

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
SECRETARIA GENERAL DE CIENCIA Y TÉCNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA-CENTRO DE GEOCIENCIAS APLICADAS

**ESTUDIO DE LOS PROCESOS SEUDOKÁRSTICOS Y PROCESOS
DE EROSIÓN Y HUNDIMIENTO EN TERRAPLENES,
TALUDES Y FUNDACIONES**

BECA DE PERFECCIONAMIENTO
INFORME FINAL

Autor
Rubén Rafael Sotelo
Ing. Civil, M.Sc.

Director : Ing. Eliseo Popolizio
Co-Director : Ing. Arturo Borfitz

Resistencia - Chaco
1997

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones :

A la Secretaria General de Ciencia y Técnica de la U.N.N.E., por el apoyo financiero que posibilitó el desarrollo de este trabajo.

A los profesores orientadores del trabajo : Eliseo Popolizio y Arturo Borfitz, por el constante apoyo, estímulo y sugerencias instructivas recibidas durante la investigación.

A los profesores del Curso de Pos-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, en especial al profesor Luiz Antônio Bressani , por los conocimientos que me transmitieron.

A los profesores Mario Favretto y Jorge Guinea de la U.N.N.E. y a la profesora Regina Davison Dias de la UFRGS (Brasil), por las recomendaciones que posibilitaron mi acceso a esta beca de perfeccionamiento.

Al ex-Plan de Defensa y a la Dirección Provincial del Agua, en especial a los ingenieros Rubén Arismendi, Daniel Acosta y Pedro Favaron, por las informaciones suministradas y por el préstamo de equipos de sondeo.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, por la colaboración en los análisis químicos de los suelos estudiados.

A mis colegas y compañeros del Centro de Geociencias Aplicadas por el apoyo y los auxilios recibidos.

Y a todos aquellos que de una u otra forma colaboraron en la elaboración de este trabajo.

SUMARIO

RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Origen y fundamentos de la investigación	1
1.2 Objetivos del trabajo	1
1.3 Organización del informe	2
2 ANTECEDENTES DEL TEMA EN ESTUDIO.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Comportamiento de los procesos pseudokársticos	4
2.2.1 Modelos Seudokársticos Aerolares.....	5
2.2.2 Modelos Seudokársticos Lineales	7
2.3 Comportamiento de suelos dispesivos.....	13
2.3.1 Algunos conceptos de la estructura de la materia	13
2.3.2 Características de las partículas de arcilla	16
2.3.3 El fenómeno de la dispersión en arcillas	23
2.4 Identificación de suelos dispersivos.....	28
2.5 Estabilización y reparaciones	31
3 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS	35
3.1 Revisión bibliográfica y recolección de información	35
3.2 Análisis preliminar de los procesos erosivos en la zona.....	35
3.3 Selección de los locales de estudio	36
3.4 Ensayos de laboratorio.....	38
3.5 Correlaciones entre características dispersivas y propiedades químicas.....	38
3.6 Análisis de la correlación propuesta en el Departamento Maipú	39
4 CARACTERIZACION DE LOS LOCALES DE ESTUDIO	40
4.1 Canal de Derivación del Río Negro al Río Salado	40
4.2 Terraplén de defensas del Gran Resistencia.....	47
4.3 Terraplén de defensas de Las Palmas	49
4.4 Departamento Maipú	50
4.5 Tipificación de los procesos de erosión observados	52

4.5.1	Procesos de erosión de gran extensión	53
4.5.2	Procesos de erosión en áreas reducidas.....	53
5	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO	55
5.1	Ensayos Pinhole	55
5.2	Ensayos de Doble Sedimentometría.....	58
5.3	Ensayos químicos.....	59
5.4	Estabilizaciones con cal.....	70
6	ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN EN EL DEPARTAMENTO MAIPU	73
6.1	Procesos de erosión en el Departamento Maipú.....	73
6.2	Cartas edafológicas del Departamento Maipú.....	73
6.3	Análisis de la correlación sugerida	76
7	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	83
7.1	Conclusiones	83
7.2	Sugerencias para futuras investigaciones	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXO I	88
	ANEXO II	93
	ANEXO III	101
	ANEXO IV	115
	ANEXO V	170
	LISTA DE FIGURAS	173
	LISTA DE CUADROS.....	176
	LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	178

RESUMEN

En el Nordeste Argentino se presentan con frecuencia serios problemas de erosión por la presencia de suelos altamente erodibles en terraplenes de caminos, en obras de defensas contra inundaciones y en secciones de escurrimiento de canales. Una vez iniciados, estos procesos son difíciles de detener, generando considerables costos de mantenimiento y peligro para bienes materiales y vidas humanas.

Este trabajo tiene como objetivos analizar el comportamiento de los suelos frente a los fenómenos de erosión más comunes en la zona, indicar cómo detectarlos empleando cartas de suelos ya elaboradas y proponer algunas soluciones para atenuar la degradación de las obras.

A tal efecto, se realizó un análisis preliminar de los procesos de erosión en la región y se seleccionaron locales de estudio donde fueron colectadas muestras de suelos de sectores con problemas. En las mismas se efectuaron ensayos Pinhole, que identifican la susceptibilidad de los suelos a estos fenómenos, y algunos ensayos químicos que se realizan en estudios agronómicos.

A partir de estos resultados fue posible encontrar una correlación entre las propiedades químicas de los suelos y sus características erodibles. Como estas propiedades químicas están indicadas en cartas edafológicas existentes, las mismas pueden ser empleadas para detectar, en forma preliminar, locales de posible ocurrencia de estos suelos.

La correlación encontrada fue corroborada en el Departamento Maipú de la Provincia del Chaco, donde existen cartas edafológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y a su vez los procesos de erosión naturales pueden ser identificados en cartas geomorfológicas elaboradas por el Centro de Geociencias Aplicadas de la U.N.N.E.

Finalmente, los resultados de ensayos Pinhole sobre muestras altamente erodibles mezcladas con cal han determinado que puede emplearse este material para estabilizar suelos susceptibles estos fenómenos.

ABSTRACT

In the North East of Argentina there are lots of erosions problems in highway banks, channels and earth dams due to erosive soils. Once these process start they are difficult to stop, generating high cost of maintenance and danger to things and people.

This research attempt to study the behaviour of soils in more common erosion phenomenons of the zone, indicate a procedure to detect them using soils charts and suggest some solutions to protect the constructions.

In order to achieve these objectives, a study of erosion process in the region was made, selecting sites with severe erosion damages and collecting soils specimens. Pinhole tests and some agronomic chemical test were carried out on those specimens to detect their erosive properties.

A correlation was found between chemicals properties and erosive soil behaviour. Some agronomic soils charts present these soils chemical properties and they can be used to detect sites susceptible to erosion.

The founded correlation was validated in the Maipú Department of Chaco - Argentina, were there are INTA's agronomics soils charts and the naturals erosion process were detected in geomorphologics charts elaborated by the Centro de Geociencias Aplicadas of U.N.N.E.

Finally, the Pinhole test results on high erosive soils specimens with lime treatment shows that this product can be used to improve sites with soils erosion problems.

1 INTRODUCCION

1.1 Origen y fundamentos de la investigación

En nuestra región es de fundamental importancia la ejecución y mantenimiento de caminos y canales de saneamiento como elementos para apoyar a la producción e impulsar el desarrollo socioeconómico. Asimismo, las defensas contra inundaciones son obras de especial interés en la zona, por las características anegables de los lugares donde se hallan situadas importantes localidades, entre ellas Resistencia.

En estas obras, el suelo es utilizado como material de construcción, conformando los terraplenes de caminos y de defensas o la sección de escurrimiento en canales. Frecuentemente se han observado serios problemas de erosión en forma de cárcavas, tubificaciones y hundimientos. Una vez iniciados, estos procesos son difíciles de detener, ocasionando considerables costos de mantenimiento y generando peligro para bienes materiales y vidas humanas.

Esto indica la necesidad de investigar los distintos procesos de erosión que se producen en nuestros suelos y tratar de adaptar las técnicas convencionales de diseño y construcción para atenuar sus efectos.

1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo general del presente trabajo es analizar los distintos problemas de erosión que se presentan en las obras de infraestructura de la zona. Como existen indicios que la mayoría de estos fenómenos se generan por procesos pseudokársticos

en suelos arcillosos dispersivos, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el comportamiento de los procesos de erosión que pueden considerarse dentro de la morfología pseudokárstica.
2. Determinar cómo influyen las propiedades químicas de los suelos en sus características dispersivas.
3. Indicar cómo detectar suelos dispersivos empleando cartas de suelos de estudios edafológicos existentes.
4. Proponer algunas soluciones para atenuar los efectos de la erosión.

1.3 Organización del informe

El presente informe está estructurado en siete capítulos. En el *Capítulo 2* se presenta una revisión bibliográfica de los tópicos específicos tratados en este estudio, abordando temas relacionados a los procesos pseudokársticos, a las propiedades químicas de los suelos, a los métodos para identificar suelos dispersivos y a los procedimientos para estabilizar y reparar daños producidos por este tipo de erosión.

El *Capítulo 3* presenta brevemente los métodos y técnicas empleados en este trabajo para alcanzar los objetivos propuestos.

En el *Capítulo 4* se efectúa la caracterización de los locales de estudio, indicándose los motivos de su elección, su ubicación, sus características geomorfológicas y los procesos de erosión identificados.

El *Capítulo 5* presenta el análisis e interpretación de los resultados de ensayos de laboratorio. Se sugieren correlaciones entre las propiedades químicas de

los suelos y sus características dispersivas. Asimismo, se indican los resultados obtenidos en suelos estabilizados con cal.

En el *Capítulo 6* se amplía la escala de análisis y se evalúa la influencia de las propiedades químicas de los suelos en la formación de procesos de erosión naturales en el departamento Maipú de la Prov. del Chaco. A tal efecto, se comparan los resultados de ensayos químicos indicados en cartas edafológicas elaboradas por el I.N.T.A. y las erosiones identificadas en cartas geomorfológicas realizadas por el Centro de Geociencias Aplicadas de la UNNE. Se sugiere un procedimiento para emplear estas cartas como paso preliminar para detectar locales de posible ocurrencia de suelos dispersivos.

Finalmente, el *Capítulo 7* resume las conclusiones del trabajo y presenta sugerencias para futuras investigaciones.

2. ANTECEDENTES DEL TEMA EN ESTUDIO

2.1. Introducción

La erosión de los suelos puede producirse por fenómenos de distinta naturaleza. Según GHUMAN et.al (1976) los mecanismos de erosión se pueden generar por fuerzas exteriores, al incrementarse la velocidad del fluido; o pueden darse por degradación de las fuerzas internas, como la disolución química de cementos naturales o la dispersión de arcillas. El fenómeno continúa hasta que las fuerzas externas e internas se equilibran.

POPOLIZIO (1975) indica que algunas erosiones se generan por procesos pseudokársticos, los cuales siguen una secuencia evolutiva, desde los microsuros hasta las cárcavas, y su grado de evolución depende de la acción antrópica y de las condiciones morfológicas y climáticas a que está sometido.

Dado que en nuestra región existen indicios de que los procesos de erosión más comunes se dan por la presencia de suelos dispersivos y que en muchos casos generan morfologías típicamente pseudokársticas, desarrollaremos a continuación una explicación de estos procesos, del fenómeno físico-químico que genera la erosión en estos suelos, los métodos para identificarlos y por último, algunas experiencias realizadas anteriormente para estabilizarlos.

2.2. Comportamiento de los Procesos Pseudokársticos

Según POPOLIZIO (1975), entiéndese por modelo kárstico a la morfología resultante de una serie de procesos generados por la disolución de rocas calcáreas. Su nombre deriva de la región del Karst, de Histria, si bien modelos de este tipo son comunes en otras partes del mundo. Se caracterizan por presentar conductos en la

roca calcárea que captan el agua superficial provocando la circulación de agua subterránea.

Procesos semejantes, pero desarrollados sobre rocas no calcáreas, son frecuentes en sedimentos arenosos, arcillosos, limosos o mezcla de éstos, con cierto contenido de carbonatos y/o sulfatos de calcio y/o cloruros de sodio, e incluso en ciertos suelos arcillosos tropicales. Los modelos de formas generados en estos suelos no pueden considerarse típicamente kársticos y comúnmente se los denominan falso karst o pseudokarst.

Además de los problemas de erosión que generan, los procesos pseudokársticos revisten singular importancia en los estudios hidrológicos del NE Argentino porque influyen particularmente en el escurrimiento subterráneo y en la modificación de las divisorias de aguas superficiales.

Según POPOLIZIO (1975), los procesos pseudokársticos pueden clasificarse en dos grandes grupos :

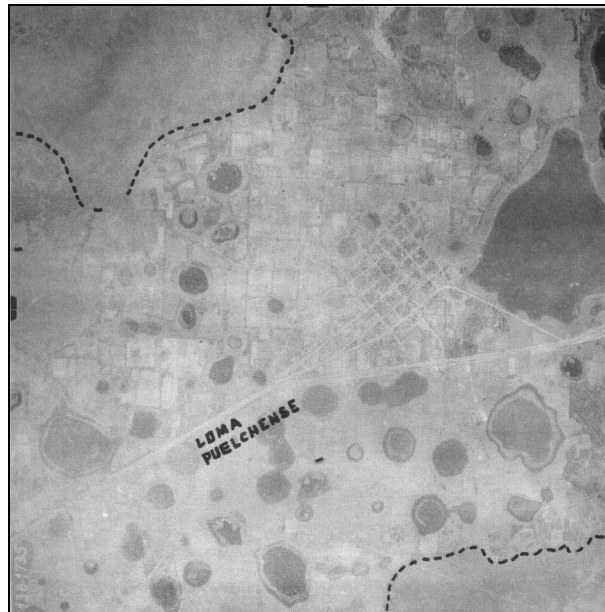
- Modelos Seudokársticos Aerolares
- Modelos Seudokársticos Lineales

Esta es una primera subdivisión, aunque pueden presentarse modelos asociados más complejos.

2.2.1. Modelos Seudokársticos Aerolares

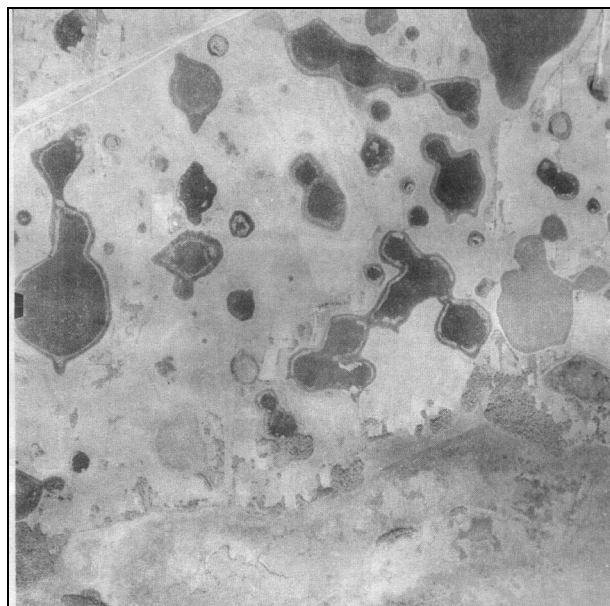
Se denominan así porque en ellos predominan las formas isodiamétricas y no presentan un marcado entallamiento lineal predominante. Son comunes las formas circulares, dando lugar a un paisaje típico de depresiones cerradas con lagunas en su interior, como se observan en la Figura N° 2.1.

Figura N° 2.1.
Modelos Seudokársticos Aerolares. POPOLIZIO (1975)



Los procesos de erosión tienden a unir las depresiones, formando modelos complejos de límites lobulados como se observa en la Figura N° 2.2 y en la Figura N° 2.3.

