl y NaCl, mientras que éste es mayor con LiCl. La humedad de la muestra con esta sal es la mayor.
- (3) Existen grandes diferencias en cuanto al porcentaje en peso y normalidad, menor en el KCl que en las demás sin embargo el KCl vuelve a ser la sal más agresiva.

En estas pruebas el mayor contenido de agua final de todas las muestras se explica porque previamente se hidrataron durante una semana, y estuvieron un corto tiempo en contacto con la salmuera a temperatura ambiente. Asimismo, no existe riesgo de desecación por estar sobre un material permeable, como una capa de grava.

### 7.3.5 Capacidad de expansión libre y prueba de volumen de sedimentación

En la tabla 6.3.8 se puede ver que en bajas concentraciones el  $K^+$  tiene mayor efecto en reducir la capacidad de expansión y en desestabilizar a la mezcla, seguida en orden decreciente por el  $Na^+$  y  $Li^+$ ; este último incluso llega a tener un efecto contrario. Por otra parte, para altas concentraciones, el tipo de catión es menos notable y lo que cuenta más es el efecto de su abundancia.

Se observa la activación de la BCa-1 luego de ser tratada con NaCl al 5%; esta muestra presenta un volumen de sedimentación final similar al de la atapulgita al utilizar KCl al 40%, si bien cada muestra parte de valores muy distintos para la prueba con agua.

En la muestra de Zamora, a diferencia de la bentonita, con KCl 5% prácticamente no se notó diferencia de expansión respecto del agua, lo que puede deberse a que además de montmorillonita, esta arcilla contiene otras arcillas que amortiguan el efecto para bajas concentraciones.

La sustancial disminución del volumen de expansión al emplear KCl se atribuye a un tipo especial de adsorción y a la formación de complejos de superficie.

La prueba de volumen de sedimentación permite constatar el desarrollo del potencial osmótico del material y, por tanto, su contribución en el potencial capilar del suelo. Un valor alto indica también formación de tactoides y grandes espesores de doble capa, y alta susceptibilidad al efecto de un electrólito.

### 7.3.6 Cromatografía

Mediante estudios de cromatografía en papel se pueden analizar efectos de movilidad iónica (por ejemplo,  $\text{Cl}^-$  vs  $\text{Na}^+$  o  $\text{K}^+$ ) y los efectos de las sales en la estabilidad coloidal, así como de la sinergia en mezclas de minerales (la mezcla Zeolita-BNa mejoró las propiedades de estabilidad de sus componentes individuales) y efectos de las sales en la estabilidad. Los resultados de las muestras originales se presentaron en la tabla 5.1.5. Las muestras tratadas con NaCl presentaron menor estabilidad y movilidad coloidal respecto de las originales, pero mayor que las tratadas con KCl.

### 7.3.7 Patrón de agrietamiento

Al comparar, entre otras, a las muestras se observó un evidente mayor agrietamiento en las muestras de bentonita que en la Caolinita y Atapulgita; asimismo, en estos experimentos no se pudo apreciar una mayor diferencia en las muestras tratadas calentadas y las no calentadas. En las figuras 6.3.4 a 6.3.6 se pueden observar algunas de estas pruebas. Con especímenes con estructuras más floculadas (agregadas) resultará en más grietas y un patrón de agrietamiento más densamente poblado. No obstante, las concentraciones usadas son superiores a las formuladas que consideran el desarrollo de la doble capa son válidas sólo para bajas concentraciones.

#### + Patrones de agrietamiento con azul de metileno

El azul de metileno permite observar la formación de agregados en la bentonita que podrían estar asociados con los paquetes o tactoides, así como con los cuasicristales (Fig. 6.3.7); dichos arreglos se observaron al tratar la muestra con NaCl al 50%, no obstante, al utilizar salmuera de KCl al 10% no se observaron los mismos patrones de agrietamiento, sino un arreglo denso, similar a la caolinita (Fig. 6.3.9); es decir, que la muestra se comportó de manera distinta de una bentonita con agua o con concentraciones menores. Las pruebas permitieron observar un cambio de color (vetas doradas) en la caolinita y en las bentonitas tratadas con salmueras de KCl, que podría estar asociado con una floculación parcial o una adsorción específica y agregación a concentraciones superiores a 35% y mayores temperaturas, donde sí se notó una mayor diferencia (Fig. 6.3.8); llamaremos al resultado particular *efecto silvita*, por haber sido observado primero con esta sal (KCl). Esta prueba también ha dado resultados similares en la Blanquiza y Café (KCl 80%), así como en muestras tratadas con altas concentraciones de NaCl.

Se propone aplicar esta técnica sencilla para distintas muestras y salmueras en diversas concentraciones y temperaturas, como una herramienta más para observar los diversos patrones y el tejido del suelo, y tratar de comprobar si existe una relación con la formación de agregados y adsorción específica de iones. Una ventaja de esta prueba es que, a diferencia del agua, la solución de azul de metileno fija mejor a la muestra durante el secado, evitando el agrietamiento por secado rápido y heterogeneidades del recipiente, lográndose una impresión más clara del arreglo final, así como durante el propio secado. Esta técnica podría servir para establecer una medida arbitraria de dichos fenómenos,

similar al número de oro, que es un método para la identificación de ciertos coloides a través de su estabilidad (Crockford y Knight, 1983).

### 7.3.8 Cambio de color

Ya que se usaron sales con cloruros y no con carbonatos ni bicarbonatos, y a que las muestras son prácticamente inorgánicas, no se observó un oscurecimiento muy notable, sino sólo cambios moderados en muestras como la Haloisita, y bentonitas, especialmente en la BCa-1 tratada con NaCl y LiCl. La mayor opacidad y los tonos amarillentos en algunas muestras pueden deberse al escaso drenaje y oxidación e hidratación del hierro, respectivamente (tabla 6.3.9).

### 7.3.9 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico

Por lo que respecta al particular método empleado, se observó una disminución de la CIC de las muestras al tratarlas con las salmueras; en aquellas con montmorilonita la variación dependió de si hubo un lavado previo, del tiempo de exposición y del contenido de agua inicial (geotextiles); el mayor porcentaje de disminución ocurrió en los especímenes de Morelos y Haloisita, aun cuando estos se lavaron previamente del exceso de sales. Es importante recordar que la deshidratación y el aumento de tamaño de partícula (formación de agregados) reduce la capacidad de intercambio iónico.

### 7.3.10 Microscopio Electrónico de Barrido

Mediante esta técnica se observaron diferencias interesantes entre la muestra original y las tratadas con sal, así como estas últimas entre sí. Del análisis elemental se notó una clara diferencia entre las cantidades de cloro, que fueron mucho mayores en la muestra tratada con NaCl. Esto se pudo verificar por lo menos con dos muestreos a distintas ampliificaciones. Asimismo, se notó una diferencia en textura; en las muestras tratadas con sal se pudieron observar mejor los detalles a mayores ampliificaciones, pues la sal permitió tener un material menos aislante (disminución del carácter dieléctrico de medio). En la muestra con KCl se advirtieron mayores agregados, mientras que en la muestra tratada con NaCl se notó mayor separación entre partículas, advirtiéndose diversas geometrías, muchas de ellas tubulares, lo que podría significar una mayor dispersión y además que la haloisita sufrió menos deshidratación respecto de la muestra tratada con KCl. En la adsorción física la capa adsorbida tiene con frecuencia un espesor mayor de una molécula, formado a menudo de varias capas, en la quimisorción, la saturación completa de la superficie resulta únicamente en una capa monomolecular. Posiblemente, la diferencia entre una y otra sal esté relacionada con la cantidad de cloro acumulada, la formación de complejos y la adsorción específica, así como con la menor deshidratación de la haloisita.

Los resultados con la muestra de caolinita, cuyo bajo contenido de titanio, puede indicar que se trata de una caolinita residual (cap. 3), reflejan la disminución de la relación

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  en la prueba de larga duración con NaCl. También permiten observar la formación de cristales de forma acicular en la muestra tratada con KCl, y la adsorción tanto de potasio como de cloro asociado a este, en la partícula (gránulo y capa compensadora). Esta fue la única muestra tratada con KCl en que se manifestó la presencia de cloro; en las demás este anión solo apareció asociado con el sodio, como se aprecia en la muestra de Zamora. Lo anterior son resultados interesantes en términos del acoplamiento de flujo, posible exclusión aniónica, pérdida de sílice y liberación de acidez de cambio.

En la figura 6.3.36 se comparan el arreglo y forma de partícula de una bentonita y una muestra superficial del exlago de Texcoco, y se advierten partículas con forma de hojuelas, características de las arcillas tipo montmorilonita.