Figura N° 2.2
Procesos de interconexión de modelos areolares. POPOLIZIO (1975)

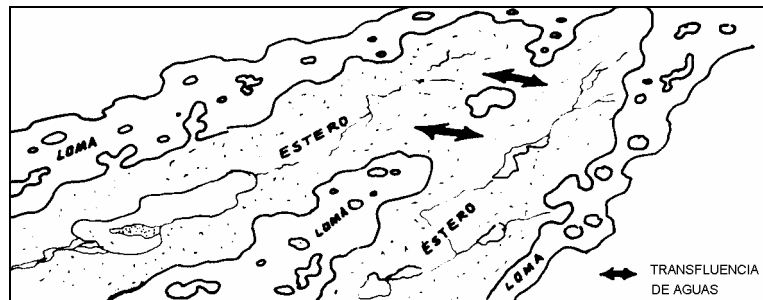


Como consecuencia de esto, la divisoria de aguas se va modificando totalmente en función al avance del proceso, lo que crea problemas sumamente serios para la delimitación de las cuencas, ya que al desaparecer la divisoria, las cabeceras de los esteros se unen y las aguas en crecientes pasan con facilidad de una cuenca a la otra por transfluencia, dependiendo el sentido del escurrimiento del nivel del pelo de agua en cada cuenca y no de la pendiente topográfica (ver Figura N° 2.4).

Figura N° 2.3
Procesos de erosión que interconectan modelos areolares. POPOLIZIO (1975)



Figura N° 2.4
Transfluencia de aguas de una cuenca a otra. POPOLIZIO (1975)



2.2.2. Modelos Seudokársticos Lineales

Se los denomina así porque en ellos predomina una dirección sobre las otras y el entallamiento se desarrolla preferencialmente a lo largo de líneas. El proceso de erosión sigue una secuencia evolutiva, desde los microsurcos hasta las cárcavas y su grado de evolución depende de factores morfológicos, climáticos y de la acción antrópica.

Según POPOLIZIO (1975), el agua que escurre hacia los colectores lo hace en forma superficial, subsuperficial y subterránea. En condiciones ideales, la misma escurriría en forma de lámina hacia los colectores, sobre una película estática adherida al suelo y de velocidad cero. Sin embargo, la rugosidad superficial da lugar a movimientos turbulentos en el contacto con la superficie, lo que favorece el desprendimiento de algunos granos de suelo que inician microsurcos, los cuales retroceden sus cabeceras por descalces sucesivos de los granos situados aguas arriba. En suelos arcillosos dispersivos, el pequeño tamaño de las partículas de arcilla que se separan permite que estos procesos se generen para velocidades de escurrimiento muy bajas, como será explicado en detalle en los puntos siguientes.

En el caso de terraplenes para caminos, defensas contra inundaciones y taludes de canales la pendiente de las laderas es lo suficientemente pronunciada para que los microsurcos se profundicen rápidamente en presencia de suelos dispersivos, como se observa en la Figura N° 2.5.

Figura N° 2.5

Modelos seudokársticos lineales en terraplenes de caminos. POPOLIZIO (1975)



Además, las fisuras en la parte superior del talud permiten el ingreso del agua generando una serie de conductos internos (ver Figura N° 2.6) que salen al exterior en la parte inferior de la ladera, donde pueden apreciarse microconos de deyección resultante del arrastre de coloides. Estos conductos aumentan rápidamente

de tamaño por acción del agua superficial que se precipita en ellos, hasta que se unen con conductos vecinos, quedando una placa vertical separada de la ladera según se observa en las Figura N° 2.7 y 2.8.

Figura N° 2.6

Conductos de erosión en el coronamiento del talud. POPOLIZIO (1975)

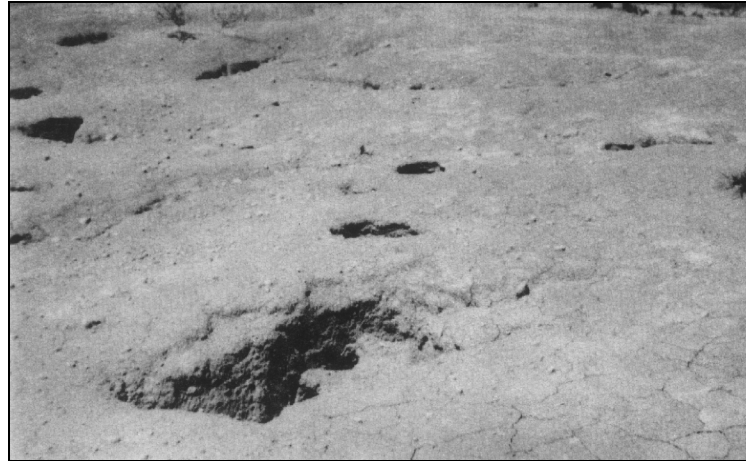


Figura N° 2.7

Evolución de procesos pseudokársticos en taludes. POPOLIZIO (1975)

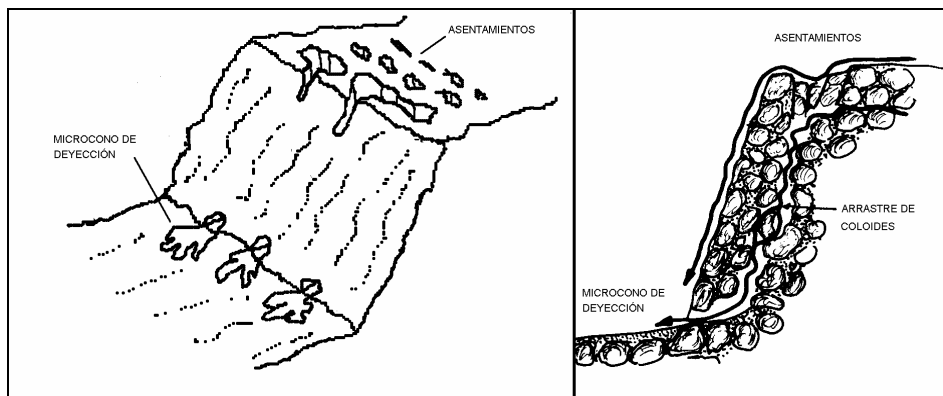


Figura N° 2.8

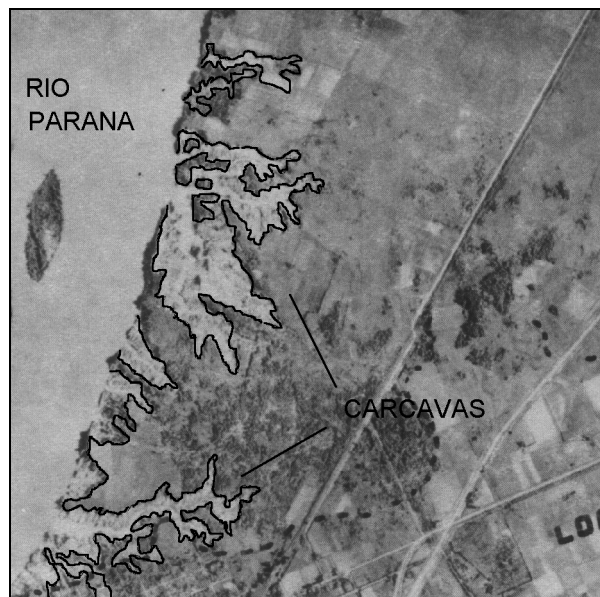
Modelo seudokárstico avanzado con placa vertical separada. POPOLIZIO (1975)



De esa forma la ladera retrocede y el proceso se repite, pudiendo ocupar extensas áreas como ilustra la Figura N° 2.9.

Figura N° 2.9

Evolución a cárcavas de gran extensión. POPOLIZIO (1975)



Según PHILLIPONNAT (1970), es posible subdividir a estos procesos pseudokársticos lineales de acuerdo a las características del perfil de suelo en :

- Erosión en Perfiles Homogéneos
- Erosión en Perfiles No Homogéneos

Erosión en Perfiles Homogéneos:

Estos procesos se caracterizan por presentar surcos paralelos poco espaciados a intervalos regulares en el talud, según se observa en la Figura N° 2.10. Se desarrollan fundamentalmente en suelos compactados que dan al talud una anisotropía neutral en la dirección del escurrimiento del agua o en los taludes de suelos naturales donde la camada superior de suelo orgánico no resiste a la erosión.

Figura N° 2.10

Erosión en perfiles homogéneos. PHILLIPONNAT (1970)



A su vez, en lugares donde las condiciones son más favorables, estos procesos evolucionan en forma de cárcavas, tubificaciones y degradaciones del talud ya mencionadas, como indica la Figura N° 2.11. Generalmente aparecen a intervalos discontinuos y no son modelos paralelos.

Figura N° 2.11

Erosión en perfiles homogéneos. PHILLIPONNAT (1970)



Erosión en Perfiles No Homogéneos:

Cuando el perfil expuesto posee estratos de suelo más resistentes a la erosión, los mismos atenúan el proceso de degradación del talud y adquieren una morfología semejante a la presentada en la Figura N° 2.12. Sin embargo, son posibles erosiones intensas en los suelos menos resistentes, las cuales pueden dar origen a cavidades y tubificaciones bajo los estratos resistentes provocando finalmente deslizamientos de taludes.

Figura N° 2.12

Erosión en perfiles no homogéneos. PHILLIPONNAT (1970)



2.3. Comportamiento de Suelos Dispersivos

A continuación se intentará dar una breve introducción en conceptos de química de suelos, a efectos de poder comprender los fenómenos físico-químicos que se generan en los procesos pseudokársticos sobre suelos arcillosos dispersivos.

2.3.1. Algunos conceptos de la estructura de la materia

Según RUIZ (1960), la materia está formada por elementos muy pequeños denominados átomos. Los mismos están constituidos por un núcleo que concentra la casi totalidad de la masa, rodeado de electrones. El núcleo se compone de protones y puede tener neutrones (isótopos). Los protones tienen carga eléctrica positiva y los neutrones son eléctricamente neutros. Las cargas eléctricas positivas del núcleo están compensadas con igual número de cargas negativas, generadas por los electrones, quienes giran en órbitas alrededor del núcleo. En la órbita más cercana al núcleo pueden girar 2 electrones; en la siguiente 8, y más en otras. Hay una tendencia en los átomos a completar su órbita exterior hasta el máximo de electrones que puede llevar, o a la inversa, a perder todos los electrones de la misma. Esta tendencia es la causa de las acciones químicas. La órbita exterior es, pues, la que interesa al químico; las demás conservan su estructura en los fenómenos que nos interesan.

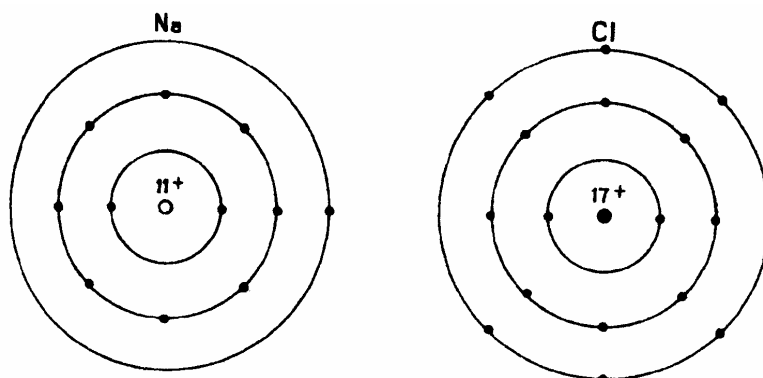
En la Figura N° 2.13 podemos ver una representación de átomos de sodio (Na) y cloro (Cl). Si ambos elementos se combinan químicamente, el sodio perderá su electrón exterior, el cual pasará a completar la órbita exterior del cloro, y ambos átomos quedarán transformados en iones, cargados eléctricamente con cargas de signo contrario.

Estas partículas cargadas eléctricamente se atraen, dando origen a la unión electrovalente; es decir, que en el caso de una unión electrovalente hay una transferencia de electrones del elemento electropositivo (Na) hacia el elemento electronegativo (Cl). Estos iones se mantienen unidos por las fuerzas de atracción electrostáticas de los mismos, o fuerzas de Coulomb. Cuando la distancia

entre ambos iones es grande, solo se manifiesta la atracción electrostática. Pero cuando esta distancia es del orden del radio atómico, las envolturas de electrones comienzan a actuar entre sí, repeliéndose, y lo mismo ocurre con los núcleos, hasta que esta fuerza repulsiva iguala a la atractiva, momento en que se alcanza el equilibrio. Tenemos pues dos fuerzas, una atractiva y otra repulsiva variando según dos funciones distintas de las distancias atómicas, y que tiene lógicamente una resultante. Cuando esta resultante se anula, se tiene la posición de equilibrio que corresponde a la energía potencial mínima.

Figura N° 2.13

Representación de átomos de sodio y cloro. RUIZ (1960)



Hay otro tipo de unión química llamada unión covalente que se produce cuando cada átomo contribuye con un electrón para formar la unión, quedando ambos átomos en contacto por su órbita exterior. Así, uno completa su órbita exterior mientras que el otro la pierde totalmente.

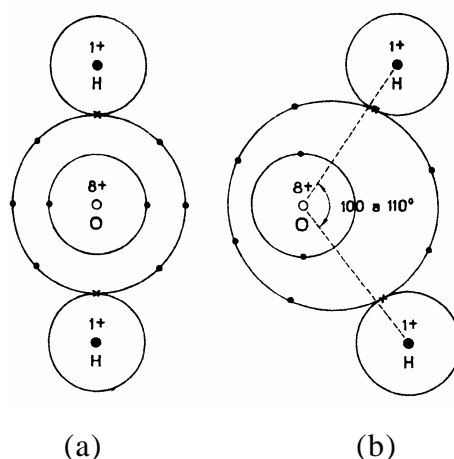
La existencia de unión electrovalente o covalente es una cuestión de potencial: se producirá aquella que en la circunstancia considerada dé la menor energía potencial. Si bien existen otras uniones químicas, las mencionadas son las que nos interesan.

En la Figura N° 2.14.a se observa una molécula teórica de agua, donde los iones se ubican en forma simétrica y así el baricentro de las cargas positivas coincide

con el de las cargas negativas. Pero esta posición resultante no es la de mínima energía potencial. Según RUIZ (1960), la posición que adoptan los átomos es la de la Figura N° 2.14.b. En esta posición ya no coinciden el baricentro de las cargas negativas y el de las positivas, lo que genera un momento electrostático producto de una de ambas cargas por la distancia a sus baricentros. No debe confundirse este momento electrostático con la carga iónica, puesto que en el ion hay un desequilibrio a favor de una de las cargas, mientras que aquí las cargas son iguales, habiendo solo falta de coincidencia de sus baricentros.

Figura N° 2.14

Representación de una molécula de agua. RUIZ (1960)



Esquemáticamente, es posible representar una molécula de agua como en la Figura N° 2.15. A este tipo de molécula se la denomina también dipolar.

Figura N° 2.15

Representación de una molécula dipolar

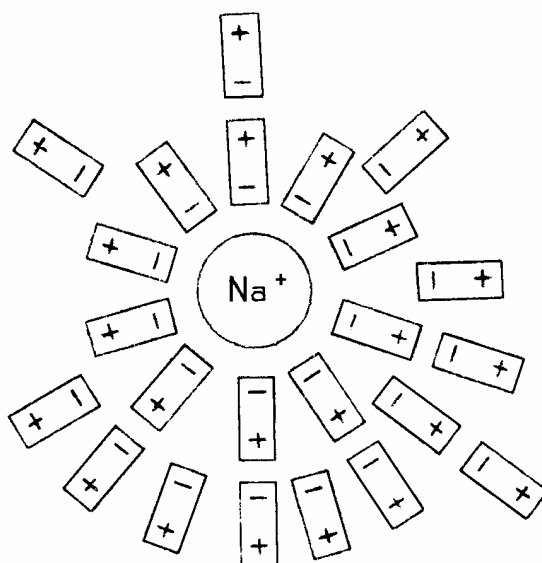


Debido a esta característica dipolar de la molécula de agua, las mismas tienden a orientarse ante la presencia de un campo eléctrico. Si se coloca un catión

Na^+ en presencia de moléculas de agua, el campo eléctrico creado por la carga positiva del catión orienta las moléculas de agua de sus proximidades como se observa en la Figura N° 2.16 ; esta orientación lleva como siempre a un mínimo de energía potencial. Lo mismo sucedería si se tratara de un anión.

Figura N° 2.16

Catión sodio con su esfera de solvatación. RUIZ (1960)



Un ion no es entonces solo la partícula cargada, sino que está rodeado de una envoltura orientada de agua o de otro líquido con momento dipolar. La orientación va desapareciendo al aumentar la distancia al ion. Esta envoltura de agua orientada se llama esfera de solvatación.

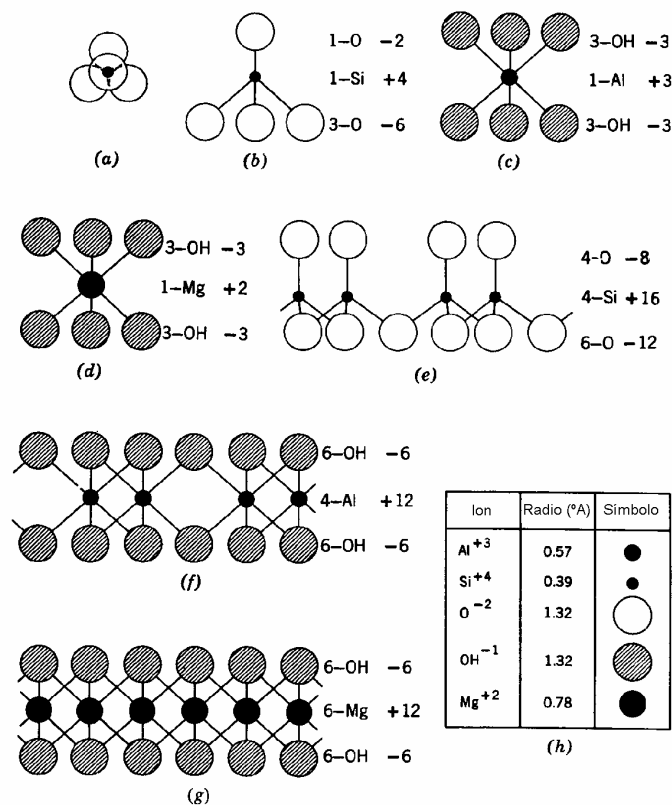
2.3.2. Características de las partículas de arcilla

Por convención, en mecánica de suelos se definen como arcillas a aquellas partículas que poseen un tamaño inferior a 0.002 mm. La forma más común de estas partículas es la de láminas aplanadas. La estructura y composición mineralógica de estas láminas juegan un papel fundamental en su comportamiento.

Según LAMBE & WITHMAN (1979), los minerales más abundantes en los suelos y en particular en las arcillas son los silicatos. El estudio de la estructura de los silicatos puede facilitarse “construyendo” un mineral a partir de ciertas estructuras básicas. La Figura N° 2.17 muestra un grupo de estas unidades. El tetraedro de oxígeno-silicio está compuesto por cuatro átomos de oxígeno unidos a un átomo de silicio, formando la unidad que aparece en la Figura N° 2.17.a. Los átomos están dibujados a escala partiendo de los radios, medidos en angstroms, que aparecen en la Figura N° 2.17.h. Las valencias eléctricas correspondientes se indican en la tabla, a la derecha de cada unidad.

Figura N° 2.17

Estructuras básicas de los silicatos. LAMBE & WITHMAN (1979)



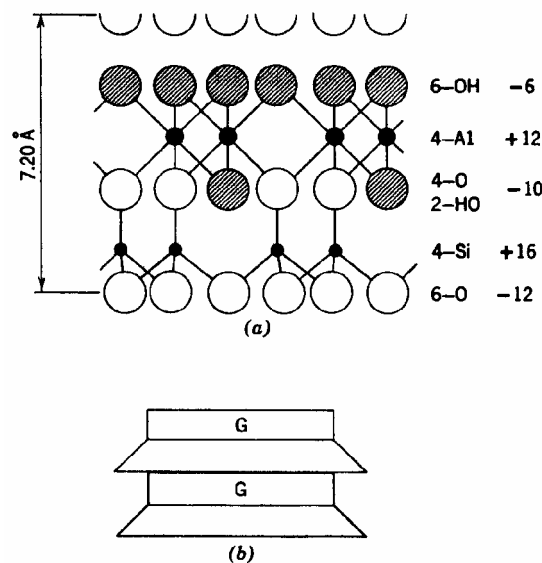
La Figura N° 2.17.c muestra el octaedro de aluminio y la Figura N° 2.17.d el octaedro de magnesio. Combinando los tetraedros de silicio, se obtiene la capa o lámina de sílice que aparece en la Figura N° 2.17.e. Combinando los octaedros de aluminio se obtiene la gibbsita (Figura N° 2.17.f) y combinando los octaedros de

magnesio la brucita (Figura N° 2.17.g). El exámen de las valencias señaladas en la Figura N° 2.17 muestra que el tetraedro y los dos octaedros no son eléctricamente neutros y por lo tanto no pueden existir como unidades aisladas. Sin embargo, la Gibbsita y la Brucita son eléctricamente neutras y existen en la naturaleza como tales.

Los distintos tipos de minerales arcillosos se forman por una combinación de estas unidades básicas. En la Figura N° 2.18 se presenta la estructura ideal del mineral arcilloso denominado caolinita. Como se observa, esta estructura es también eléctricamente neutra, al igual que la de los demás minerales arcillosos que existen en la naturaleza.

Figura N° 2.18

Estructura ideal de la caolinita. LAMBE & WITHMAN (1979)



En la realidad, todos los minerales arcillosos poseen cargas negativas en su superficie que se deben a diferentes factores. El más importante es debido al fenómeno de sustitución isomorfa. La sustitución isomorfa (de igual forma), consiste en el reemplazo de un tipo de átomo por otro. Por ejemplo, uno de los lugares ocupados por un átomo de silicio de la Figura N° 2.18 puede ser ocupado por un átomo de aluminio. Este ejemplo de sustitución isomorfa podría producirse si en el momento de formación del mineral se dispusiera más fácilmente de un átomo de

aluminio que de un átomo de silicio. La sustitución del aluminio que tiene valencia +3 por el silicio de valencia +4 provoca un aumento de la carga neta negativa.

La forma de lámina, el tamaño y la carga superficial que presentan las partículas de arcilla determinan sus comportamientos como coloides. El término coloide se emplea para describir una partícula cuyo comportamiento viene controlado por fuerzas de tipo superficial, en lugar de fuerzas de masa.

Una partícula de suelo, en la naturaleza, atrae iones para neutralizar su carga neta. Estos iones atraídos, que se mantienen con un leve enlace sobre la superficie de la partícula y pueden ser fácilmente sustituidos por otros, se denominan iones de cambio o iones intercambiables. La partícula de suelo con iones de cambio es eléctricamente neutra.

El comportamiento de una partícula de arcilla en el agua depende de distintos factores. Para conseguir una visión más general, LAMBE & WITHMAN (1979) analizan dos partículas típicas de arcilla : la montmorillonita y la caolinita. La Figura N° 2.19 muestra una comparación de los tamaños que presentan ambas partículas de arcilla. La Figura N° 2.19.a muestra una partícula de montmorillonita, que es uno de los minerales arcillosos más pequeños y más susceptibles al agua. En la Figura N° 2.19.b se presenta una partícula típica de caolinita, uno de los minerales mayores y menos sensibles a la humedad presente en la arcilla.

La Figura N° 2.20 muestra una parte de la superficie lateral de cada una de esas partículas de arcilla, junto con las posiciones que adoptan los iones de cambio debido a la disposición de los átomos en sus estructuras.

Figura N° 2.19

Comparación de tamaños de partículas.

(a) Montmorillonita. (b) Caolinita. LAMBE & WITHMAN (1979)

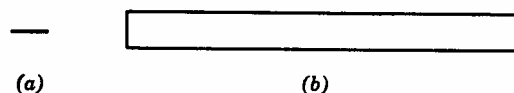
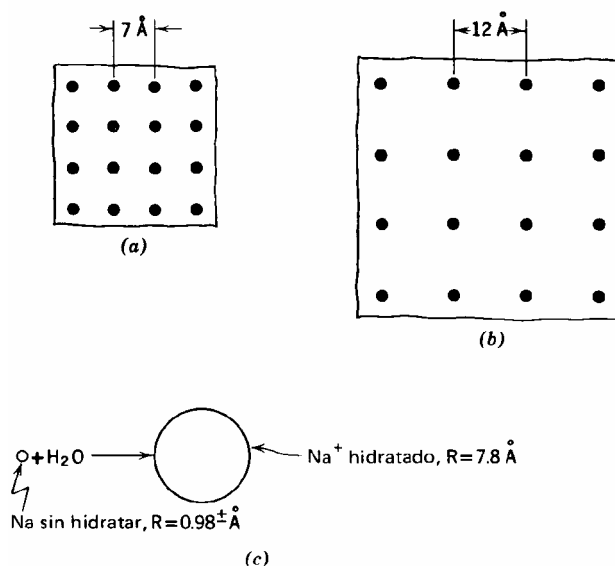


Figura N° 2.20

Disposición del ion sodio en la partícula de arcilla. LAMBE & WITHMAN (1979)



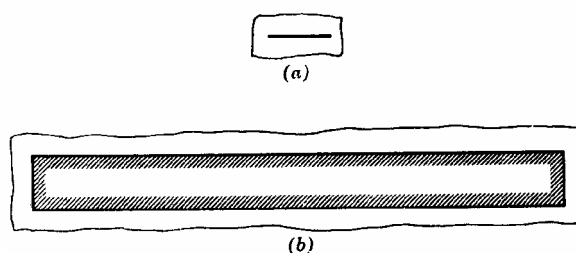
Si se sumergen ambas partículas de arcilla en agua, tanto las superficies minerales como los iones de cambio absorberán agua, es decir, se hidratarán. Esto se produce por las características dipolares de la molécula de agua mencionadas con anterioridad. A efectos ilustrativos, se ha escogido el ion Na^+ como ion de cambio. Al hidratarse, el ion Na^+ aumenta unas 7 veces, como se ilustra en la Figura N° 2.20.c. En esta situación, los iones de sodio hidratados son demasiado grandes para disponerse en una capa monoiónica sobre las partículas minerales. En realidad, los iones de cambio junto con su envoltura de agua se separan de las superficies minerales a distancias donde logran permanecer en equilibrio con las fuerzas que actúan sobre ellos. Por un lado, los iones son atraídos a la superficie del mineral para

equilibrar la carga negativa existente en la misma; por otra parte, tenderán a separarse unos de otros por efecto de sus energías térmicas; las posiciones reales que ocupan dependen del equilibrio entre ambos tipos de fuerzas.

Así, cuando se sumergen las partículas de arcilla, los iones se separan de su superficie para formar lo que se denomina la doble capa difusa. En la Figura N° 2.21 se muestran las partículas de arcilla con las dobles capas completamente desarrolladas, tal como se formarían en agua pura. Si el agua no es completamente pura, es decir existen iones o sales disueltas, la interacción de estos iones provocan espesores de doble capas menores.

Figura N° 2.21

Partículas de arcillas completamente hidratadas. LAMBE & WITHMAN (1979)



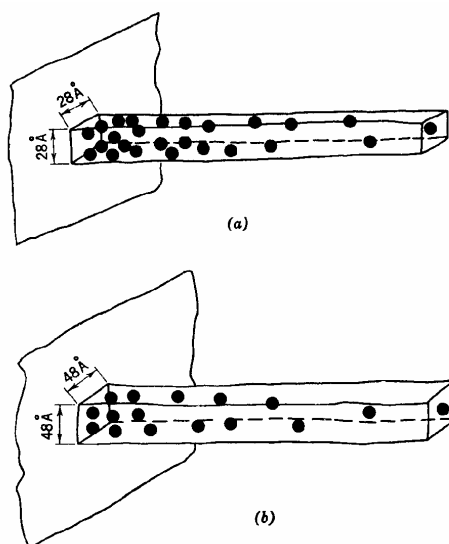
La Figura N° 2.22 reproduce en tres dimensiones las mismas superficies de la Figura N° 2.20. A partir de la Figura N° 2.22 se puede tener una idea de la separación aproximada de los iones hidratados en la doble capa difusa. Estas separaciones representan un máximo si el medio fluido es agua destilada.

La Figura N° 2.23 muestra las dobles capas de las partículas de caolinita sódica y de montmorillonita sódica. En la Figura N° 2.23.a se representan los iones de cambio en torno a determinadas superficies, en forma de cargas puntuales. La Figura N° 2.23..b muestra la concentración de iones de sodio en función de la distancia a la superficie de la partícula. En la Figura N° 2.23.c también se representa el potencial eléctrico en función de la distancia a la superficie. El potencial eléctrico es el trabajo

necesario para desplazar una carga unitaria desde el infinito hasta el punto en cuestión, siendo negativo para superficies arcillosas.

Figura N° 2.22

Representación tridimensional de iones adsorbidos. LAMBE & WITHMAN (1979)



El agua de la doble capa difusa está sometida a una fuerza de atracción hacia la partícula de suelo, al ser solidaria a los iones de cambio que resultan atraídos por las cargas eléctricas superficiales. Las moléculas dipolares del agua también pueden ser atraídas por las cargas negativas de la superficie de la partícula. En las capas más cercanas a la partícula, el agua se encuentra fuertemente adherida y se denomina *agua adsorbida*.

En lo anteriormente expuesto, se eligió al sodio como ion de cambio. Los iones adsorbidos sobre las partículas de suelo pueden ser substituidos fácilmente, como se ilustra en la reacción simbólica de la Figura N° 2.24. La adición de cloruro cálcico a un sistema suelo-agua da por resultado la sustitución del sodio por el calcio. Esta reacción provoca una depresión de la doble capa difusa en torno a la partícula de suelo, es decir, el espesor de la capa de agua en torno a la partícula se reduce. Esta reducción de la doble capa difusa da lugar a una variación en las propiedades del suelo, como se verá más adelante.

Figura N° 2.23

Características de la doble capa. LAMBE & WITHMAN (1979)

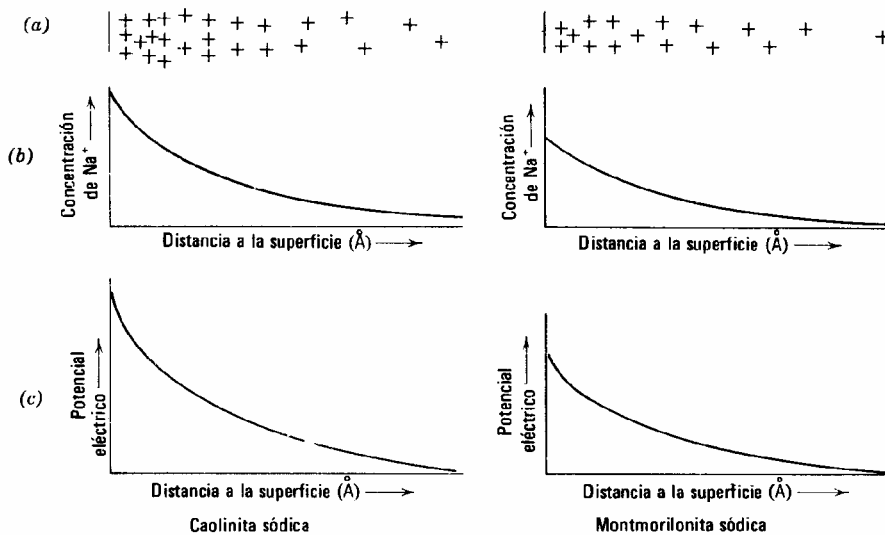
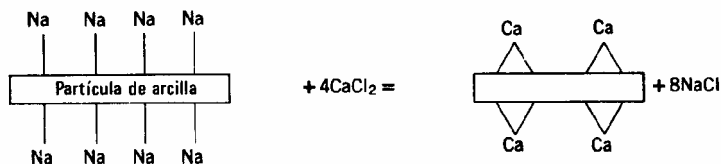


Figura N° 2.24

Intercambio catiónico entre sodio y calcio. LAMBE & WITHMAN (1979)



2.3.3. El fenómeno de la dispersión en arcillas

Si consideramos dos partículas arcillosas muy separadas en un medio acuoso y las aproximamos, se alcanzará una separación para la cual empiecen a ejercerse fuerzas mutuamente. Como cada partícula lleva una carga neta negativa, las mismas se repelerán por efecto de la fuerza de Coulomb desarrollada entre cargas del mismo signo. Al mismo tiempo existe un componente de atracción entre las mismas, debido a las fuerzas de van der Waals producidas por la atracción entre átomos de partículas adyacentes. Estas fuerzas de atracción son inversamente proporcionales a la

7^{ma} potencia de la distancia entre las mismas e independientes de las características químicas del medio que rodea a las partículas de arcilla.