En general, el MEB permitió observar las diferentes morfologías de las partículas arcillosas, algunas alargadas, fibrosas, laminares y redondas, y puede ser útil su aplicación para complementar la identificación por DRX. También puede ayudar para determinar forma de cristalización de sales: como apunta Jiménez (1990): al formarse costras salinas, en las que los cristales se han introducido entre las partículas del suelo que quedan flotando entre ellos, los cristales son aciculares lo que produce una estructura muy floja que colapsa rápidamente en contacto con el agua.

#### *7.4 Resumen y conclusiones*

En este capítulo se discutieron los resultados experimentales de diversas pruebas de compatibilidad y, aunque no a todas las muestras se les practicaron los mismos estudios, se trató de correlacionar la información obtenida, así como considerar los antecedentes presentados en capítulos anteriores.

El incremento del coeficiente de permeabilidad por efectos de temperatura y salmuera podría deberse a la rápida coagulación y agregación de las partículas arcillosas así como a un flujo lateral ocasionado por la contracción de la muestra. Se supone que existen ciertos valores de concentración del electrólito y temperatura, así como combinaciones de estos factores, que afectan a cada tipo de suelo. El gradiente hidráulico también es un factor que puede influir en este tipo de pruebas de compatibilidad. Se observó la influencia que tienen las sales y el efecto de la temperatura en la disminución de la repulsión entre las partículas finas, lo que ocasiona que éstas se reorganicen en estados de menor estabilidad hidráulica, y una mayor permeabilidad; en función del tipo de arcilla, electrólito y gradientes esto puede ser sólo transitorio. A mayor temperatura se pueden tener efectos en el intercambio de iones y en la deshidratación irreversible de ciertos minerales.

Pese a tenerse limitaciones por el tipo de permeámetro, se pudieron determinar variaciones que dependen directamente del efecto de la salmuera, o bien, de éste junto con la temperatura. Esto se observa en muestras como la Haloisita y la Caolinita. La existencia de cementantes, su tipo, concentración y solubilidad son importantes en el

aumento de permeabilidad por asociación de flujos y pueden estar relacionados con fenómenos que ocurren en cierta clase de geles, como la sinéresis. Por otra parte, los geotextiles ayudan en cierta medida a soportar los cambios de temperatura por efecto de salmuera. Todas las muestras tratadas con sal se volvieron sensibles a los gradientes térmicos, excepto la atapulgitita que resultó ser la muestra más estable.

Las muestras tratadas con altas concentraciones de sales presentaron disminución en su contenido de agua inicial, que era mayor en muestras menos expansivas; la mayor disminución de contenido de agua ocurrió en la parte inferior de la pastilla, lo que se atribuye a un efecto osmótico, así como al material permeable de la parte inferior. En los GCL se observó una radical disminución del contenido de agua luego de exponerlos a las salmueras. Por otra parte, los ensayos propuestos de permeabilidad en embudos tienen cierto parecido con las pruebas de pérdida de fluido, pero se reproduce mejor las condiciones de campo y son relativamente rápidos y simples. Asimismo, al aplicar vacío en la parte inferior de la muestra para incrementar el gradiente se reduce la cantidad de aire que entra en solución y el problema de desecación.

Utilizando principalmente coloides especiales, bentonitas, y con pruebas como las de permeabilidad en geotextiles, así como pruebas de capacidad de expansión libre y de volumen de sedimentación, patrón de agrietamiento y cromatografía se comprobó que la principal causa de la rápida coagulación es la formación de complejos, pues el valor de la concentración y tiempo para que ocurriera la coagulación disminuyó con la reducción en la concentración coloidal, como ocurre en estas pruebas de compatibilidad que manejan bajas concentraciones respecto de muestras compactadas. El tipo de sal también marcó diferencias, comprobándose que el KCl no es un electrólito inerte. Sin embargo, mediante las pruebas de permeabilidad se observó que la formación de complejos no necesariamente implicó una adsorción irreversible, al menos por el efecto en el flujo, que en muchos casos disminuyó al lavar la muestra del exceso de sales; sólo mediante pruebas de límites de plasticidad y pruebas fisicoquímicas fue posible distinguir ciertos cambios de estructura y estabilidad coloidal.

En cuanto a los límites de plasticidad se observó que el cambio en el límite líquido es el que determina principalmente la correspondiente variación del índice plástico, mientras que la variación del límite plástico y de contracción es marginal, y no se presenta siempre en la misma dirección del líquido. Se observó una tendencia para las muestras con mayor capacidad de expansión y otra distinta para el resto de las muestras; en las primeras, en general, el sentido de cambio del límite líquido (LL) y el plástico (LP) es opuesto, y depende del tipo de catión y de las condiciones de exposición. Los límites líquidos son gobernados por distintos mecanismos en mezclas naturales de arcillas y coloides especiales como las bentonitas. En las montmorilonitas la contribución de la doble capa a la resistencia al corte es mayor y, por tanto, el espesor de la doble capa controla el comportamiento. La doble capa tiene una contribución marginal en arcillas con menor capacidad de expansión, y es la resistencia al corte en la escala entre partículas la que gobierna dicha resistencia. El tejido (estructura) de estas arcillas es controlado por fuerzas de atracción y repulsión entre partículas, que afectan en el mismo sentido los límites



líquido y plástico de estos suelos; el tejido no es tan sensible al tipo de catión y concentración.

Aunque el LL y el LP son controlados por los mismos factores, la resistencia al corte a la escala de las partículas para un contenido de agua equivalente al LP es necesariamente mayor que la correspondiente al LL. Ya que el espesor de la doble capa es menor en el dicho contenido de agua, el LP de las arcillas más activas se incrementa por la adición de los cloruros, ya que hay un aumento en la resistencia al esfuerzo cortante por incremento en la concentración de sal; por otra parte, el LL de estas arcillas disminuye por el cambio en la doble capa. En arcillas menos activas el efecto del espesor de la doble capa es menor y está controlado por cambios de tejido, donde la mayor agregación por incremento en las fuerzas de atracción disminuyen tanto el LL como el LP. Asimismo, el efecto de la succión osmótica o matricial puede influir en las direcciones de cambio de las diferentes muestras.

La determinación de contenidos de agua permitió verificar tendencias distintas en suelos sin y con capacidad de expansión. En estos últimos se observó la activación con el NaCl al eliminar el exceso de sales. Esto se verificó con distintas sales y concentraciones; al utilizar KCl en vez de NaCl se observaron diferencias en los valores de pH y en la concentración de cloruros, antes y después de lavar las muestras del exceso de sales. Se comprobó que la sola concentración de sales como dato para estimar los diversos contenidos de agua correspondientes a varios estados de plasticidad del material pueden conducir a errores si no se consideran factores como la clase de sal, concentración, e intercambio iónico con cada tipo de suelo.

Las diferencias entre las conductividades y valores de pH medidos en suspensiones y soluciones de bentonita pueden tener relación con los distintos puntos de carga cero. Mientras que en el PZC señala ausencia de iones adsorbidos de movimiento libre y el aumento de las fuerzas interparticulares que producen efectos coagulantes, si existen iones libres adsorbidos en el PZNC, lo que trae implicaciones sobre la retención de iones en los suelos. Además de la conductividad, el pH es un parámetro que puede servir para indicar interacción del flujo con el suelo, intercambio iónico, porcentaje de saturación y variación de las cargas de superficie responsables de la repulsión entre partículas, disolución, capacidad de amortiguamiento. No obstante, su medición requiere de equipo adecuado y de su constante calibración.

Los análisis químicos de los extractos de las pastas de saturación del suelo permiten conocer el grado de interacción con las sales, antes y después de su lavado, de manera convencional y con la posibilidad de comparar diversos suelos y verificar aproximadamente los resultados obtenidos. De esta manera se pueden evaluar diversos parámetros y obtener correlaciones que se apliquen para valorar la compatibilidad y el grado de atenuación de los suelos, así como la adsorción específica de ciertas especies.

A través de pruebas fisicoquímicas como las de volumen de sedimentación y expansión libre es posible observar rápidamente diferencias de compatibilidad, no obstante, estas

pruebas están limitadas a arcillas con mayor capacidad de expansión. En este sentido, las pruebas de cromatografía en papel, patrón de agrietamiento con colorante y cambio de color tienen mayor alcance y pueden servir para optimar mezclas de arcillas y mejoradores, así como para observar cambios de tejido y de agregación. Sin embargo, este tipo de pruebas no reproducen las condiciones reales de campo.

Mediante pruebas de compatibilidad como las de difracción de rayos X, así como análisis en el microscopio electrónico de barrido (MEB) es posible determinar cambios críticos de estructura de los minerales de arcilla, como esmectitas y haloisitas hidratadas, así como variaciones en el tejido del suelo por interacciones adversas. Los resultados del MEB señalaron una diferencia posiblemente asociada con el punto de carga nula, pues hubo una gran diferencia entre los iones índice escogidos. Además, con el MEB podría también determinarse las concentraciones de ciertos contaminantes en varios niveles del perfil de un suelo y evaluar su capacidad de atenuación. El análisis elemental con EDS permite obtener relaciones sílice alúmina y su variación durante la prueba, con lo que se podría predecir un fenómeno de disolución a largo plazo; asimismo, puede ayudar a la diferenciación entre suelos residuales y sedimentarios por medio de la identificación de materiales.

## 8. CONCLUSIONES

Siempre camino en estas playas, entre arena y espuma. La alta marea borrará mis rastros, y el viento, la espuma. Pero el mar y la playa serán eternamente.

Gibrán Jalil Gibrán: *Arena y espuma*

Para entender el efecto particular de un cierto líquido en la permeabilidad de un revestimiento compuesto con suelos arcillosos, así como el de una sustancia empleada para mejorar la función de barrera impermeable de los mismos, es necesario tomar en cuenta factores ambientales tales como la temperatura, e identificar el balance final de las fuerzas interparticulares, por lo que se requiere mayor trabajo teórico y experimental para determinar parámetros tales como la estabilidad coloidal y de los agregados, así como la solubilidad de una sustancia empleada como mejorador con el fin de prever la durabilidad de ésta.

Al aumentar de concentración, las propiedades coligativas cambian y la mayor actividad de las sales inorgánicas puede aumentar la tensión superficial (mojan menos), mientras que las arcillas pueden dar origen a la formación de micelas de tensoactivos por medio del denominado enlace hidrófobo (agregación).

A través de un conjunto de diversas pruebas de compatibilidad establecidas y otras propuestas, como permeabilidad, cambios de plasticidad, pruebas fisicoquímicas, así como técnicas de difracción de rayos X y análisis con microscopio electrónico de barrido, en esta investigación se observó el efecto de condiciones de alta salinidad, tipo de electrólito, y gradientes de temperatura en el comportamiento de suelos arcillosos como material de revestimiento impermeable.

La principal prueba de compatibilidad fue la de permeabilidad, pues en último término es la que mejor refleja el comportamiento real en campo y la posibilidad de asociación de diversos gradientes, como hidráulico, químico y térmico, así como la posibilidad de evaluar la capacidad de autosellado y atenuación del material arcilloso.

El acoplamiento de gradientes debe tenerse en cuenta en pruebas de permeabilidad de carga variable, donde normalmente se aplican presiones altas para obtener resultados en un corto plazo.

Las muestras más sensibles al cambio de temperatura empleando agua como líquido permeante son las menos compresibles, que contienen ilita (mica hidratada) como mineral arcilloso predominante, así como la caolinita, donde se presentan incrementos de permeabilidad no explicables por el cambio de viscosidad del fluido. Como se pudo comprobar con ayuda de un colorante empleado como líquido trazador, la razón es que el índice de expansión térmica de estos materiales y el del permeámetro son diferentes, por

lo que al incrementarse súbitamente la temperatura se presenta un flujo extraordinario entre la muestra y la pared; asimismo, el calentamiento ocasiona una disminución de volumen, lo que facilita el drenaje lateral debido a que las arcillas de estas muestras no se expanden. En estos casos, los valores de pH que acompañan al aumento del efluente son parecidos a los del agua, lo que significa que ésta no se filtró lentamente a través del suelo, y que principalmente migró por la pared del permeámetro. Este elevado flujo es transitorio y disminuye con el tiempo, lo que se puede explicar por un reajuste de la estructura del suelo que le confiere características de autosellado.

Los valores de permeabilidad en los suelos expuestos a distintas concentraciones de salmuera fueron mayores que los medidos con agua destilada, o cuando menos similares; esto se verificó mediante una prueba en un permeámetro de pared flexible, aunque el incremento de permeabilidad medido fue menor por el efecto de la presión confinante aplicada.

No obstante la desventaja del permeámetro de pared rígida en cuanto a la posibilidad de permitir un excesivo flujo lateral cuando la interacción química causa contracción y agrietamiento de la muestra, resultó un sistema favorable en otros aspectos, como el de ser adecuado para una determinación cualitativa sobre el riesgo de interacciones adversas, así como el de poder aplicar distintos gradientes hidráulicos y de temperatura, permitir observar aspectos físicos de la muestra a través del acrílico transparente, contar con material suficiente para posteriores pruebas fisicoquímicas, determinar permeabilidades relativas y adquirir datos del efluente, así como realizar pruebas de compatibilidad a largo plazo sin problema de corrosión u obstrucción de conductos.

El sistema de pared rígida puede sobreestimar la conductividad hidráulica cuando la interacción química causa contracción y agrietamiento y, por tanto, excesivo flujo lateral; no obstante, es adecuado para una determinación cualitativa sobre la posibilidad de interacciones adversas. En el sistema de pared flexible la presión de confinamiento lateral previene la aparición de grietas, por lo que hay el riesgo de subestimar la conductividad hidráulica en algunos suelos.

El incremento de permeabilidad por efecto de la salmuera es parcialmente reversible cuando el agua se reutiliza como solución de prueba. Para ciertas concentraciones y tipos de arcillas, el flujo no disminuye sino hasta intercambiar la salmuera por agua como líquido permeante, y en ocasiones no llega a ser igual al original; sin embargo, faltó analizar más la capacidad de recuperación de los distintos materiales (autosellado), pues las pruebas generalmente se concluían tan pronto se manifestaba un incremento súbito de permeabilidad. Con excepción de las bentonitas, sobre todo tratadas con KCl, todas las muestras se pudieron lavar aparentemente del exceso de sales.

La determinación de contenidos de agua permitió verificar tendencias distintas en suelos con y sin capacidad de expansión. En los primeros se observó la activación con el NaCl al eliminar el exceso de sales. Esto se verificó con distintas sales y concentraciones; al utilizar KCl en vez de NaCl se observaron diferencias en los valores de pH y en la

concentración de cloruros, antes y después de lavar las muestras del exceso de sales. Los análisis químicos de los extractos de las pastas de saturación del suelo permiten conocer el grado de interacción con las sales, antes y después de su lavado, de manera convencional y con la posibilidad de comparar diversos suelos y verificar aproximadamente los resultados obtenidos. De esta manera se pueden evaluar diversos parámetros y obtener correlaciones que se apliquen para valorar la compatibilidad y el grado de atenuación de los suelos, así como la adsorción específica de ciertas especies.

En todas las arcillas, excepto la paligorskita, el efecto de la salmuera y de ésta en combinación con la temperatura produjo una reducción del volumen, tanto en las muestras que no tuvieron significativa variación de permeabilidad por aumento de la temperatura del agua, como en las originalmente susceptibles a dicho gradiente y donde el efecto fue aún mayor con la salmuera. Las pruebas con un líquido colorante empleado como trazador indicaron que la mayoría de las reducciones de volumen fueron de la sección transversal de la muestra entera, aunque en algunos especímenes se observó que el aumento de flujo fue también a través de ella, lo cual podría estar relacionado con el fenómeno de la formación de espacios vacíos y microfisuramiento asociados con la sinéresis y al proceso sol-gel. Estos materiales tuvieron como característica tener un límite líquido cercano al contenido de agua de compactación y la falta de cementantes, o bien contener haloisita y posiblemente material amorfo y ser suelos salinos; asimismo, en una muestra (Zamora) fue importante el efecto de envejecimiento. El comportamiento como gel y la variación de su rigidez con el tiempo y temperatura ayudan a entender fenómenos como la sinéresis en suelos compactados, sobre todo en condiciones donde no es posible aplicar la teoría de la doble capa para predecir el flujo. En pruebas con incrementos térmicos el flujo se observó en zonas de mayor temperatura, por lo que se sugiere considerar esto en el prototipo.

La muestra menos susceptible fue la Atapulgita, que trabajó con altas concentraciones de KCl cerca de 1000 días, con temperaturas hasta de 50°C, y aplicando gradientes hidráulicos cercanos a 40. Las muestras con altos contenidos de carbonatos, óxidos e hidróxidos de hierro, y posiblemente sulfatos, presentaron mayor capacidad de amortiguamiento. Por el contrario, los especímenes compuestos por esmectitas, haloisita hidratada e incluso una mezcla con zeolita, presentan susceptibilidad al flujo con salmueras, debido a que su capacidad de expansión e hidratación se anula, presentando caminos preferenciales a través de todo su espesor y área transversal como consecuencia de fenómenos explicados en parte por la acción de fuerzas electrostáticas. En muestras con contenido significativo de esmectita, especialmente la sódica que forma tactoides, la expansión inicial por contacto con agua es suprimida por la interacción con las salmueras, sobreviniendo un incremento de flujo lateral, como se pudo constatar al emplear líquidos trazadores. Las bentonitas tratadas con polímeros presentan menores incrementos de permeabilidad, sobre todo al trabajar junto con los geotextiles; es posible que estos últimos contribuyan a reducir el efecto de contracción provocado por las salmueras. Cabe mencionar que el efecto de primera exposición provoca fenómenos indeseables, como es la casi completa neutralización de las propiedades expansivas de los minerales que contiene el suelo, en particular la montmorilonita que es el principal componente de las

bentonitas, y sobre todo al trabajar en un geotextil. También se presentó un flujo importante por el centro de una muestra de bentonita, posiblemente al compactarse del lado seco y generar una mayor succión; además, esta muestra tiene menor concentración de carbonatos que las demás bentonitas.