En general, las fuerzas de repulsión generadas por las cargas negativas superficiales son mayores a las de atracción de van der Waals. Si estas cargas negativas no son neutralizadas, las partículas se mantienen en suspensión comportándose como coloides.

Según MITCHELL (1993), la floculación se logra cuando se incorporan a la estructura de la arcilla elementos con cargas positivas denominados cationes, que neutralizan las cargas negativas. Los mismos provienen de la solución en la que se encuentra la partícula de arcilla (agua de poro). Los cationes más frecuentes son el calcio, el magnesio, el sodio y el potasio.

Como ya fue mencionado, en torno a cada catión se forma una esfera de solvatación con moléculas de agua, y es el conjunto el que se adhiere a la partícula de arcilla. Además, el tamaño de la esfera de solvatación disminuye al aumentar la concentración de cationes en la solución y viceversa.

SHERARD et.al (1976) indican que algunas arcillas naturales se dispersan o defloculan ante la presencia de agua relativamente pura, como la originada por precipitaciones. El fenómeno se genera debido a que el agua presente en los poros del suelo tiene una mayor concentración de cationes que el agua pura de lluvia. Cuando ésta última ingresa al suelo produce básicamente dos efectos:

- Por un lado tiende a tomar cationes del agua de poro para reducir la diferencia de concentración, lo que genera un desequilibrio entre el complejo de adsorción de la partícula de arcilla y el agua de poro, produciéndose una transferencia de cationes desde la partícula hacia el agua de poro. El resultado es una descompensación eléctrica de la estructura química de la arcilla, aumentando la repulsión electrostática entre partículas.

- Al mismo tiempo, los cationes que permanecen adheridos a la partícula de arcilla tienden a aumentar su esfera de solvatación por la disminución de la concentración de cationes en la solución. Esto aumenta la distancia entre partículas con la consecuente reducción de las fuerzas de atracción de van der Waals.

Ambos efectos producen la dispersión de las partículas de arcilla, tendiéndola al estado coloidal. En estas condiciones un gradiente hidráulico mínimo puede provocar erosiones considerables.

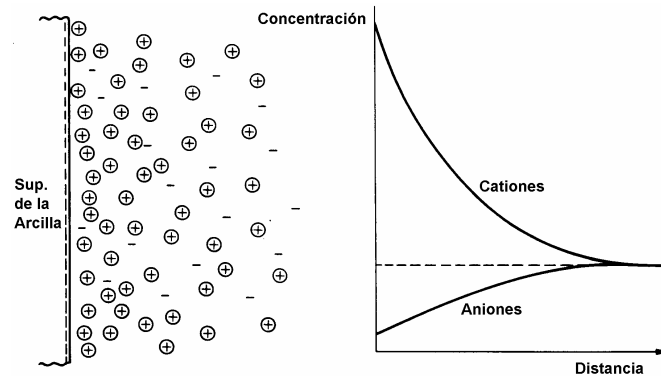
Según HOLMGREN et.al (1976), la tendencia a una erosión por dispersión depende **fundamentalmente** del **tipo de catión** predominante en la estructura de la arcilla, siendo los suelos sódicos más dispersivos que los que contienen calcio y magnesio.

La concentración de los cationes adsorbidos disminuye al aumentar la distancia a la partícula de arcilla, según se observa en las Figura N° 2.23 y 2.25, denominándose al conjunto doble capa difusa. Según MITCHELL (1993), los cationes divalentes como el calcio y el magnesio generan un espesor de capa difusa mucho menor que los cationes monovalentes como el sodio. Esto provoca una mayor distancia entre partículas de arcillas en suelos sódicos, lo que implica fuerzas de atracción menores. Además, manteniendo otros factores constantes, los cationes divalentes se adhieren con mayor firmeza a la partícula de arcilla que los monovalentes. Así, iones de sodio pueden ser extraídos más fácilmente del complejo de adsorción cuando existen diferencias de concentración de sales entre el agua de poro y la que genera la erosión, descompensándose eléctricamente la partícula de arcilla.

Existen además otros factores que pueden influir en las características dispersivas de las arcillas, como ser el pH del suelo, la composición mineralógica de la partícula, el contenido de humedad del suelo y la naturaleza de las lluvias, entre otros.

Figura N° 2.25

Distribución de iones adyacentes a la partícula de arcilla de acuerdo al concepto de doble capa difusa. MITCHELL (1993)



El **pH** de una solución es definido como el logaritmo de la inversa de la concentración de iones de hidrógeno:

$$pH = \log \frac{1}{H^+} \quad (1)$$

Se define como medio neutro a la solución cuyo pH es igual a 7, medio ácido cuando el pH es menor a 7 y medio básico para valores de pH mayores a 7. Si el pH es igual a 7 significa que :

$$\log \frac{1}{H^+} = 7 \rightarrow \left(\frac{1}{H^+} \right)^7 = 10^{-7} H^+ \quad (2)$$

Esto implica que a mayor pH, menor cantidad de iones H^+ están presentes en la solución. Anteriormente se estableció que las cargas de las partículas de arcilla se deben a cargas descompensadas en su superficie. Esto es independiente del pH del medio y dependiente de la estructura mineralógica del mineral. Pero en los bordes, las partículas de arcilla poseen hidroxilos $(OH)^-$ expuestos. Según MITCHELL (1993), la tendencia de los hidroxilos a disociarse en el agua es fuertemente influenciada por el

pH. A mayor pH, es menor la concentración de H^+ en el agua. Para compensar esta falta de H^+ , los hidroxilos de los bordes se disocian quedando descompensada la carga eléctrica del oxígeno, lo que aumenta la carga negativa de la partícula.



Esto implica que altos valores de pH generan condiciones favorables para la dispersión de partículas de arcilla y bajos valores de pH favorecen la floculación.

Según HOLMGREN (1976), el **tipo de mineral arcilloso** también tiene influencia en el fenómeno de la dispersión. En el caso de las montmorillonitas, las partículas de arcilla existen en paquetes denominados “tactoids” de cuatro a nueve láminas paralelas. Los resultados de ensayos han demostrado que los espacios entre láminas “prefieren” al calcio más que al sodio, generándose un intercambio catiónico que coloca al sodio en la superficie exterior y al calcio entre las láminas. Al estar el sodio en el exterior, lo que se dispersa no es una de las láminas sino los paquetes entre sí. El significado de este modelo da una explicación razonable de la dispersión espontánea a muy bajos niveles de sodio en suelos que contienen montmorillonita. Las caolinitas e illitas son estructuralmente diferentes a las montmorillonitas, ya que están compuestas de láminas individuales de mayor espesor, lo que las hace más susceptibles a las variaciones del pH por generar descompensación de cargas en los bordes.

El **contenido de humedad** también influye en el fenómeno. Como se explicó anteriormente, las fuerzas de atracción se incrementan en forma inversamente proporcional a la 7^{ma} potencia de la distancia entre partículas. Cuando las partículas se aproximan por secado, quedan muy bien vinculadas. Al aumentar el contenido de humedad del suelo, aumenta la distancia entre las partículas, lo que favorece la dispersión.

2.4. Identificación de suelos dispersivos

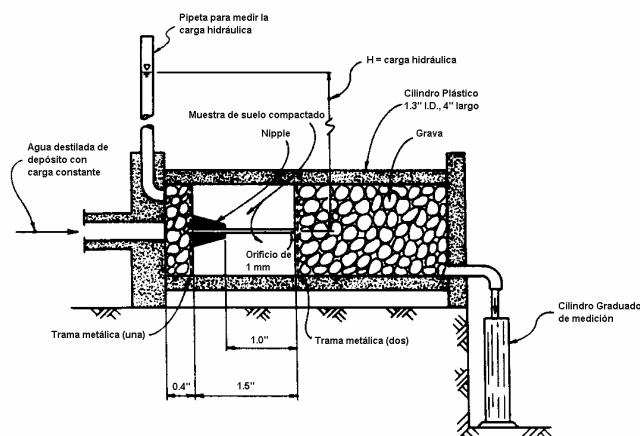
Las investigaciones efectuadas en el tema, indican que los ensayos standard de clasificación de suelos para fines de ingeniería, no detectan la susceptibilidad a la erosión por dispersión en suelos finos.

HEIZEN & ARULANANDAN (1976) presentan algunos métodos para identificar suelos dispersivos. El primero se basa en el ensayo de sedimentación, empleado para definir la curva granulométrica en partículas de tamaño menor al tamiz #200. Se realiza en un caso con defloculante y en otro, sin defloculante. Cuanto más dispersivo sea el suelo, mayor será la semejanza entre las curvas granulométricas resultantes, porque el suelo se dispersa sin necesidad del defloculante. El procedimiento de ensayo es descrito en detalle por HEAD (1981).

Otro método es el ensayo Pinhole descrito por SHERARD et.al (1975). Consiste en provocar un flujo de agua a través de un pequeño orificio realizado en una muestra de suelo, con una determinada carga hidráulica. El diámetro final resultante, el grado de turbidez del agua y la carga hidráulica aplicada permiten clasificar las características dispersivas del suelo. La Figura N° 2.26 presenta un esquema del dispositivo de ensayo. El procedimiento para efectuarlo se describe en detalle en el Anexo I.

Figura N° 2.26

Aparato para ensayo Pinhole



También se emplean ensayos químicos que determinan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio en la estructura de la arcilla y en el agua de poro del suelo. El porcentaje de sodio con respecto a los demás cationes indica el potencial dispersivo de la arcilla. La literatura internacional ha optado por correlacionar las características dispersivas con análisis químicos efectuados en el **agua de poro** del suelo, determinando el porcentaje de sodio con respecto al total de sales disueltas. El procedimiento consiste en mezclar el suelo con agua destilada hasta una consistencia cercana al límite líquido, se succiona agua por vacío empleando un filtro y se determinan las cantidades de cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio en miliequivalentes por litro. Luego se calcula el porcentaje de sodio con respecto al total de sales disueltas (TSD) :

$$TSD = Ca + Mg + Na + K \quad (4)$$

$$\%Na = \frac{Na}{TSD} * 100 \quad (5)$$

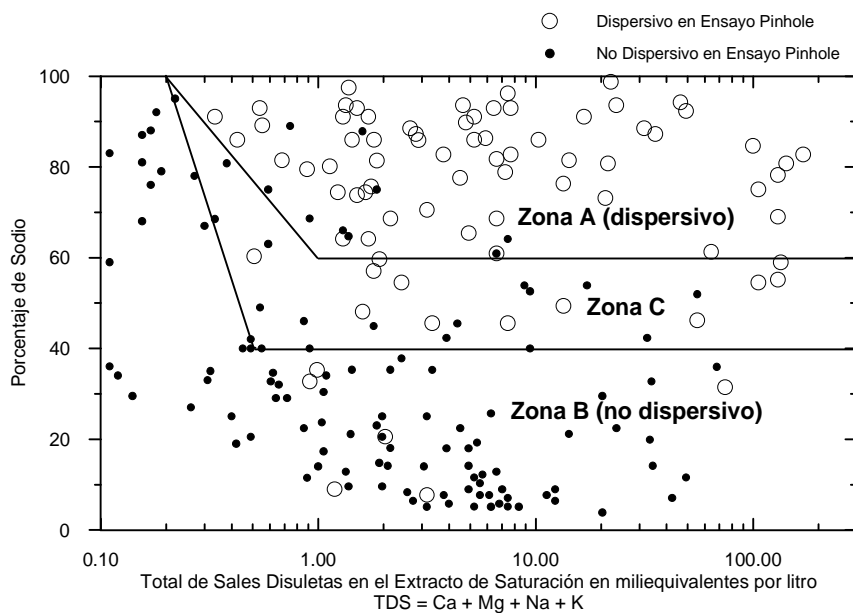
A partir de estos valores, y basados en resultados de ensayos Pinhole, SHERARD et.al (1975) elaboraron la Figura N° 2.27 y establecieron tres zonas. La Zona A, con altos valores de % Na corresponde a suelos dispersivos, la Zona B, con bajos valores de % Na corresponde a suelos no dispersivos, y la Zona C es definida como transición. Es interesante notar que muchas muestras que presentaron características dispersivas en el ensayo Pinhole se ubican en zona de suelos no dispersivos y viceversa.

Según el análisis del fenómeno de la dispersión, el factor fundamental es el porcentaje de sodio presente en la **capa adsorbida de la partícula de arcilla**. El criterio empleado por la literatura internacional de analizar el **agua de poro** del suelo, en vez de los **cationes adheridos a la partícula de arcilla**, se basa en que existe una correlación entre tipo y cantidad de cationes presentes en ambos ambientes, optándose por emplear análisis químicos del agua de poro porque la técnica es más simple de aplicar (MITCHELL, 1993).

Figura N° 2.27

Relación de las características dispersivas con las sales disueltas en el agua de poro.

SHERARD et.al (1975)



La correlación entre cationes del agua de poro y de la capa adsorbida fue determinada por RICHARDS (1954) y se da entre dos parámetros : el SAR (Sodium Adsorption Ratio) y el ESP (Exchange Sodium Percentage). El primero se calcula a partir de los cationes presentes en el **agua de poro**:

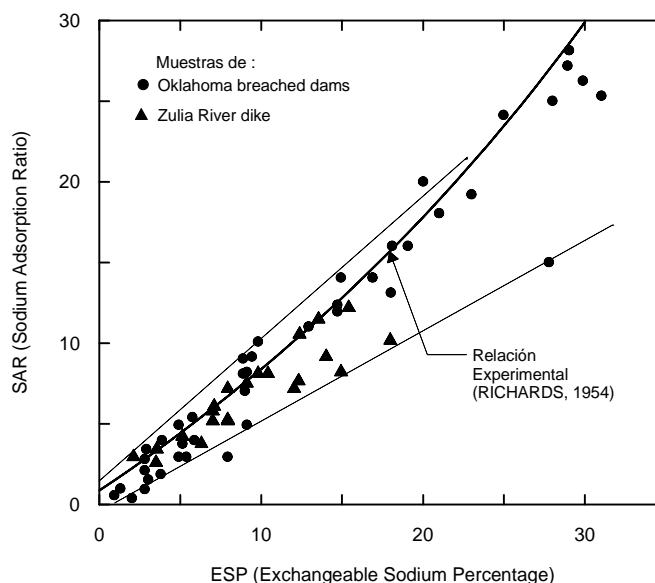
$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (6)$$

El segundo se establece a partir de análisis químicos que determinan la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la cantidad de sodio intercambiable en la **partícula de arcilla**:

$$ESP = \frac{Na}{CIC} * 100 \quad (7)$$

La Figura N° 2.28, extraída de MITCHELL (1993), presenta la correlación mencionada con los resultados de ensayos. Las líneas de trazos indican la envoltoria de dispersión observada en los datos.