Ya que el líquido permeante empleado en las pruebas es rico en cationes de una valencia en particular, ocurre un canje en los sitios de intercambio de las partículas arcillosas, las cuales se vuelven homoiónicas, comenzando por la parte superior de la muestra. Se observó mayor desecación en bentonitas de geotextiles y en las partes inferiores de muestras compactadas, que se atribuye a un efecto de ósmosis y a la presencia de un material permeable no saturado que subyace a la arcilla.

Los ciclos de carga y descarga de cargas hidráulicas, químicas y térmicas puede ayudar a comprender la reversibilidad de los procesos asociados.

La adsorción adicional de cationes y aniones en complejos de superficie puede cambiar el punto de carga cero (PZC), valor de pH en el que desaparecen componentes de la carga de superficie responsables de la fuerza de repulsión, y la muestra puede ser menos estable ya que las fuerzas de atracción, para una menor constante dieléctrica de la interfase, pueden vencer a las de solvatación y resultar en una mayor agregación. Los cambios en el PZC no requieren de adsorción específica, sino sólo la formación de complejos de superficie. La concentración y rapidez de la coagulación rápida fue menor en sistemas con menor concentración de coloides, como sucede en los GCL y en pruebas de expansión libre, lo que comprueba que la formación de complejos de superficie es la causa de la coagulación.

Las diferencias entre las conductividades eléctricas y valores de pH medidos en suspensiones y soluciones de bentonita tratada con salmueras pueden tener relación con los distintos puntos de carga cero. Mientras que en el PZC señala ausencia de iones adsorbidos de movimiento libre y el aumento de las fuerzas interparticulares que producen efectos coagulantes, en cambio sí existen iones libres adsorbidos en el PZNC, lo que trae implicaciones sobre la formación de agregados y retención de iones en los suelos. Además de la conductividad, el pH es un parámetro que puede servir para indicar interacción del flujo con el suelo, intercambio iónico, porcentaje de saturación y variación de las cargas de superficie responsables de la repulsión entre partículas, disolución, y capacidad de amortiguamiento. No obstante, su medición requiere de equipo adecuado y de su constante calibración.

Diversas pruebas de compatibilidad demostraron un cambio importante de propiedades como plasticidad, permeabilidad, iones en solución, expansión y color para salmueras de KCl superiores al 10% (en peso). Esta sal constituye un electrólito no indiferente que produce efectos similares a un secado enérgico. En casos extremos esto se traduce en la transformación de la bentonita en un material del tipo íltico, mientras que en el grupo de las caolinitas puede ocurrir el fenómeno de intersalación (incorporación del potasio entre las capas). La temperatura ayuda a la coagulación y reducción del volumen del sistema

coloidal y afecta la solubilidad de la solución de prueba. Las sales en altas concentraciones mojan menos, disminuyen las fuerzas de repulsión y causan el colapso del disolvente (electrorestricción). Además, disminuyen la temperatura a la cual se reduce la capacidad de expansión y las fuerzas de solvatación que se oponen a la agregación; asimismo, alteran la formación de complejos de superficie y favorecen una rápida coagulación. Se podría decir que la sal, especialmente la de KCl, facilita el secado térmico.

Con el fin de aclarar resultados de variaciones de plasticidad en suelos arcillosos, se realizaron pruebas controladas en bentonitas tratadas con salmueras. Después de cuidar que las variaciones no provenían de errores de operación o cambios en los métodos experimentales, se encontró que existe una relación entre la concentración salina del agua intersticial de los suelos y las propiedades en cuestión, que permiten establecer correlaciones entre arcillas de un mismo origen que tienen contenidos salinos diferentes. La presencia de un exceso de cloro, sodio y potasio solubles fue determinada por medio de estudios químicos del agua de poro. Se observaron diferencias entre electrólitos inertes (NaCl) y otros no indiferentes (KCl).

Con relación a los cambios de la plasticidad, los datos obtenidos en una primer etapa de experimentación sistemática realizada con muestras de bentonitas tratadas con distintas concentraciones de salmueras, quedan señalados en varias gráficas por líneas con una tendencia general similar; esto comprueba que la plasticidad de muestras con la misma composición mineralógica varía de acuerdo con el tipo de intercambio catiónico (variación en el parámetro de red) y contenido de sales en el agua de poro, mientras que las características de la fracción coloidal permanecen esencialmente inalteradas. Asimismo, se pudo comprobar mediante un análisis químico del agua intersticial de los suelos en estudio, la influencia que tiene en el espesor de la doble capa difusa la presencia de un exceso de iones en el agua de poro; el efecto del anión (Cl<sup>-</sup>) fue tanto o más notorio que el del catión.

En las respectivas pruebas de intercambio de bases en muestras que contienen esmectita se observó una tendencia de mayor aumento en las posiciones de intercambio ocupadas al interactuar con salmueras de KCl. Los resultados de las pruebas fisicoquímicas indican que al exponer las muestras a la acción del sodio, la cantidad de este catión aumenta en los sitios de intercambio, mientras que el valor correspondiente del potasio no presenta una variación significativa. El efecto del cloruro de potasio es todavía más notorio; es decir, en la medida que aumentan los sitios de intercambio de potasio, el valor correspondiente del sodio disminuye de manera considerable, lo que parece indicar un desplazamiento entre dichos cationes y una mayor retención del potasio.

En una segunda etapa, relativos a los límites de plasticidad de las muestras de los permeámetros, en su mayoría tratados con KCl, se observó una tendencia para aquellas con mayor capacidad de expansión y otra distinta para el resto de las muestras; en las primeras, en general, el sentido de cambio del límite líquido (LL) y el plástico (LP) es opuesto, y depende del tipo de catión y de las condiciones de exposición; el desarrollo del

potencial osmótico en el LP puede explicar su aumento por características propias de la prueba. La doble capa tiene una contribución marginal en arcillas con menor capacidad de expansión, donde domina la componente matricial, y es la resistencia al corte en la escala entre partículas la que gobierna dicha resistencia. El tejido (estructura) de estas arcillas es controlado por fuerzas de atracción y repulsión entre partículas, que afectan en el mismo sentido los límites líquido y plástico de estos suelos; el tejido no es tan sensible al tipo de catión y concentración.

La diferencia en la preparación de las muestras contaminadas con menores concentraciones de salmueras de NaCl y KCl en una tercera etapa, con tratamientos y procedimientos de lavado más controlados y reproducibles respecto de la primera etapa, no modificaron el comportamiento general reflejado por las líneas que unen los puntos obtenidos experimentalmente para cada tipo de sal. Se observan tendencias similares en los dos tipos de sales empleados, esto es, disminución de plasticidad con el tratamiento y aumento de ésta con el lavado de las sales; no obstante, hay diferencias específicas en ciertos parámetros como son la conductividad, el pH y la retención de aniones, para cada tipo y concentración de sal. Estas semejanzas y diferencias pueden deberse a la composición mineral de la muestra y a las características específicas del compuesto salino, ya que uno es un electrólito 1:1 no indiferente (KCl). Asimismo, se observaron variaciones en los límites e índices de contracción, que son parámetros que intervienen en el cálculo de muchas de las propiedades para evaluar un material propuesto como revestimiento.

También se comprobó que la sola concentración de sales como dato para estimar los diversos contenidos de agua correspondientes a varios estados de plasticidad del material pueden conducir a errores si no se consideran factores como la clase de sal, concentración, e intercambio iónico con cada tipo de suelo y capacidad de expansión de éste. Para examinar la repercusión que tiene el contenido de sal en las propiedades índice del suelo, por lo menos en lo que respecta a los límites de Atterberg, es recomendable estudiar la interacción fisicoquímica que existe entre los minerales de arcilla y los compuestos salinos involucrados, considerando el tipo de arcilla y de sal, así como la modificación de las fuerzas entre partículas y el intercambio iónico, cuyos efectos pueden alterar la dirección de cambio de los límites plástico y líquido en un mismo o distinto sentido. Además, debe tomarse en cuenta que la forma tradicional para determinar dichas propiedades implica un lavado del suelo, lo cual modifica las concentraciones de sal. Es decir, que el estudio del comportamiento del suelo cuya salinidad es alta, es un problema complejo que requiere de mayor investigación, pues no es suficiente incluir un porcentaje de sal en el peso de los sólidos y corregir las propiedades índice que involucran a este parámetro.