Figura N° 2.28
Correlación entre ESP y SAR. MITCHELL (1993)



Resumiendo, la mayoría de los autores coinciden en el empleo del ensayo Pinhole para determinar la susceptibilidad de los suelos a la dispersión, porque éste reproduce el mecanismo de erosión que es de esperar en campo. También indican que el ensayo de sedintometría y los ensayos químicos consideran parcialmente los complejos fenómenos físico-químicos que se producen en la erosión por dispersión, y han dado lugar a ambigüedades en el momento de definir si un suelo es o no susceptible a esta clase de erosión. Sin embargo, aportan informaciones que ayudan a confirmar los resultados obtenidos mediante el ensayo Pinhole.

2.5. Estabilización y reparaciones

En la literatura existen distintas sugerencias para atenuar los efectos de la erosión por dispersión. Según GHUMAN et.al (1976), cuando se identifican arcillas dispersivas en una obra hay usualmente dos opciones:

- No usar el material o reubicar la obra (generalmente es una solución antieconómica).

- Proteger al suelo dispersivo con una capa de 40 a 50 cm. de suelo naturalmente resistente a la erosión o tratado con algún agente estabilizante que lo transforme en no dispersivo. Esta protección tiene por objeto disminuir la variación de humedad en el suelo dispersivo inferior, evitando la generación de fisuras que faciliten la entrada de agua de lluvia. Se complementa con la colocación de vegetación adecuada.

BOURDEAUX et.al (1976) han empleado 0.6 % de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ para transformar arcillas altamente dispersivas en no dispersivas.

SHERARD et.al.(1976) han realizado decenas de ensayos Pinhole en diferentes arcillas dispersivas tratadas con pequeñas cantidades de $Ca(OH)_2$ (1 % a 4 % del peso seco). En todos los casos, sin excepción, el material se transformó en no dispersivo con el tratamiento de cal.

COLE et.al.(1976) obtuvieron excelentes resultados en presas de tierra donde compactaron suelos dispersivos hasta lograr permeabilidades del orden de 10^{-5} cm/seg con el objeto de dificultar la entrada del agua de lluvia. Este tratamiento físico se obtuvo compactando el suelo a densidades superiores al 85% del Proctor Normal. Luego se colocaron protecciones de suelo dispersivo tratado con 2 % de cal.

DASCAL et.al.(1976) han estabilizado suelos dispersivos con 3 a 4 % de cal, indicando que además de producirse el intercambio de cationes de sodio por cationes de calcio más estables, la cal reacciona con los componentes puzolánicos de la arcilla formándose un cemento que le otorga mayor resistencia y mantiene unidas a las partículas, previniendo la erosión.

FORYSTHE (1976) presenta el procedimiento empleado en Mississippi para estabilizar presas de tierra con problemas de erosión por la presencia de suelos dispersivos:

1. Remover el suelo en torno al túnel de erosión.
2. Recomprimir el mismo suelo.
3. Colocar una protección con una capa de 40 cm. de suelo estabilizado con cal.

Según RYKER (1976), para establecer el porcentaje de estabilizante hay que tener en cuenta que con tal porcentaje el suelo se transforme en no dispersivo evaluado a través de ensayos Pinhole. Sin embargo, indica la necesidad de que la camada de suelo colocado como protección no se fisure por desecamiento para impedir la entrada de agua de lluvia. En el mismo trabajo se empleó cal y aluminio como agentes estabilizantes. Los resultados obtenidos con cal han sido satisfactorios, ya que han resistido a la erosión y la vegetación ha podido crecer completamente al cabo de 2 años por disminución del pH del suelo naturalmente. En el caso del aluminio, el autor menciona ciertas ventajas y desventajas. Por un lado, al ser soluble en agua, el costo de aplicación debería ser menor. También es menos peligroso de manipular que la cal. Por otro lado, el costo del aluminio es de aproximadamente cinco veces mayor a la cal aunque el porcentaje necesario pocas veces excede al 1,5 %. Otro efecto desfavorable es que transforma al suelo en extremadamente ácido (pH entre 3 y 4) impidiendo el crecimiento de vegetación. Por último, en la estabilización con aluminio se da solo el intercambio de cationes mientras que la cal produce además el efecto de cementación entre partículas ya mencionado.

Varios autores concuerdan que una buena cobertura de vegetación no necesariamente impide la erosión en suelos dispersivos ya que la misma ocurre si el agua entra al suelo a través de las fisuras. Muchas veces la vegetación no influye en que el suelo se fisure o no, incluso algunos autores mencionan que el agotamiento de humedad del suelo por la vegetación puede acrecentar el desarrollo de fisuras superficiales. El concepto general es entonces colocar cualquier protección superficial que evite las fisuras por desecamiento e impida la entrada de agua de lluvia.

HAYWARD et. al (1973) indican procedimientos elaborados en el Laboratorio de Salinidad de los E.U.A. para la rehabilitación de suelos salinos y sódicos con fines agrícolas.

Al respecto indican que el tipo y cantidad de mejorador químico que se va a aplicar a un suelo para sustituir el sodio intercambiable, depende de las características propias del suelo, de la velocidad de sustitución deseada y de limitaciones económicas.

Los mejoradores químicos con fines agrícolas que se aplican en el suelo son de tres tipos, según se indican en el Cuadro N° 2.1. La efectividad de cada mejorador depende de varios factores, siendo los principales : el contenido de carbonatos de metales alcalino-térreos y el pH. En el Anexo II se indica como influyen estos factores en la elección del tipo de mejorador, las reacciones químicas que cada uno produce para provocar el intercambio de cationes, el procedimiento recomendado para estimar las cantidades de estos mejoradores para la sustitución del sodio intercambiable y algunas cuestiones sobre velocidad de reacción, consideraciones económicas y procedimientos de aplicación. Con respecto a esto último, la manera más común de aplicarlos es agregar el mejorador en el agua de riego y de esa manera incorporarlo al suelo.

Cuadro N° 2.1

Mejoradores químicos con fines agrícolas para suelos sódicos

Mejoradores para suelos sódicos	Productos Químicos
Sales solubles de calcio	Cloruro de calcio Yeso
Ácidos o formadores de ácido	Azufre Acido sulfúrico Sulfato de hierro Sulfato de aluminio Cal-azufre
Sales de calcio de baja solubilidad (puede contener magnesio también)	Roca caliza molida Subproductos de la cal usada en los ingenios azucareros

Dada la diversidad de procesos erosivos que ocurren en la naturaleza, SHERARD et.al (1976) indican que no es posible generalizar soluciones, y en cada caso el ingeniero debe observar el modelo de erosión en campo, si extensas áreas de protección deben ser garantizadas.

3. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

Para alcanzar los objetivos propuestos se emplearon los métodos y técnicas que se describen a continuación, agrupados básicamente en seis etapas :

3.1. Revisión Bibliográfica y recolección de información

En primer lugar se efectuó una exhaustiva revisión bibliográfica. La misma permitió comprender el comportamiento de los suelos arcillosos frente al fenómeno de la dispersión. Los aspectos que interesan al trabajo fueron descritos en el capítulo anterior.

Paralelamente a la revisión bibliográfica se efectuó la búsqueda, el ordenamiento y la clasificación de la cartografía, las fotografías aéreas y los métodos constructivos vinculados al tema . Esta información fue obtenida en la Univesidad Nacional del Nordeste, en organismos oficiales de la provincia relacionados al Plan de Defensas, en la Dirección General de Suelos de la Provincia y en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

3.2. Análisis preliminar de los procesos erosivos en la zona

Con la información anterior se procedió a un estudio preliminar de los procesos erosivos, que permitió ordenar la problemática y detectar en la zona los locales de ocurrencia de las distintas morfologías de erosión.

En términos generales los procesos erosivos dependen de fenómenos físicos, químicos o una combinación de ambos. En suelos arenosos y limosos predominan los factores físicos sobre los químicos, debido a que el suelo posee poca

cohesión y es arrastrado por la energía del agua. En suelos arcillosos, la energía necesaria para que el agua pueda erosionarlos por medios físicos es considerablemente mayor debido a la cohesión que presentan estos suelos. Sin embargo algunos suelos arcillosos son particularmente susceptibles a procesos de erosión influenciados por fenómenos químicos, según lo expuesto en el *Capítulo 2*.

En nuestra zona todo parece indicar que los casos de erosión más significativos obedecen a fenómenos físico-químicos característicos de suelos arcillosos dispersivos y se están produciendo en varios locales de las obras de contención de inundaciones, como ser en la capa de arcilla que protege al terraplén de arena de refulado de las defensas del Gran Resistencia. También se han observado erosiones considerables en el terraplén de defensa de la localidad de Las Palmas, donde las aparentes características dispersivas de la arcilla que conforma el terraplén han dado origen a tubificaciones con diámetros superiores al metro, lo que atenta contra la seguridad exigida para este tipo de obra.

Otro local que debe ser mencionado es el canal de derivación del río Negro al río Salado, ya que las erosiones que se presentan en sus laderas arrastran material que se deposita en el canal y exige trabajos de mantenimiento periódicos para mantener la cota de fondo de proyecto del mismo.

3.3. Selección de los locales de estudio

Según los antecedentes del tema encontrados en la literatura, es posible atenuar los efectos de la erosión colocando una protección superficial de suelo no dispersivo o de suelo dispersivo tratado con algún agente estabilizante. Para poder comparar los costos de ambas soluciones, en principio es necesario conocer los locales donde pueden encontrarse suelos que no sean dispersivos y así poder cuantificar el costo de transportarlo.

A pesar de que estos suelos pueden ser detectados mediante ensayos apropiados, el ingeniero debe poseer al menos una guía que le sugiera los posibles

locales de extracción de muestras para el análisis. Como consecuencia de esto, se consideró utilizar la interpretación de fotografías aéreas como herramienta para definir distintos ambientes geomorfológicos y establecer sus comportamientos frente al fenómeno de erosión por dispersión.

Se adoptó como uno de los locales de estudio el canal de derivación mencionado anteriormente, porque el mismo atraviesa ambientes geomorfológicos diferentes y al tener expuesto el perfil de suelos permite visualizar su resistencia a la erosión en campo.

Mediante trabajos de escritorio sobre las fotografías aéreas se identificaron los distintos ambientes geomorfológicos en la zona del canal. En cada uno de ellos se definieron puntos considerados representativos, donde se efectuaron las observaciones de campo y las perforaciones para conocer en detalle el perfil de suelos y extraer las muestras para ensayos de laboratorio.

También fueron efectuadas observaciones de campo en las defensas del Gran Resistencia y de Las Palmas, mediante las cuales fue posible detectar lugares donde existen erosiones considerables y otros donde el terraplén se encuentra en buenas condiciones. En cada uno de estos lugares se sacaron muestras de suelos representativas para los ensayos correspondientes.

Se colectaron un total de cincuenta y cuatro muestras de suelo. Cuarenta y dos de las mismas pertenecen a trece perforaciones efectuadas a lo largo de la traza del canal de derivación del río Negro al río Salado. Otras nueve pertenecen a distintos locales de las defensas del Gran Resistencia. En Las Palmas fueron colectadas tres muestras en el lugar donde se dieron las tubificaciones mencionadas.

3.4. Ensayos de laboratorio

Sobre las muestras de suelo recogidas se efectuaron ensayos convencionales de clasificación de suelos para fines de ingeniería y ensayos no convencionales para identificación de suelos dispersivos, como ensayos Pinhole , ensayos de doble sedintometría y ensayos químicos.

Con el objetivo de identificar suelos dispersivos mediante cartas de suelos con fines agrícolas disponibles, como las elaboradas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), se intentó establecer una correlación entre los ensayos que este organismo realiza en cada ambiente geomorfológico y las características dispersivas de los suelos. Para ello se enviaron las muestras de suelo al laboratorio del INTA ubicado en la localidad de Saenz Peña para que se realicen ensayos químicos de rutina. En forma paralela se efectuaron ensayos Pinhole sobre las mismas muestras de suelo para establecer sus características dispersivas.

A los efectos de comprobar la eficiencia de la cal como estabilizante de suelos dispersivos, se escogieron algunas muestras de los locales con mayores problemas de erosión. A cada muestra se agregó cal en porcentajes crecientes hasta que la misma dejaba de comportarse como dispersiva en el ensayo Pinhole, y se asumió que ese porcentaje de cal es el necesario para estabilizar al suelo.

3.5. Correlaciones entre características dispersivas y propiedades químicas

Los ensayos de laboratorios efectuados permitieron establecer una correlación entre las propiedades químicas de los suelos y las características dispersivas de los mismos. Como tales propiedades químicas son determinadas en los estudios agronómicos que efectúa el I.N.T.A, se estima factible emplear las cartas de suelos ya elaboradas por este organismo para detectar locales de posible ocurrencia de suelos dispersivos.

3.6. Análisis de la correlación propuesta en el Departamento Maipú

Para analizar la correlación establecida en el punto 3.5. se decidió estudiar los procesos de erosión que se están dando naturalmente en el Departamento Maipú de la Prov. del Chaco.

Este departamento fue escogido porque en él existen estudios de cartas de suelos elaboradas por el I.N.T.A. y también existen cartas geomorfológicas efectuadas por POPOLIZIO(1978) que permiten detectar sectores con procesos de erosión. La superposición de ambas cartas permite comprender la forma en que se desarrollan los procesos de erosión sobre suelos susceptibles a dispersión, identificados empleando la correlación antes mencionada.

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS LOCALES DE ESTUDIO

A continuación se presenta una descripción de los locales de estudio, indicándose los motivos por los que fueron seleccionados, sus localizaciones, los problemas de erosión que presentan y sus características geomorfológicas. Por último, se analiza el comportamiento de los procesos de erosión observados.

4.1. Canal de derivación del río Negro al río Salado

Se adoptó como uno de los locales de estudio al canal de derivación del río Negro al río Salado, porque el mismo atraviesa ambientes geomorfológicos diferentes que pueden ser identificados en fotografías aéreas, y al tener expuesto el perfil de suelos permite visualizar su resistencia a la erosión en campo.

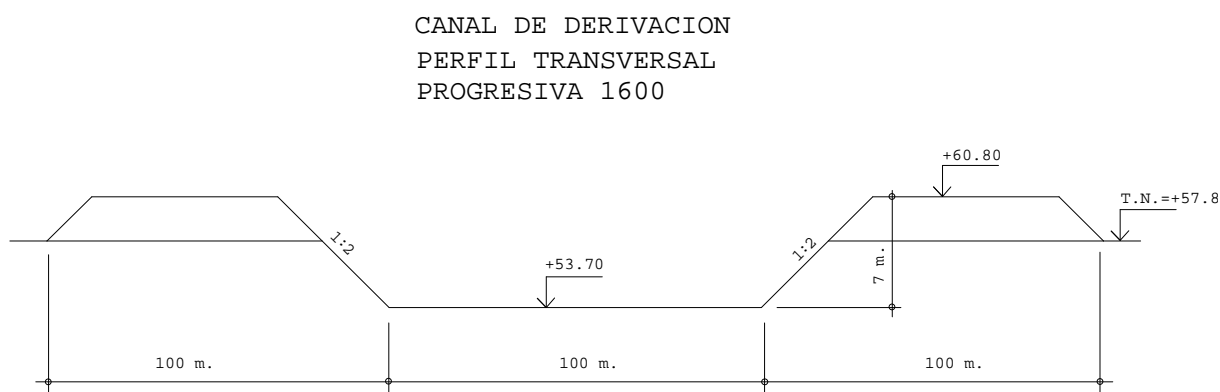
Este canal se encuentra ubicado cerca de la localidad de Laguna Blanca y tiene la función de desviar los excedentes del río Negro hacia el río Salado fuera del recinto de defensas del Gran Resistencia en épocas de inundaciones. Posee una longitud total de aproximadamente 9 km con sección transversal variable. La Figura N° 4.1 muestra un corte transversal del canal correspondiente a la progresiva +1600 desde su inicio en el río Negro.