Al observar los resultados del análisis de los difractogramas correspondientes a las muestras tratadas con salmueras (KCl o NaCl), es interesante advertir que en el espécimen tratado, antes de eliminarse el exceso de sales, la montmorillonita deja de ser la especie mineral con fase predominante, siendo desplazada a otra fase de menor concentración, o bien, su presencia se oculta. Este efecto es más evidente cuando el



tratamiento se hace con KCl. Al lavar la muestra, la fase de la montmorilonita se observa nuevamente en los difractogramas. Por lo anterior, es importante correlacionar las pruebas fisicoquímicas con los métodos de identificación antes de llegar a interpretaciones aisladas. Por medio de difracción de rayos X se pudo observar cambios en el patrón de red en las esmectitas y una cierta relación entre el sistema cristalino y el complejo de cambio de la bentonita, así como una posible deshidratación de la haloisita, que pasa a ser metahaloisita; estos cambios podrían explicar los aumentos de permeabilidad en muestras como las bentonitas y la muestra Zamora.

Mediante análisis en el microscopio electrónico de barrido (MEB) es posible determinar cambios críticos de estructura de los minerales de arcilla, como esmectitas y haloisitas hidratadas, así como variaciones en el tejido del suelo por interacciones adversas. Los resultados del MEB señalaron una diferencia posiblemente asociada con el punto de carga nula, pues hubo una gran diferencia entre los iones índice escogidos. Además, con el MEB podría también determinarse las concentraciones de ciertos contaminantes en varios niveles del perfil de un suelo y evaluar su capacidad de atenuación. El análisis elemental con EDS puede ayudar a determinar relaciones entre sílice y alúmina y procesos de disolución, así como cantidades de componentes característicos de suelos transportados.

A través de pruebas fisicoquímicas como las de volumen de sedimentación y expansión libre es posible observar rápidamente diferencias de compatibilidad, no obstante, estas pruebas están limitadas a arcillas con mayor capacidad de expansión. En este sentido, las pruebas de cromatografía en papel, patrón de agrietamiento con colorante y cambio de color tienen mayor alcance y pueden servir para optimar mezclas de arcillas y mejoradores, así como para observar cambios de tejido y de agregación. Se propone la determinación de la CIC con el método del halo en las muestras de los permeámetros como una prueba de compatibilidad simple y de bajo costo, así como la prueba del hidrómetro. Sin embargo, este tipo de pruebas no reproduce las condiciones reales de campo.

En general, se puede concluir que los suelos compuestos principalmente por arcillas silicatadas de carga permanente que desarrollan grandes espesores de doble capa eléctrica son más susceptibles de sufrir cambios en su estructura al interactuar con soluciones electrolíticas, sufriendo como consecuencia aumentos de permeabilidad. Por otra parte, arcillas del tipo de carga variable, como la caolinita, pese a tener valores de permeabilidad ligeramente mayores que las del tipo anterior, al tener bajo potencial electrocinético se comportan de manera más estable en ambientes salinos a temperatura ambiente. Por lo anterior, es recomendable que no se utilicen como material de revestimiento suelos arcillosos con contenido apreciable de esmectita sódica, por ejemplo bentonitas activadas, y haloisitas hidratadas que puedan ser expuestos a salmueras alcalinas en concentraciones mayores al 10% (o menores con electrolitos no inertes como el KCl, en peso), especialmente durante periodos prolongados y con incrementos de temperatura; en caso contrario, dichos materiales pueden fallar como impermeabilizantes ya que al variar sus propiedades de plasticidad e hidratación son susceptibles de sufrir contracciones y agrietamientos. La caolinita, y en mucho menor grado la illita, presentan

también susceptibilidad ante gradientes asociados. Esta última arcilla puede emplearse en estanques solares para aprovechar su capacidad de aislamiento térmico. La presencia de cementantes y su disolución es un factor muy importante en la estabilidad hidráulica de estos minerales. La arcilla más estable en condiciones críticas de operación con diversos gradientes fue la palíorskita, la cual puede encontrarse en el sureste de México.

Los cambios mencionados en las propiedades del suelo que ocurren por efecto de sales solubles y su lavado del suelo, deben tomarse en consideración al evaluar las propiedades estructurales de suelos salinos y predecir los cambios que pueden ocurrir con el tiempo y otros gradientes, como el térmico e hidráulico. Conocidas ciertas características del líquido al que se someterá la muestra en campo, éstas se pueden reproducir en laboratorio con condiciones controladas y generar los valores de plasticidad que puede tener un cierto suelo arcilloso, aunque falta investigar más con distintos tipos de arcillas y mezclas de éstas, así como con distintos líquidos permeantes (además de sales neutras) y cambios de temperatura. Para poder correlacionar los cambios de permeabilidad y plasticidad que se presentan en suelos arcillosos al interaccionar con salmueras en distintas concentraciones (expresadas en porcentaje en peso o molalidad para evitar tener que considerar variaciones por cambios de temperatura) y tiempos de exposición, se sugiere continuar con el análisis comparativo por medio de pruebas fisicoquímicas de las muestras más representativas. Para llevar un mejor control asociado con las variaciones de permeabilidad se sugiere que, además de la medida de pH, también se registre la conductividad eléctrica de los efluentes, así como tipo y concentración de sales disueltas. Asimismo, se plantea revisar las pruebas de permeabilidad presentadas para programar de manera óptima nuevos y más representativos ensayos, que se acompañen de otras pruebas de compatibilidad, en las que también se propongan mejoras que permitan apreciar variaciones de volumen y de estructura más sutiles que ocurren en suelos de baja capacidad de expansión.

Esta investigación ha permitido proponer aplicaciones adicionales, como estudios sobre tratamientos químicos para mejorar el comportamiento de suelos arcillosos empleados como barreras impermeables, así como análisis de dispersión de arcillas en problemas de tubificación de presas de tierra. En este sentido se propone utilizar una zeolita sódica como la empleada en esta investigación, pero buscar una mezcla más afortunada con otra arcilla; asimismo, se sugiere tratar con ciertos cementantes a materiales del grupo de la caolinita y estudiar la posibilidad de estabilizar a materiales expansivos con iones determinantes de potencial y coloides con capacidad protectora. Por otro lado, se propone que además de la relación de adsorción de sodio (RAS) se considere la de potasio (RAP); porcentajes altos de ella asegurarían baja dispersión en cualquier condición; igualmente valiosas resultan las determinaciones de iones solubles, como bicarbonatos, cloruros, calcio y magnesio; altos valores de potencial osmótico, determinados, por ejemplo, con pruebas sencillas como la de volumen de sedimentación o capacidad de expansión libre pueden ayudar a predecir procesos de filtración física. También se sugiere correlacionar la agregación del material y su resistencia a la erosión con valores de sensibilidad.

Algunas recomendaciones prácticas serían en el sentido de la importancia del control de calidad en la construcción de revestimientos con suelos arcillosos, donde las heterogeneidades (material, colocación, gradientes) pueden provocar caminos preferenciales de flujo, para suelos con baja y alta capacidad de expansión.

La teoría de la precolación puede ser útil para modelar el flujo en condiciones de asociación de gradientes. El umbral de precolación dependerá de la densidad de fracturas y ésta de los gradientes aplicados. Las clases de conectividad variarán en función de la mineralogía.

EL MEB permitió advertir una cristalización característica en el KCl que podría estar relacionada con una facilidad para la conectividad de poros y el flujo. Estudios con microscopio de fuerza atómica podrán ayudar a determinar la estructura de las arcillas con distintos contenidos de agua. Convendría determinar las relaciones que podrían existir entre salmueras y sustancias orgánicas, en cuanto al efecto en la permeabilidad de suelos arcillosos.

## REFERENCIAS

La duración en la búsqueda no es suficiente. Lo que no se busca como corresponde no se encuentra.

I Ching: *El libro de las mutaciones*

Achari, G. Joshi, R. C. Bentley, L. R. y Chatterji, S. (1999), Prediction of the hydraulic conductivity of clays using the electric double layer theory, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC, **36**(5), 783-792.

Aguilera, H. N. (1989), *Tratado de Edafología*, t I, Facultad de Ciencias, UNAM.

Almanza, R. Martínez, A. y Segura, G. (1989), Study of a kaolinite clay as a liner for solar ponds, *Solar Energy*, **42** (5), Holanda, 395-403.

Almanza, R. y Lozano, M. C. (1990), Mechanical and thermal tests of a bentonite clay for use as a liner for solar ponds, *Solar Energy*, **45** (4), Holanda, 1990, 241-245.

Almanza, R. (1991), Permeabilidad de revestimientos de arcillas. *Memorias del Simposio Geotecnia y Medio Ambiente, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C.*

Almanza, R. y Castañeda, R. (1993), What type of clays can be used as liners for NaCl solar ponds?, *Solar Energy*, **51** (4), Alemania, 293-297.

Almanza, R. y Muñoz, F. (1994), *Ingeniería de la energía solar*, El Colegio Nacional, México.

Almanza, R. Castañeda, R. y Silva, G. (1995), Temperature-electrolyte effects on clay soil liners, *1<sup>st</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils*, **1**, París, 343-348.

Almanza, R. (ed) (2003), *Ingeniería de la energía solar II*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México (en prensa).

Almanza, R (ed). Callejas, O, Correa, G, Flores, V, Jiménez, G , Lentz, A, Martínez, I, Mazari, M y Silva, G(2003), *Ingeniería de la energía solar II*, SID/636, Instituto de Ingeniería, UNAM, ISBN 970-32 1153-4, 425 pp, en prensa

Alther, G., Evans, J. C., Fang, H. Y., y Witmer, K. (1985), Influence of Inorganic Permeants upon the Permeability of Bentonite, *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*, ASTM STP 874, ASCE, Philadelphia, 64-73.

ASTM (1986), *Annual Book of ASTM Standards*, Sec. 4, Vol. 04.08, Philadelphia, EUA.

\_\_\_\_\_ (1988), Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, *Standard Designation C 837-81*, Annual Book of ASTM Standars, 275-276.

August, H., Holzlöhner U. y Meggyes, T (eds) (1997), *Advanced landfill liner systems*, Thomas Telford, Reino Unido.

Auvinet, G. y Esquivel, R. (1986), *Impermeabilización de lagunas artificiales*, Limusa y SMMS. México.

Auvinet, G. y Bouvard, D. (1989), Geometric scale effect in granular media, *Proceedings of Powders and Grains*, Biarez & Gourvès (eds), Balkema, Rotterdam, Holanda.

Bagchi, A. (1989), *Design, construction and monitoring of sanitary landfill*, John Wiley & Sons, Nueva York, EUA.

Barajas, M. (1997), Evaluación de alternativas de tratamiento de sales cristalinas sobre pintura mural al fresco, tesis de licenciatura, ENCRyM, INAH, México.

Baver, L., Gardner, H. y Gardner R. (1980), *Física de suelos*, 4ª ed., Ed. UTEHA, Limusa, México.

Baver, L. y Winterkorn, H. (1935), Sorption of liquids by soil colloids: II. Surface behavior in the hydration of clays. *Soil Sci.* **40**, 403-419.

Besoain, E. (1985), *Mineralogía de arcillas de suelos*, IICPA, San José, Costa Rica.

Bjerrum, L. y Huder, J. (1957), Measurement of the Permeability of Compacted Clays, *Proceedings*, Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, **1**, London, 6-10.

Bornemisza, E. (1982), *Introducción a la química de suelos*, OEA, Serie de química, No. 25, Washington, D C.

Bosch, P. y Schifter, I. (1991), *La Zeolita, una piedra que hierve*, La ciencia desde México / 55, SEP y FCE, México.

Botello, M. E. (1997), *Análisis comparativos entre dos consolidantes aplicados a un modelo teórico cerámico: Tenexco, S.L.P. y la identificación elemental de las arcillas por FRX y NNA*, Tesis de licenciatura, ENCRyM, INAH, México.

Brady, N.C. (1974), *The Nature and Properties of Soils*. MacMillan, Nueva York, EUA.

Broderick, G. P. y Daniel, D. E. (1990), Stabilizing compacted clay against chemical attack, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **116** (10) 1549-1567.

Brown, T. L., LeMay, H. E. y Bursten, B. (1993), *Química, la ciencia central*, Prentice Hall, México.

Brooks, R.H. y Corey A.T. (1966), *Properties of porous media affecting fluid flow*. J. Irrig. Drainage Div, ASCE proc. **61** (72).

CETCO (1994a), Technical Data Sheet TD 229 CRC, *American Colloid CETCO*, Illinois, EUA.

CETCO (1994b), Technical Note No.3, *American Colloid CETCO*, Illinois, EUA.

Cepeda, J. M. (1991) *Química de suelos*, Ed. Trillas y UAAAN, México.

Cordero, A. (1997), *Apuntes del curso: cristalografía de suelos*, IFUNAM y SMC, México.

Craig, D. A. (1981), *Organic leachate effects on the permeability of clay soils*, tesis de maestría en ciencias, A&M University, Texas, EUA.

Crockford, H. y Knight, S. (1983), *Fundamentos de fisicoquímica*, CECSA, México.

Daniel, C. y Wood, F. S. (1973), *Fitting equations data*, Wiley-Interscience, Nueva York, EUA.

Daoud, F. Z. (1996), La perméabilité des sols fins compactés, tesis de doctorado, *INPL*, Francia.

Das, B. M. (1994), *Principles of geotechnical engineering*, 3a ed, PWS Publishing Company, Boston, EUA.

De Marsily, G. (1986), *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press, London.

De Vries, D.A., (1963), Thermal Properties of Soils, *Physics of Plant Environment*, (W.R. Van Wijk, ed.), North Holland Publ., Amsterdam.

Decker, R. y Dunnigan, L. (1977), Development and use of the Soil Conservation Service Dispersion Test. *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, *ASTM Special Technical Publication 623*, EUA.

Dewhurst, D., Cartwright, J. y Lonergan, L. (1999), Three-dimensional consolidation of fine-grained sediments, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC, **36**, 355-362.

Dillard, C. y Goldberg, D. (1977), *Química: reacciones, estructuras, propiedades*, Fondo Educativo Interamericano, S.A., EUA.

Di Maio, C., Hueckel, T., Loret, B. (2002) Chemo-Mechanical Coupling in Clays, from Nano-Scale to Engineering Applications, A. A. Balkema Publishers, Holanda.

Domenico, A. P. y Schwartz, W. F. (1990), *Physical and chemical hydrogeology*, John Wiley & Sons, Nueva York, EUA.

Domínguez, J. M. y Schifter, I. (1992), *Las arcillas el barro noble*, La ciencia desde México No. 109, SEP, Fondo de Cultura Económica, México.

Duer, K. y Svendsen, S. (1993), Construction of a seasonal heat storage based on a pit with clay membrane, *ISES Solar World Congress*, 4, Budapest, Hungría.

Durand-Chastel, H. (1968), Une utilisation originale de l'énergie solaire: L'exploitation de saumures de carbonate de soude au Mexique, *Sciences et techniques No. 12*, Société d'édition de la Rue Blanche, Francia, 23-25.

Environmental Protection Agency (1974), *Report to Congress: Disposal of Hazardous Waste*. SW-115. U.S., Washington, D.C., EUA.

\_\_\_\_\_ (1989), *Requirements for hazardous waste landfill design, construction, and closure*, Publication No. EPA-625/4-89-022, Cincinnati, EUA.

Evans, J. C. (1991), Geotechnics of hazardous waste control systems, cap 20 en *Foundation engineering handbook*, 2a ed, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, EUA.

Fang, H. Y. (ed) (1991), *Foundation engineering handbook*, 2a ed, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, EUA.

Fang, H. Y. y Inyang, H. I., (eds) (1996), Environmental geotechnology, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international symposium*, 1, Technomic Publishing Co Inc, California, EUA.

Fernández, V. G. (1990), *Manual de Laboratorio de Química de Agua*, Facultad de Ingeniería, DEPFI, UNAM, México.

Fernández, F. y Quigley, R. (1985), Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons, *Canadian Geotechnic Journal* 22, 205-214.

Fieldes, M. y Perrot, K. (1966), Nature of allophane in soil III. Rapid field and laboratory test for allophane. *Journal of Science* 9: 693-698, Nueva Zelanda.

Figueroa, G. (1996), La consolidación total unidimensional de los suelos saturados y su aplicación a los hundimientos ocasionados por bombeo, tesis de doctorado, *DEPFI-UNAM*, México.

Fletcher, P. (1993), *Chemical Thermodynamics for Earth Scientists*, Longman Scientific & Technical, Nueva York, EUA.