Desde el punto de vista geomorfológico, el canal se encuentra ubicado en la Unidad de 2^{do} Orden 1.4, denominada Llanura oriental del Chaco con Hidrófilas (POPOLIZIO, 1980). La parte norte del canal, en sus inicios en el río Negro, se desarrolla sobre la Unidad de 4^{to} Orden 1.4.1.2, denominada Saladillo - Tapenagá, que se caracteriza por presentar planicies fluviales con back swamps; planicies pseudokarstizadas con esteros y cañadas y con bosques altos en los paleoderrames. La

parte sur del canal se ubica sobre la Unidad de 4^{to} Orden 1.4.2.1, denominada Colonia Baranda, perteneciente al Dorso Oriental de la Prov. del Chaco con sabanas anhegables y cañadas. Los procesos pseudokársticos no son dominantes en los interfluvios, contrastando con la Unidad 1.4.1.2 del sector norte del canal.

Figura N° 4.1

Corte transversal del canal en progresiva +1600



La Figura N° 4.2. presenta las características geomorfológicas del sector donde se encuentra emplazado el canal, según POPOLIZIO (1978).

Como complemento a esta carta geomorfológica, en la Figura N° 4.3 se observan las fotografías aéreas que permiten apreciar con más detalle las características de la zona.

Se efectuaron salidas de campo para relevar el comportamiento de cada sector del canal frente a la erosión. Se pueden distinguir al menos cuatro zonas bien diferenciadas. La primera, desde la progresiva 0000 hasta la progresiva 1300, caracterizada por presentar erosiones en forma de surcos paralelos no muy profundos pero poco espaciados, que le dan una característica de peinado al talud. La Figura N° 4.4 muestra el modelo de erosión típico del sector mencionado.

Desde la progresiva 1300 a la 2300 el suelo tiene un comportamiento semejante al anterior con procesos de erosión en surcos paralelos, pero con

profundidades considerablemente mayores, que en determinados lugares generan cárcavas como las observadas en la Figura N° 4.5, exigiendo trabajos de mantenimiento periódicos.

Figura N° 4.2
Características geomorfológicas Canal Río Negro - Río Salado
POPOLIZIO (1978)

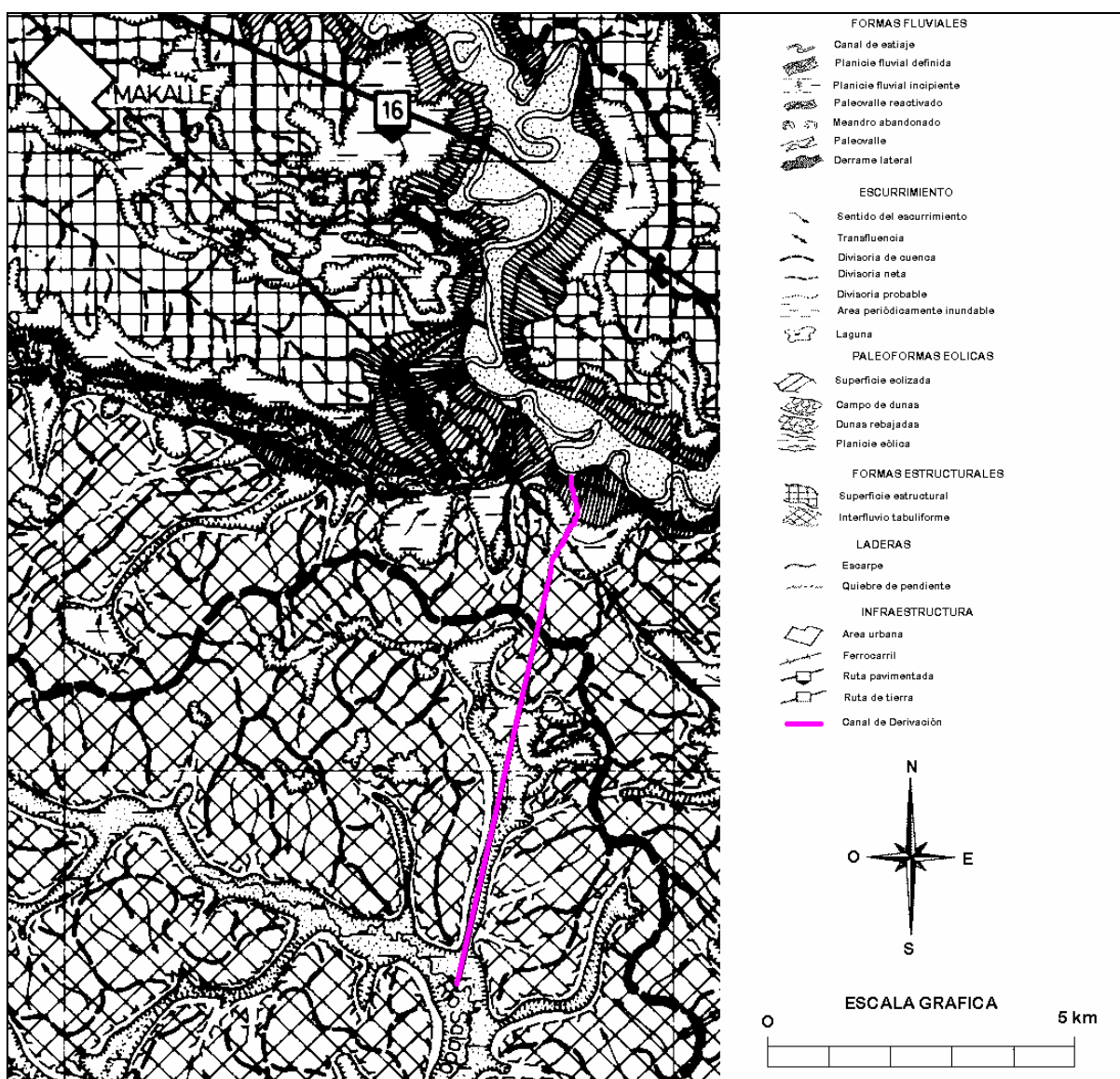


Figura N° 4.3

Fotografías aéreas de la zona del canal de derivación.

Figura N° 4.4
Erosiones entre progresivas 0000 - 1300

Figura N° 4.5
Erosiones entre progresivas 1300 - 2300

A partir de la progresiva 2300, que coincide con la divisoria de aguas indicada en la Figura N° 4.2, y hasta la progresiva 4500, los procesos de erosión adquieren una morfología totalmente distinta, caracterizándose por la presencia de una capa superior de suelo orgánico resistente a la erosión que atenúa el proceso de degradación del suelo erodible inferior mediante la formación de un “alero”. El mismo disminuye el contacto del agua de lluvia con el suelo erodible, según se observa en las Figuras N° 4.6 y 4.7. Esta situación, ayudada por la presencia de vegetación, parece estabilizar el proceso sin trabajos adicionales.

Figura N° 4.6
Procesos de erosión entre progresivas 2300 - 4500

Figura N° 4.7
“Alero” formado por capa orgánica resistente a la erosión.

Desde la progresiva 4500 hasta la progresiva 8900 al final del canal, no se observan procesos de erosión significativos generados por el agua de lluvia en las laderas, como se aprecia en la Figura N° 4.8.

En base al comportamiento de los suelos observados y a los ambientes geomorfológicos identificados, se escogieron 13 lugares para efectuar perforaciones de aproximadamente 3 m de profundidad, con el objeto de estudiar el perfil de suelos y recoger muestras para ensayos de laboratorio. La ubicación de las perforaciones está

señalada en la Figura N° 4.3 con números, los que corresponden a las progresivas indicadas en el Cuadro N° 4.1.

Figura N° 4.8

Talud del canal representativo entre progresivas 4500 - 8900

Cuadro N° 4.1

Progresivas de los perfiles de suelos efectuados

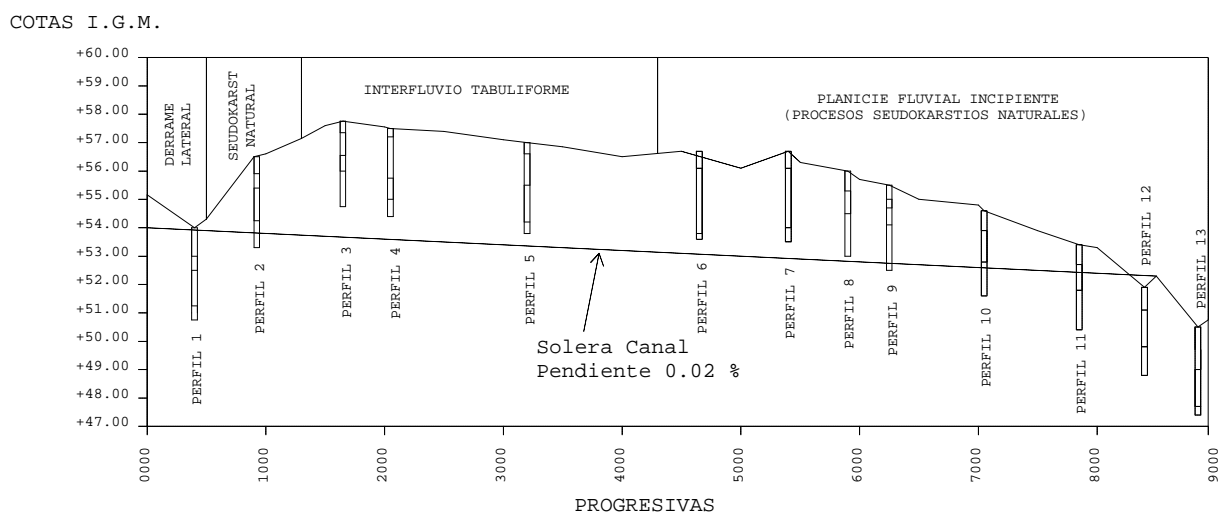
Perfil N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Progresiva desde Río Negro	400	900	1650	2050	3200	4650	5400	5900	6250	7050	7850	8400	8850

La descripción de cada perfil de suelo, con los ensayos de caracterización, se encuentran en detalle en el Anexo III. Los resultados indican que son suelos arcillosos que clasifican como CH y ocasionalmente como CL, según el Sistema Unificado de suelos. A pesar de esta aparente homogeneidad en la clasificación mencionada, presentan estructuras bien diferentes que parecen influir en sus comportamientos frente a la erosión. Así, los perfiles N° 1 y 2 presentan estructuras características de suelos sedimentarios de derrames laterales. Entre las progresivas 1300 a 4500 y hasta profundidades de 2.50 a 3.00 metros, los perfiles de suelos poseen estructuras sumamente abiertas, características de depósitos eólicos. En los perfiles N° 7 y 8 se observa una lenta transición con estructuras más pesadas pero con material originario aparentemente semejante a los anteriores. A partir de la progresiva

6250 (Perfil N° 9) hasta la 7850 (Perfil N° 11), los suelos presentan una estructura sumamente pesada, que coincide con la zona de menor erosión. Luego, en los perfiles N° 12 y 13, se observan estructuras características de suelos más sueltos y que corresponderían a los derrames laterales del río Salado.

La Figura N° 4.9 indica un perfil longitudinal del canal donde se observa la topografía natural, la solera del canal, los ambientes geomorfológicos presentados en la Figura N° 4.2 y la ubicación de los perfiles de suelos efectuados.

Figura N° 4.9.
Perfil longitudinal del canal

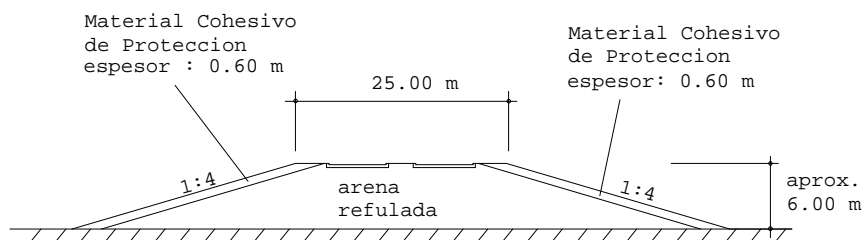


4.2. Terraplén de defensas del Gran Resistencia

El sector de defensas del Gran Resistencia ubicado sobre el riacho Barranqueras, está compuesto en gran parte por un terraplén de arena conformado empleando la técnica de refulado. Este terraplén de arena está cubierto por una capa de arcilla de aproximadamente 0.60 m de espesor con el objeto de servir de protección contra la erosión. La Figura N° 4.10 muestra un perfil transversal típico del terraplén de defensas, el cual posee en su coronamiento un pavimento de hormigón armado.

Figura N° 4.10

Corte transversal del terraplén de defensas en la zona del riacho Barranqueras.



A partir de inspecciones visuales en campo y de informaciones obtenidas en el Plan de Defensas, se pudo constatar que la capa de arcilla que sirve de protección al terraplén de arena está sufriendo serios problemas de erosión y generando altos costos de mantenimiento. En la Figura N° 4.11 se observa un sector con problemas donde, además de la pérdida de material arenoso y arcilloso, se observa el descalce del pavimento de hormigón ubicado en su coronamiento.

Figura N° 4.11

Procesos de erosión en el terraplén de defensas del Gran Resistencia

Con el objeto de estudiar el motivo de la erosión en la capa de arcilla de este terraplén, se colectaron nueve muestras de lugares con problemas. Los resultados de ensayos de caracterización indican que son suelos arcillosos que clasifican como

CL y CH según el Sistema Unificado de Suelos. En el Anexo III se encuentran detallados los resultados de ensayos.

4.3. Terraplén de defensas de Las Palmas

Las defensas de la localidad de Las Palmas de la provincia del Chaco están constituidas por un terraplén de arcilla con pendientes de taludes 1:2. Posee un ancho de coronamiento promedio de 4 metros y una cota de coronamiento de + 54.90 m del I.G.M., implicando alcanzar alturas del terraplén entre 3.50 y 4.50 metros en determinados lugares.

Un amplio sector de este sistema de defensas ha presentado serios problemas de erosión asociados a la presencia de suelos arcillosos altamente erodibles. La Figura N° 4.12 ilustra la erosión que llevó al colapso del sistema en el sector de las instalaciones de bombeo, con alturas del terraplén de aproximadamente 4.30 metros. La Figura N° 4.13 a su vez muestra el proceso de deterioro que está sufriendo el terraplén, típico de fenómenos pseudokársticos.

Figura N° 4.12

Tubificaciones que ocasionaron el colapso de las defensas de Las Palmas

Figura N° 4.13

Procesos pseudokársticos en el terraplén de defensas de Las Palmas

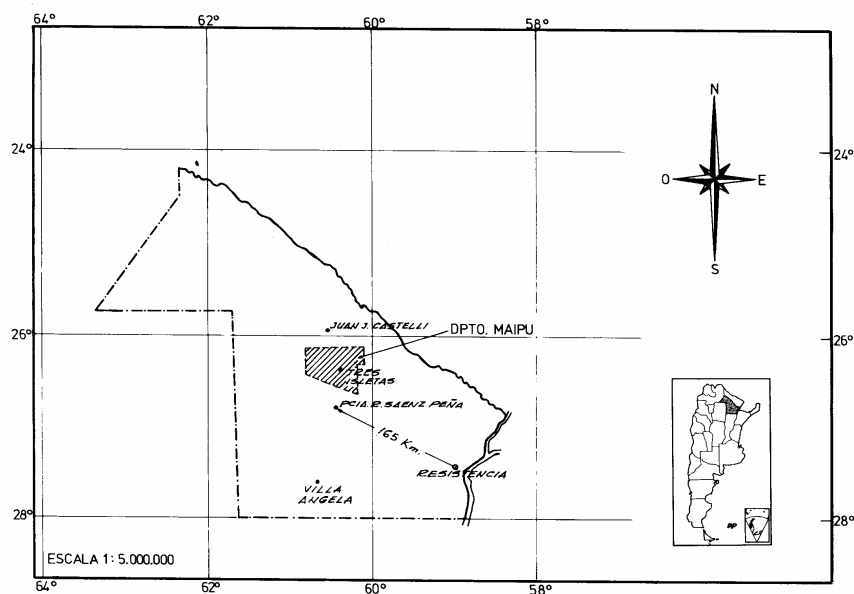
En este sector fueron colectadas tres muestras de suelos, a los efectos de establecer las causas de la degradación del terraplén. Los resultados de ensayos de caracterización son presentados en el Anexo III y clasifican a estas muestras como arcillas altamente plásticas denominadas CH según el Sistema Unificado de Suelos.