- Fredlund, D. G. y Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, Inc, Nueva York, EUA.
- García, N. y Ramírez, R. (ed.) (1995), *Simposio Universitario de Edafología, Resúmenes in extenso*. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Gavande, A. S. (1982) *Física de suelos*; Ed. Limusa, México.
- Grim, R. E. (1953), *Clay Mineralogy*, McGraw-Hill, EUA, pp 37-38.
- \_\_\_\_\_ (1962), *Applied clay mineralogy*, McGraw-Hill, EUA.
- Goldman, L. J. y Greenfield L. I. (1988), *Design, construction, and evaluation of clay liners for waste management facilities*, EPA/530/SW-86/007F, EUA.
- Gray, D. H. y Mitchell, J. K. (1967), Fundamental aspects of electro-osmosis in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **93** (SM6), pp 209-236.
- Gutiérrez, M., Romero y Rosas, H. (2001), Físicoquímica de los residuos mineros, *Seminario: almacenamiento de residuos mineros en México*; SMMS, CNA, y Cámara Minera de México, 125-130.
- Hall, J. R., Nielsen, C. E., y Golding, P. (1989), *Salinity-gradient solar ponds*, CRC Press, Florida, EUA.
- Hardcastle, J. H. y Mitchell, J. K. (1973), Electrolyte concentration-permeability relationships in sodium illite-silt mixtures, *Clays and Clay Minerals*, **22**, 143-154.
- Hassairi, M., Safi, M. J. y Chibani, S. (2001), Natural brine solar pond: an experimental study, *Solar Energy*, **70** (1), Holanda, 45-50.
- Ho, Y. y Pufahl, D. (1987), The effects of brine contamination on the properties of fine grained soils, *Proceedings of the geotechnical practice for waste disposal*, Woods, R (ed), EUA, 547-561.
- Holmgren, G.G.S. y Flanagan C.P. (1976), Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test, *ASTM Special Technical Publication 623*, EUA, 218-239.
- Hueckel, T. A. (1992), Water-mineral interaction in hygromechanics of clays exposed to environmental loads; a mixture-theory approach, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC, **29**, 1071-1086.



Hutcheson, W. L. (1958), *Moisture flow induced by thermal gradients within unsaturated soils*. Highway Res. Board. Spec. Rept. **40**, 113-133.

IGAC (1995), *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, Ed. Canal Ramírez Antares Ltda., Santafé de Bogotá, Colombia.

INEGI (1980), *Carta edafológica E 14-5 Cuernavaca (Totolapan)*, escala 1:250,000, México.

INEGI (1982), *Carta edafológica H 14-10 Piedras Negras (Río Escondido)*, escala 1:250,000, México.

INEGI (1983), *Carta edafológica E 13-3 Colima (Zamora)*, escala 1:250,000, México.

INEGI (1990), *Guías para la interpretación de Cartografía, Edafología y Geología, 1990*, México.

Jackson, M. . (1960), *Soil Chemical Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, EUA

Jefferis, S. A. y Sheikh, B. A. (1995), Investigation of syneresis in silicate-aluminate grouts, *Géotechnique*, 45, (1), 131-140.

Jiménez, J. A. (1990), *Décima conferencia Nabor Carrillo*, SMMS, México

Juárez, E. y Rico, R. (1986), *Mecánica de suelos*, t 1, Limusa, México, 135-138.

Jubran, B. A., El-Baz, A R., Hamdan, M. A. y Badran, A. A. (1996), Experimental investigation of local clays and clay schemes as liners for solar ponds, *International Journal of Energy Research*, **20**, 637-642.

Kahr G. y Madsen F. (1995), Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption, *Applied Clay Science* **9**. EUA, 327-226.

Kaminsky, Manfred (1956), Concentration and temperture dependence of the viscosity of aqueous solutions of strong electrolytes. *Z. Physik. Chem.*, **8**, Frankfurt, 173-179 (en alemán).

Kaminsky, Manfred (1957), Concentration and temperture dependece of the viscosity of aqueous solutions of strong electrolytes. *Z. Physik. Chem.*, **12**, Frankfurt, 206-231 (en alemán).

Kirkham, D., y Powers, W.L., (1972), *Advanced Soil Physics*, Wiley.Interscience, EUA.

- Koerner, R. M., Gartung, E. y Zanzinger, H. (eds) (1995), *Geosynthetic clay liners, Proceedings of an International Symposium, A.A. Balkema*, Rotterdam, Holanda.
- Laguros, J. (1969), Effect of temperature on some engineering properties of clay soils. effects of temperature and heat on engineering behavior of soils, *Special Report 103, Highway Research Board*, EUA, 186-193.
- Lambe, T. W. (1951) *Soil Testing for Engineers*, ed. John Wiley & Sons, EUA.
- Lambe, T. W. y Whitman, V. R. (1987), *Mecánica de Suelos*, Ed. Limusa, México.
- Lange, A. (1992), *Lange's Handbook of Chemistry*, 14th ed., Dean J. A. ed., McGraw-Hill, EUA.
- Lingnau, B., Graham, J. y Tanaka, N. (1995), *A behavioral model for sand-bentonite at elevated temperatures X PANAM*, SIMSIC, ISSMFE, Guadalajara, México.
- Lyon, T. L. y Buckman, H. O. (1956), *Edafología. Naturaleza y propiedades del suelo*, Compañía Editorial Continental, México.
- Marsal, R. (1979), *Suelos Compactados (Compendio)*. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Marsal, R. (1969), Contribution on mechanical properties of rockfill, *VII ICSMFE, Specialty Session N° 13*, México.
- Marsal, R. y Graue, R. (1969), El subsuelo del lago Texcoco, *Volumen Nabor Carrillo*, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México.
- Marshall, T. J. (1959), Relations Between Water and Soil. *Tech. Commun. No. 50. Commonwealth Bureau of Soils*, Harpenden Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Bucks, Inglaterra.
- Mazari, M., Alberro, J. Mazari, H. y González, S. (1996), Agrietamiento de arcillas lacustres y su relación con el uso y reúso del agua, *Hacia el Tercer Milenio*, El Colegio Nacional, México, 113-156.
- McNeal, B. L. y Coleman, N. T. (1966), Effect of Solution Composition on soil hydraulic conductivity, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **30**, 308-312.
- Mesri, G. y Olson, R. (1971), Mechanisms controlling the permeability of clays. *Clays and Minerals*, Pergamon Press, Reino Unido, **19**, 151-158.

Mitchell, J. K. (1969), *Temperature Effects on the Engineering Properties and Behavior of Soils*, Paper press. HRB Am. Mtg. Jan. 1969. EUA.

Mitchell, J. K. (1973), *Fundamentals of soil behavior*, 1a ed, John Wiley & Sons, Nueva York, EUA.

Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of soil behavior*, 2a ed, John Wiley & Sons, Nueva York, EUA.

Mitchell, J. K. (1994), Physical barriers for waste containment, *1st. International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Alberta, Canadá, 951-962.

Mitchell, J. K. (1996) Geotechnology – the environmental perspective, *Environmental Geotechnology, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium, 1*, EUA, 1-18.

Mitchell, J. K. y Kao, T. C. (1978), Measurement of soil thermal resistivity, *Journal of the Geotechnical Engineering Division G T 10*. EUA.

Mitchell, J. K. y Madsen, F. T. (1987), Chemical effects on clay hydraulic conductivity, *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, Geotechnical Special Pub. No. 13, ASCE, 87-116.

Mitchell, J. K. y Jaber, M. (1990), Factors controlling the long-term properties of clay liners, *Geotechnical Special Publication No. 25*, ASCE, EUA, 84-105.

Morales, R. (1990), Comportamiento hidráulico de los geotextiles, *Simposio: sobre Geosintéticos*, SMMS, México, 139-146.

Morgenstern, N. R. (1994), The Observational Method in Environmental Geotechnics, *1st. International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Alberta, Canadá, 963-975.

Motiani, M., Kumar, A., Kishore, V. N. y Rao, K. S. (1990), Construction details of a 6000 m<sup>2</sup> solar pond at Kutch Dairy Bhuj. *Proceedings of the 2nd International Conference Progress in Solar Ponds*, Roma, Italia, 235-243.

Munsell Color (ed) (2000), *Munsell Soil Color Charts*, Nueva York.

Murillo, R. (1990), Protección contra erosión y drenaje en el lago Dr. Nabor Carrillo, *Simposio: sobre Geosintéticos*, SMMS, México, 147-151.

Murillo, R. (ed) (1990), Geosintéticos, Geotextiles y Geomembranas. *Memorias del Simposio realizado en julio de 1990*. SMMS A.C., México.

Nekrásov, B.V. (1981), *Química General*, Editorial MIR, 4<sup>ª</sup> ed. Moscú, 444-445.

Ortiz, B. y Ortiz, C. (1988), *Edafología*, 6ª ed, Universidad Autónoma de Chapingo, México.

Ortega, M. (2003), Caracterización de pigmentos prehispánicos por técnicas analíticas modernas, tesis de doctorado, *Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México*, Toluca, 112 pp.