4.4. Departamento Maipú

Este departamento fue escogido con el objeto de cambiar la escala de análisis y poder encontrar modelos que permitan identificar locales de posible ocurrencia de suelos dispersivos, mediante interpretación de fotos aéreas y de cartas de suelos. El departamento Maipú se encuentra ubicado en el centro de la provincia del Chaco(Figura N° 4.14) y posee una superficie de 2853 km².

Motivó su elección el hecho que gran parte de su superficie se encuentra analizada geomorfológicamente por POPOLIZIO (1978), donde pueden identificarse los procesos de erosión que se están generando en forma natural, y además el INTA ha efectuado cartas de suelos con fines agrícolas, donde se indican las propiedades químicas de cada ambiente.

Figura N° 4.14
Ubicación del Departamento Maipú



La carta geomorfológica elaborada por POPOLIZIO (1978) se presenta en la Figura N° 4.15. Al este de la localidad de Tres Isletas se encuentra el límite de la Unidad de 2^{do} Orden denominada Llanura Oriental del Chaco con Hidrófilas, y dentro de esta unidad, el sector en cuestión pertenece a la Unidad de 4^{to} Orden 1.4.1.1, denominada Unidad Bransen, y que se caracteriza por presentar una planicie de paleoconoides aluviales, pseudokarstizada, con bosques cerrados y cañadas.

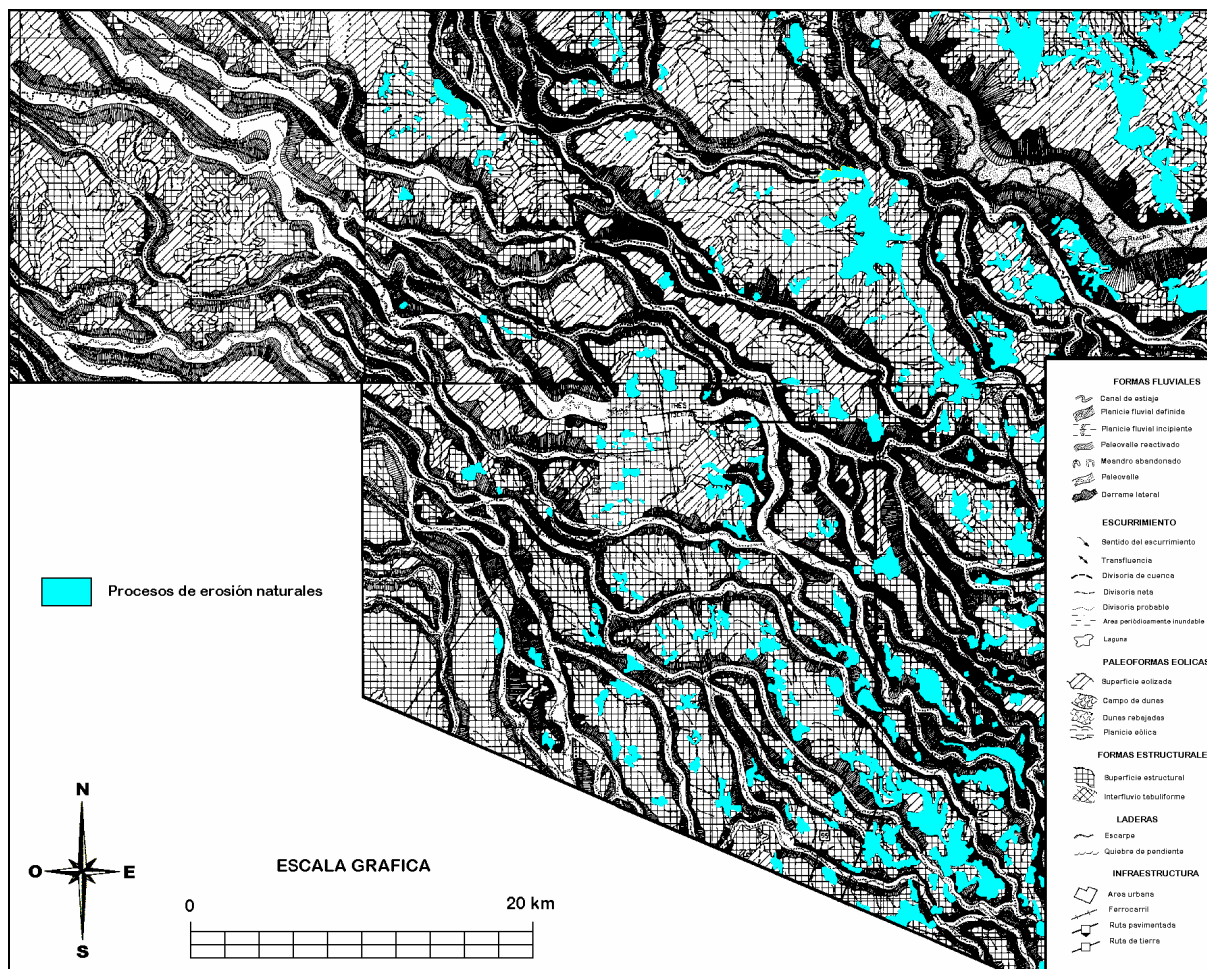
El resto del departamento pertenece a la Unidad de 2^{do} Orden 1.3, denominada Llanura Occidental del Chaco con parques y sabanas secas. El sector central del mismo corresponde a la Unidad de 4^{do} Orden 1.3.2.1, denominada Unidad Saenz Peña, que se caracteriza por ser una planicie de paleoconoides aluviales con bosques altos. Hacia el oeste, se desarrolla la Unidad de 4^{to} Orden 1.3.2.4, llamada Unidad Gancedo, formando la depresión del paleovalle afluente del paleosalado con parques y sabanas.

En la Figura N° 4.15 se han indicado con azul los sectores donde naturalmente se está dando procesos de erosión debido a fenómenos pseudokársticos, observándose un aumento en la ocurrencia de los mismos en dirección este - oeste, guardando cierta coincidencia con las unidades geomorfológicas mencionadas. Se

observan también procesos pseudokársticos aerolares y lineales, con una tendencia de los primeros a adoptar la morfología de los segundos.

Figura N° 4.15

Características geomorfológicas del Departamento Maipú. POPOLIZIO (1978)



4.5. Tipificación de los procesos de erosión observados

Los procesos de erosión fueron analizados en función al modelo o aspecto que presentan, no pretendiendo abarcar todas las morfologías posibles sino solamente las identificadas en este trabajo.

Al analizar el problema se detectaron formas bien diferentes, según el tamaño del área afectada por estos procesos, lo que condujo a realizar una primera gran división de acuerdo a la extensión del sector erosionado en :

- Procesos de erosión de gran extensión
- Procesos de erosión en áreas reducidas

4.5.1. Procesos de erosión de gran extensión

Estos procesos fueron observados en suelos naturales y se caracterizan por presentar una pendiente de terreno muy baja, pudiendo abarcar superficies de varios kilómetros cuadrados. A su vez, pueden presentarse en forma de depresiones cerradas o con un entallamiento lineal predominante, lo que permite subdividirlos en :

- **Modelos Areolares:** Corresponden a los modelos pseudokársticos areolares indicados en el Capítulo 2, que se caracterizan por formas circulares con áreas inundables en su interior (Figura N° 2.1).
- **Modelos Lineales:** Estos procesos se generan por evolución de los anteriores cuando la erosión tiende a unir las depresiones, interconectándolas (Figura N° 2.3), para luego tender a la formación de una red de escurrimiento del tipo dendrítica (POPOLIZIO, 1975).

4.5.2. Procesos de erosión en áreas reducidas

Estos procesos ocurren con pendientes del terreno bastantes acentuadas, como en cortes de taludes naturales o en terraplenes de suelo compactado. Sus dimensiones pocas veces superan lo apreciable a simple vista, aunque en ciertos casos pueden alcanzar longitudes de algunas centenas de metros. De acuerdo a la forma que presentan es posible subdividirlos en :

- **Tubificaciones:** Estos procesos fueron descritos en detalle en el Capítulo 2 (Figuras N° 2.6 a 2.8 y 4.13). Los mismos se inician con conductos pequeños cuya evolución a dimensiones mayores desintegra paulatinamente al talud o terraplén. En el caso de terraplenes de caminos o taludes de canales, estos procesos se generan

cuando la parte superior del terraplén no resiste a la erosión y además probablemente tenga características expansivas, que originan fisuras permitiendo la entrada del agua de lluvia a la masa de suelo. En terraplenes de defensas estas tubificaciones pueden generarse en sectores con concentraciones de flujo de agua cercana a obras de control, como ilustra la Figura N° 4.12.

- **Surcos:** Este tipo de erosión se da en terraplenes o taludes de canales donde no existen fisuras en el coronamiento que permita la entrada de agua de lluvia a la masa de suelo. Se forman surcos poco espaciados en sus laderas, dando una apariencia de peinado al talud (Figura N° 4.4). La velocidad de degradación del talud es considerablemente más lenta que en el modelo anterior.

- **Cavidades:** Este modelo fue identificado cuando en el perfil de suelo expuesto existe una camada resistente a la erosión. El deterioro del talud se da en el suelo inferior a esta camada, iniciándose con surcos para evolucionar hacia cavidades como se observa en la Figura N° 4.6. Si la camada de suelo resistente a la erosión está en la parte superior del talud, el proceso puede estabilizarse naturalmente cuando el alero formado y la vegetación consiguen proteger al suelo erodible inferior. Sin embargo, si el estrato resistente a la erosión se encuentra en la mitad del talud, el peso del suelo superior y las cavidades inferiores pueden generar deslizamiento de taludes y reiniciar el proceso de degradación.

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Además de los ensayos de caracterización mencionados en el Capítulo 4 y descritos en el Anexo III, se realizaron ensayos pinhole, ensayos de doble sedintometría y ensayos químicos con el objeto de identificar y analizar la susceptibilidad de las muestras colectadas al fenómeno de la dispersión. También fueron realizados ensayos pinhole sobre muestras dispersivas a las que se adicionó cal para determinar las propiedades estabilizantes de este material. En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos mencionados y el análisis e interpretación de los mismos.

5.1. Ensayos Pinhole

Sobre las muestras colectadas fueron ejecutados ensayos pinhole según el procedimiento descrito en el Anexo I. Como no se contaba con el equipamiento, fue necesario su diseño y construcción como parte de las tareas de este trabajo. La Figura N° 5.1. presenta una fotografía del equipo construido.

El Cuadro N° 5.1 presenta los resultados obtenidos en este ensayo, como así también las clasificaciones standard de suelos para ingeniería (S.U.C.S. y H.R.B). Las muestras que resultaron dispersivas en el ensayo son denominadas D1 y D2 y las no dispersivas ND1, ND2, ND3 y ND4 (ver Anexo I). Los resultados indican que las clasificaciones S.U.C.S. y H.R.B. utilizadas en ingeniería no permiten identificar la susceptibilidad de los suelos al fenómeno de la dispersión.

Figura N? 5.1
Equipo para ensayo Pinhole construído

Con respecto a las erosiones observadas, se ha encontrado bastante coherencia entre los resultados de ensayos Pinhole y el comportamiento del suelo en campo. En el caso del canal de derivación del río Negro al Salado, las muestras de suelo que resultaron dispersivas en el ensayo Pinhole presentan erosiones considerables en campo, a excepción de la muestra 15 correspondiente a la camada superficial del perfil 5, la cual forma el “alero” mencionado en el capítulo anterior (Figura N? 4.7). Como los ensayos Pinhole fueron ejecutados con muestras alteradas y compactadas se deduce que, en este caso, la estructura del suelo y la presencia de raíces pueden ser factores importantes en la resistencia a la erosión. En el caso de las muestras extraídas de los terraplenes de defensa de Resistencia y Las Palmas, las mismas fueron todas dispersivas en el ensayo Pinhole, corroborando también las observaciones de campo.

Cuadro N° 5.1
Resultados de ensayos Pinhole

Muestra N°	Ubicación	H.R.B.	S.U.C.S.	Características Dispersivas
1	Canal - Perfil N° 1	A-7-6 (24)	CL	D1
2	Canal - Perfil N° 1	A-7-6 (44)	CH	D2
3	Canal - Perfil N° 1	A-7-6 (45)	CH	D2
4	Canal - Perfil N° 1	A-7-6 (59)	CH	D2
5	Canal - Perfil N° 2	A-7-6 (28)	CH	D2
6	Canal - Perfil N° 2	A-7-6 (34)	CH	ND4
7	Canal - Perfil N° 2	A-7-6 (38)	CH	D2
8	Canal - Perfil N° 3	A-7-6 (30)	CH	D1
9	Canal - Perfil N° 3	A-7-6 (31)	CH	D1
10	Canal - Perfil N° 3	A-7-6 (43)	CH	D2
11	Canal - Perfil N° 3	A-7-6 (43)	CH	D2
12	Canal - Perfil N° 4	A-7-6 (28)	CL	D1
13	Canal - Perfil N° 4	A-7-6 (41)	CH	D1
14	Canal - Perfil N° 4	A-7-6 (42)	CH	D2
15	Canal - Perfil N° 5	A-7-6 (31)	CH	D2
16	Canal - Perfil N° 5	A-7-6 (32)	CH	D2
17	Canal - Perfil N° 5	A-7-6 (30)	CH	D2
18	Canal - Perfil N° 5	A-7-6 (52)	CH	D2
19	Canal - Perfil N° 6	A-7-6 (24)	CL	D1
20	Canal - Perfil N° 6	A-7-6 (41)	CH	D1
21	Canal - Perfil N° 7	A-7-6 (33)	CH	D2
22	Canal - Perfil N° 7	A-7-6 (27)	CL	D2
23	Canal - Perfil N° 7	A-7-6 (39)	CH	D2
24	Canal - Perfil N° 8	A-7-6 (47)	CH	D2
25	Canal - Perfil N° 8	A-7-6 (44)	CH	D2
26	Canal - Perfil N° 8	A-7-6 (39)	CH	D2
27	Canal - Perfil N° 9	A-7-6 (37)	CH	D2
28	Canal - Perfil N° 9	A-7-6 (49)	CH	ND4
29	Canal - Perfil N° 9	A-7-6 (40)	CH	ND1
30	Canal - Perfil N° 9	A-7-6 (41)	CH	ND3
31	Canal - Perfil N° 10	A-7-6 (36)	CH	ND1
32	Canal - Perfil N° 10	A-7-6 (36)	CH	ND1
33	Canal - Perfil N° 10	A-7-6 (39)	CH	ND1
34	Canal - Perfil N° 11	A-7-6 (36)	CH	ND2
35	Canal - Perfil N° 11	A-7-6 (34)	CH	ND1
36	Canal - Perfil N° 11	A-7-6 (37)	CH	ND1
37	Canal - Perfil N° 12	A-7-6 (39)	CH	D1
38	Canal - Perfil N° 12	A-7-6 (37)	CH	D2
39	Canal - Perfil N° 12	A-7-6 (64)	CH	D2
40	Canal - Perfil N° 13	A-7-6 (30)	CH	D2
41	Canal - Perfil N° 13	A-7-6 (42)	CH	D2
42	Canal - Perfil N° 13	A-7-6 (47)	CH	D2
43	Defensas Rcia.	A-7-6 (19)	CL	D1
44	Defensas Rcia.	A-7-6 (25)	CL	D1
45	Defensas Rcia.	A-6 (10)	CL	D2
46	Defensas Rcia.	A-7-6 (40)	CH	D2
47	Defensas Rcia.	A-7-6 (22)	CL	D1
48	Defensas Rcia.	A-7-6 (36)	CH	D2
49	Defensas Rcia.	A-6 (14)	CL	D1
50	Defensas Rcia.	A-7-6 (34)	CH	D1
51	Defensas Rcia.	A-7-6 (44)	CH	D2
52	Defensas Las Palmas	A-7-6 (53)	CH	D1
53	Defensas Las Palmas	A-7-6 (34)	CH	D1
54	Defensas Las Palmas	A-7-6 (29)	CH	D1