Page, A. L. (ed) (1982), Methods of soil analysis, No 9 (2), *Chemical and microbiological properties*, 2a ed, EUA.

Palmer, R. y Troeh, F. (1989), *Introducción a la ciencia del suelo*, AGT Editor, S.A., México.

Parker, P. S. (1992), *McGraw Hill Concise Encyclopedia of Science & Technology*, Editor in Chief, Third edition, EUA.

Parker, P. S. (1994), *McGraw Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*, Editor in Chief, Fifth edition, EUA.

Peirce, J., Salfors, G. Peel, T. y Witter, K. (1987), Effects of selected inorganic leachates on clay permeability, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **113** (8).

Perry, R H. y Chilton, CH. (1973), *Chemical Engineers' Handbook*, 5th edition. McGraw-Hill, Tokyo.

Perry, R. y Green, D. (eds) (1984), *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, sixth ed., Mc.Graw Hill, 398-399.

Petrukhin, V. P. (1993), *Construction of structures on saline soils*, Russian Translations Series, A A Balkema, Rotterdam/Brookfield, Holanda, 2-18

Plum, R. y Esrig, M. (1969), Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure, *Special Report 103, Highway Research Board*, EUA, 231-241.

Price, M. (2003), *Agua subterránea*, Limusa, México, 330 pp

Pulido, R. Flores, D. y Calderón, G. (2000), Salinización de suelos por efectos de intrusión salina derivada de fosas de separación en la zona de Tabasco, *Revista del IMIQ*, XLI, 9 (10), México, 3-9.

Quirk, J. P. y Schofield, R. K. (1955), The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *Journal of Soil Science*, **6**, No 2.

Reyes, V., Constantino (1993), *De Bonampak al Templo Mayor. El azul maya en Mesoamérica*, Ed. Siglo XXI, AGRO, ASEMEX, México.

Rico, R. y Castillo, H. (1987), *La Ingeniería de suelos en las vías terrestres*, 1, Limusa, México.

Richards, L. A. (Ed) (1954), *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Agriculture Handbook No. 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., EUA.

Reeve, R. C. y Bower, C. A. (1960), Use of high-salt waters as flocculant and source of divalent cations for reclaiming sodic soils, *Soil Science* 90, 139-144.

Reeve, R. C. y Tamaddoni, G. H. (1965), Effect of electrolyte concentration on laboratory permeability and field intake rate of a sodic soil, *Soil Science* 99, 261-266.

Robbins, M., Lu, H. y Swift, A. Jr. (1995), Investigation of the suitability of a geosynthetic clay liner system for the El Paso solar pond, *Proceedings of 1995 Annual Conference American Solar Energy Society*, EUA, 63-68.

Rodríguez, J. (1986), *Fundamentos de cristalografía física*, OEA, Serie de física, No. 15, Washington, D C

Romero, F., Gutiérrez, M. y Santos, J. (2001), Metodología de evaluación del riesgo asociado a elementos potencialmente tóxicos contenidos en presas de jales, *Seminario: almacenamiento de residuos mineros en México*; SMMS, CNA, y Cámara Minera de México, México, 118.

Romo, M. P. (1990), Medición de la succión en suelos parcialmente saturados, *Décima conferencia Nabor Carrillo*, SMMS, México.

Sales, G.P. (1988), *Geología Económica de México*, Sales G. P. ed., México, 169-170.

Salvat (eds) (1979), *Enciclopedia Salvat de la técnica Cómo Funciona*, vol 1, España.

Scott, R. y Ko, H. Y. (1969), Stress-deformation and strength characteristics, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (State of the art volume), Mexico.

Shackelford, C. D. y De Mello, L. G. (1994), Clay liner design, testing, and construction. *1st. International Congress on Environmental Geotechnics*, Alberta, Canadá, 984-987.

Shackelford, C. D. y Benson, C. H. (1995), *Lecture notes for caterpillar hemispheric series of short courses on soil liners and covers for landfills*, CoHemis, Puerto Rico.

Shackelford, C. D. y Nelson, D. (1996), Geoenvironmental design considerations for tailing dams, *Proceedings of the International Symposium on Seismic and Environmental Aspects of Dams Design: Earth, concrete and tailings dams*, 1, Santiago, Chile.

Shaktour, K. M. y Daignault, L. G. (1996), A study on factors affecting the permeability of clay liner, *Environmental Geotechnology, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium*, 1, EUA, 255-262.

Shen, R. T. (1962), *Sealing farm ponds and reservoirs with bentonite*, Circular 206-A, Extension Service, Colorado State University, EUA.

Sherard, J. L. y Decker, R. S. (1977), Summary-evaluation of symposium on dispersive clays, *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, ASTM Special Technical Publication 623, EUA.

Silva, G (1995), *Evaluación de arcillas como impermeabilizantes de desechos industriales*, Tesis de maestría en ingeniería, DEPMI, UNAM, México.

Silva, G. y Almanza, R. (1994), Influencia de la temperatura sobre suelos arcillosos compactados teniendo en su estructura mineralógica una ilita, *XVII RNMS*, México, 53-62.

Silva, G y Almanza R (1997), Efectos de temperatura y salmueras en la permeabilidad de suelos arcillosos. *Memorias de la III Conferencia Latinoamericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes*, Caracas, Venezuela.

Silva, G. y Almanza, R. (1998), Compacted clays behavior under KCl solutions, *Memorias de la 2<sup>a</sup> Conferencia Internacional sobre Suelos no Saturados*, 2, Beijing, China, 226-229.

Silva, G., Almanza, R. y Callejas, O. (2000), Efectos de salmueras en la plasticidad de suelos arcillosos, *Memorias de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Oaxaca, 179-188.

Silva, G. y Callejas, Ó. (2002), Estudios fisicoquímicos para evaluar dispersión de arcillas en la presa Tenango, *Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, 1, Qro., México, 119-128.

Sivapullaiah, P., Sridharan, A. y Bhaskar, V. (1996) Index properties of soils contaminated by electrolytes, *Environmental Geotechnology, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium*, 1, EUA, 198-207.

Slade, P. G.; Quiek, J. P. y Norrish, K., (1991), Crystalline swelling of smectite samples in concentrated NaCl solutions in relation to layer charge. *Clays clay Miner.* **39**, 234-38.

Sposito, G. (1984), *The Surface Chemistry of Soils*. Oxford University Press, Nueva York, EUA.

Sposito, G. (1989), *The chemistry of soils*, Oxford University Press, Nueva York, EUA.

Tabor, H. Z. y Doron, B. (1987), The Beith Ha'arava 5 MW (e) Solar pond power plant (SPPP), Progress Report, *Proceedings of the Conference International Progress in Solar Ponds*, México.

Tobin, W. y Wild, P. (1988), *Attapulgite: a clay liner solution?*, ASCE, 56-58.

Torraca, G. (1988), *Porous materials buildings*, ICCROM, 3a ed, Roma, Italia.

Van Impe, W. F. (1994), General aspects of containment and drainage systems clay liner design, testing, and construction, *1st. International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Alberta, Canadá, 982-984.

Van Olphen, H. (1963), *An Introduction to clay colloid chemistry*, 2a ed, Wiley-Interscience, Nueva York, EUA.

Van Olphen, H. (1966), Maya Blue: A clay Organic Pigment? *Science* 154, Washington, 545-546.

Villar, M. V.; Cuevas, J. y Martín, P. L. (1995), Effects of heat/water flow interaction on compacted bentonite: preliminary results, *Engineering Geology*, Elsevier, Amsterdam, Holanda.

Winterkorn, H. y Baver, L. (1934), Sorption of liquids by soil colloids: I Liquid intake and swelling by soil colloidal materials. *Soil Sci.* 38, 291--298

Winterkorn, H. y Pamukcu, S. (1991), Soil stabilization and grouting, cap 9 en *Foundation Engineering Handbook*, Fang H-Y (ed), Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 325-327.

Winterkorn, H. F. y Fang, H. Y. (1975), Soil technology and engineering properties of soils, Cap. 1, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co, Inc, Nueva York, EUA.

Winterkorn, H. F. y Fang, H. Y. (1991), Soil technology and engineering properties of soils, cap 3, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co, Inc, Nueva York, EUA.

Xanthakos, P. P., Abramson, W. L. y Bruce A. Donald (1994), *Ground Control and Improvement*, John Wiley & Sons, EUA.

Yong, R. N., Mohamed, A. M. y Warkentin, B. P. (1992), Principles of contaminant transport in soils. *Developments in geotechnical engineering*, 73, Elsevier, Amsterdam, Holanda.

Yong, R. N. y B. P. Warkentin. (1975), *Soil Properties and Behavior*. Dev. Geotech. Eng. Elsevier, Nueva York, EUA.