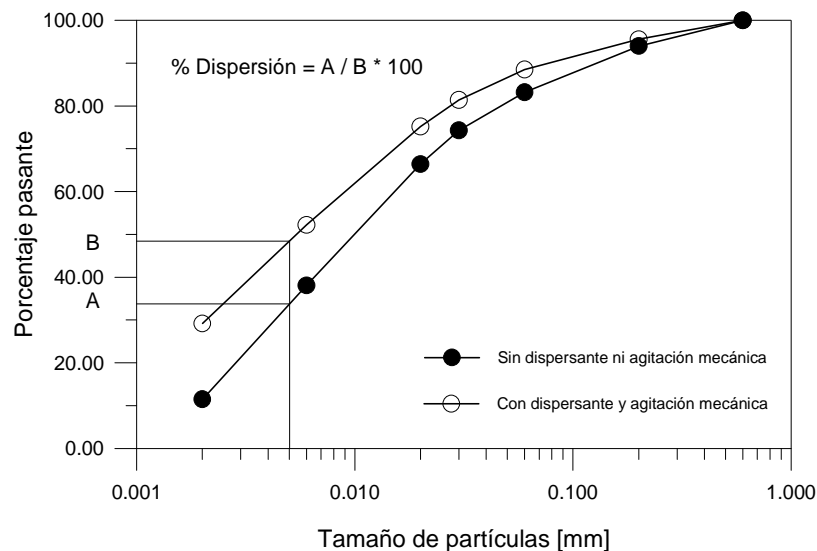
5.2. Ensayos de Doble Sedimentación

Otro método propuesto en la literatura para establecer las características dispersivas de un suelo es el ensayo de Doble Sedimentación. Como fue explicado en el Capítulo 2, el método consiste en efectuar dos veces el ensayo de sedimentación, utilizado para determinar la curva granulométrica para tamaños de partículas menores al tamiz #200 (0.074 mm). En primer término se lo efectúa normalmente, es decir, empleando agitación mecánica y dispersante químico. Luego se lo realiza sin agitación mecánica y sin dispersante. En ambos casos se determina el porcentaje de suelo menor a 5 μ (0.005 mm) según Figura N $^{\circ}$ 5.2, y se define al porcentaje de dispersión como la relación :

$$\text{Porcentaje de Dispersión} = \frac{\text{Porcentaje } 5\mu \text{ sin dispersante}}{\text{Porcentaje } 5\mu \text{ con dispersante}} * 100 \quad (8)$$

Figura N $^{\circ}$ 5.2

Determinación del % 5 μ en curvas granulométricas



Cuanto más alto sea este porcentaje, más dispersivo será el suelo, porque el mismo se dispersa sin necesidad de agitación mecánica y dispersante químico. Se definen como suelos dispersivos aquellos que presentan porcentaje de dispersión mayor al 40 %.

Para evaluar la confiabilidad del método se efectuaron estos ensayos en las muestras colectadas y se compararon los resultados con los obtenidos en el ensayo Pinhole. En el Anexo IV se presentan los resultados de ensayos de Doble Sedimentación con las curvas granulométricas correspondientes. El Cuadro N° 5.2 resume los resultados obtenidos e indica el porcentaje de dispersión calculado y también los resultados obtenidos en los ensayos Pinhole. A los efectos de una comparación visual, se han sombreado en dicha tabla las muestras *no dispersivas* utilizando ambos métodos, pudiéndose observar que no existe buena correspondencia entre ellos. Si admitimos que el ensayo Pinhole identifica efectivamente a los suelos dispersivos podemos concluir que el método de Doble Sedimentación podría dar lugar a ambigüedades al definir las características dispersivas de un suelo.

5.3. Ensayos Químicos

Como fue mencionado, en nuestro país existen cartas de suelos agronómicas efectuadas principalmente por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), las cuales se realizan regularmente desde hace tiempo en toda la Argentina. En particular, la provincia del Chaco se encuentra cubierta por estos estudios en las áreas más productivas. El procedimiento utilizado es empleado también en otros países y consiste en identificar distintos ambientes geomorfológicos empleando fotografías aéreas y en cada ambiente efectuar una descripción de las características de drenaje, resistencia a la erosión, uso de la tierra, material originario del suelo, vegetación, relieve e informaciones adicionales orientadas al uso agronómico del suelo. Asimismo, para cada ambiente identificado se presenta un análisis detallado del perfil de suelos hasta profundidades de 1.80 m, indicando en cada estrato los resultados de análisis de granulometría, humedad natural, materia orgánica, pH, componentes químicos, entre otros. El Cuadro N° 5.3 presenta resultados típicos (INTA, 1980).

Cuadro N° 5.2

Comparación del método de Doble Sedimentación con ensayos Pinhole

Muestra N°	% ?5? Con Defloculante (1)	% ?5? Sin Defloculante (2)	Porcentaje de Dispersión $\frac{(1)}{(2)} * 100$	Resultados de Ensayos Pinhole
1	22.5	41.6	185	D1
2	32.7	20	61	D2
3	35	27.1	77	D2
4	35.8	29.5	82	D2
5	33.9	30	89	D2
6	15.4	5.7	37	ND4
7	16.3	6.8	42	D2
8	27.7	4.6	17	D1
9	20.6	4.6	22	D1
10	29.6	21.9	74	D2
11	32.4	8.2	25	D2
12	25.1	17.2	68	D1
13	24.5	21.5	87	D1
14	31.9	33.6	105	D2
15	29.4	15.5	53	D2
16	25.3	8.6	34	D2
17	27.5	7.6	28	D2
18	37.8	19.3	51	D2
19	24.7	12.6	51	D1
20	28.6	25	87	D1
21	35.1	36.1	103	D2
22	19.3	6.6	34	D2
23	29.6	4.8	16	D2
24	36.7	6.3	17	D2
25	23.5	4.3	18	D2
26	29.1	11	38	D2
27	30.8	15.8	51	D2
28	35.4	4.1	11	ND4
29	31.6	2.4	8	ND1
30	30.6	4.8	16	ND3
31	30	16.1	54	ND1
32	31.8	4.7	15	ND1
33	32.2	4.8	15	ND1
34	31.8	13.9	44	ND2
35	14.1	5.2	36	ND1
36	35.2	5.3	15	ND1
37	9.3	6.9	74	D1
38	24.5	5.1	21	D2
39	35.9	45.5	127	D2
40	14.2	6.8	48	D2
41	29.6	6.9	23	D2
42	29.9	8.9	30	D2
43	35.9	14.4	40	D1
44	29.4	11.7	40	D1
45	23.2	7.3	31	D2
46	40.1	5.8	14	D2
47	30.5	11.5	38	D1
48	33.7	30.1	90	D2
49	25.6	5.6	22	D1
50	33.7	10	30	D1
51	41.1	12	29	D2
52	38.6	34.1	88	D1
53	31.7	33.3	105	D1
54	26.8	27.8	104	D1

Cuadro N° 5.3

Perfil representativo de la Serie Bajo Hondo Grande. INTA (1980)

Perfil N°		A 11 ₀₁	A 12	A 3	C 11	C 12
N° de Laboratorio		21924	21925	21926	21927	21928
Profundidad (cm)		0-20	20-38	38-70	70-100	100-140
Factor de Humedad		1.01	1.01	1.01	1.02	1.02
Materia Orgánica	C (%)	0.74	0.92	0.29		
	N (%)	0.084	0.091			
	C/N	9	10			
Textura en %	Arcilla (? 2?)	15.4	15.6	17.1	28.7	26.7
	Limo (2-20?)	7.5	13.8	12.0	10.7	14.7
	Limo (2-50?)	17.9	23.3	20.4	18.3	23.4
	Arena m.fina 1 (50-74?)	16.5	10.2	14.0	8.7	9.8
	Arena m.fina 2 (74-100?)	19.6	19.1	17.7	17.2	15.8
	Arena fina (100-250?)	30.5	31.7	30.7	27.0	24.2
	Arena media (250-500?)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Arena gruesa (500-1000?)					
	Arena m.gruesa (1000-2000?)					
	Gravilla (? 2mm)					
CaCO ₃ (%) V		0	0	0	0	0
Equivalente de humedad (%)		10.2	14.2	12.0	20.5	18.4
Resistencia de la pasta (Ohms/cm)		6750	4050	6390	3510	1215
pH en pasta		7.0	6.2	6.3	5.9	6.0
pH en H ₂ O (1:2.5)		7.3	7.2	6.6	6.2	6.4
pH en 1NKCl (1:2.5)		6.5	6.3	5.7	5.2	5.2
Conductividad (mmhos/cm)		0.37	0.62	0.39	0.71	2.06
Cationes de cambio [me/100g]	Ca ⁺⁺	5.5	6.8	6.2	8.6	
	Mg ⁺⁺	1.9	2.1	2.3	3.2	
	Na ⁺	0.2	0.2	0.2	0.2	
	K ⁺	1.1	1.3	0.4	0.4	
% Na en cambio de v.T.		2.5	1.9	2.5	1.5	
% agua de saturación		37	38	36	38	38
Suma de cationes de cambio (m.e./100 gr)		8.7	10.4	9.1	12.4	
H cambio (m.e./100 gr)		2.0	2.6	1.2	2.6	
Cap.Int. Catiónico(m.e./100 gr) NH ₄ ⁺ o Na ⁺		7.9	10.7	8.1	13.4	
% de saturación de T		100	97	100	92	
% de saturación de S + H		81	80	90	82	

Según lo presentado en el Capítulo 2, los componentes químicos de los suelos tienen fundamental importancia en su comportamiento dispersivo. A los efectos de poder utilizar las cartas de suelos agronómicas ya elaboradas se pensó en establecer una correlación entre las propiedades químicas determinadas en estos estudios y las características dispersivas identificadas a través del ensayo Pinhole.

Con este objetivo, las 54 muestras colectadas fueron enviadas al Laboratorio de Suelos del I.N.T.A. ubicado en Pcia. Roque Saenz Peña, donde se

efectuaron las determinaciones químicas de rutina. Los resultados están detallados en el Anexo V, determinándose en cada muestra :

- ? Cationes Intercambiables [meq/100 grs] : Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ y K⁺
- ? Capacidad de Intercambio Catiónico [meq/100 grs]
- ? pH
- ? Conductividad Eléctrica del extracto de saturación [mmhos/cm]
- ? Porcentaje de carbonatos

Para poder utilizar la correlación presentada por SHERARD et.al (1975) presentada en el Capítulo 2 (Figura N° 2.27), es necesario analizar el agua de poro del suelo (extracto de saturación) y calcular el Total de Sales Disueltas (TDS) y el Porcentaje de Sodio (%Na).

Como los resultados del I.N.T.A. no arrojan directamente estos valores, fue necesario transformarlos utilizando correlaciones existentes. Se utilizó el siguiente procedimiento :

1. Calcular el Total de Sales Disueltas (TDS) en el extracto de saturación a partir de la Conductividad Eléctrica (CE) del mismo. En la Figura N° 5.3 se presentan algunos resultados de ensayos encontrados en la literatura y la correlación indicada por HAYWARD et.al (1973). La poca dispersión de los resultados indican una alta confiabilidad en el uso de la correlación, la cual obedece a la expresión :

$$TDS = 10^{1.093501946 \cdot \log(CE)} \quad (9)$$

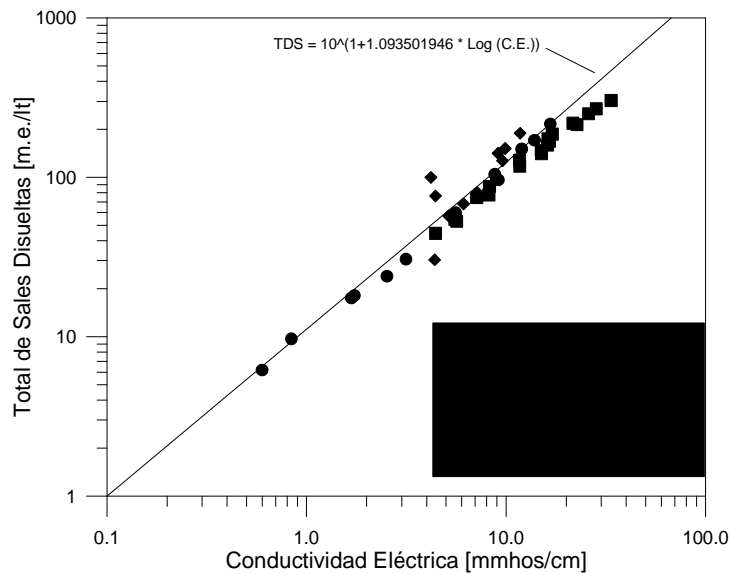
con :

TDS : en meq/lt

CE : en mmhos/cm

Figura N° 5.3

Correlación entre TDS y C.E. en el extracto de saturación



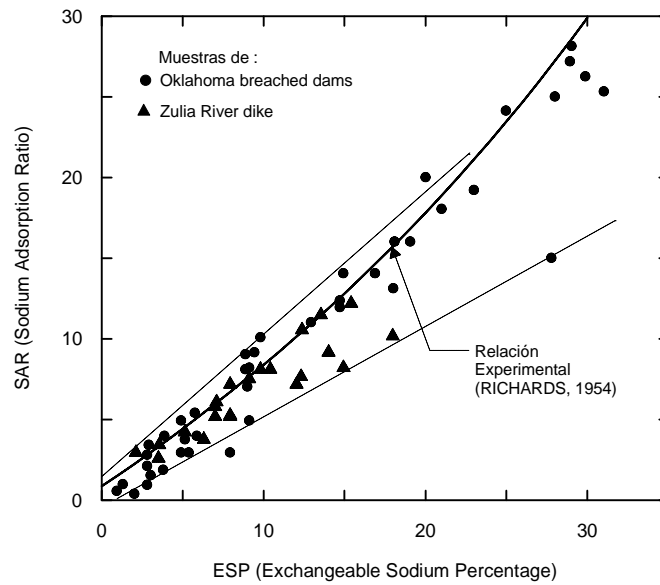
2. Con los datos del I.N.T.A. se calcula el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) como la cantidad de sodio intercambiable (Na^+) dividido la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) :

$$ESP = \frac{\text{Na}^+}{\text{CIC}} * 100 \quad (10)$$

3. Se calcula la Relación de Adsorción de Sodio (SAR) empleando la correlación con el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) presentada en el Capítulo 2 y graficada nuevamente en la Figura N° 5.4. La misma obedece a la expresión :

$$SAR = \frac{\frac{ESP}{100} * 0.0126 * 0.0126}{0.01475 * \left(1 + \frac{ESP}{100}\right)} \quad (11)$$

Figura N° 5.4
Correlación entre ESP y SAR.



4. Se calcula el porcentaje de sodio con respecto al total de sales disueltas (%Na), a partir del siguiente análisis :

Por definición :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (12)$$

Ahora, también por definición el Total de Sales Disueltas es :

$$TDS = Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+ \quad (13)$$

Sin embargo como la cantidad de potasio (K^+) es despreciable **en el extracto de saturación del suelo**, la expresión anterior puede reducirse a :

$$TDS = Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ \quad (14)$$

$$Ca^{2+} + Mg^{2+} + TDS + Na^+ \quad (15)$$

reemplazando en (12) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{TDS + Na^+}{2}}} \quad (16)$$

despejando, la cantidad de Na⁺ resulta :

$$Na^+ = \frac{0.5 * SAR^2 + \sqrt{0.5 * SAR^2 + 4 * 0.5 * SAR^2 * TDS}}{2} \quad (17)$$

finalmente, el %Na se calcula como :

$$\% Na = \frac{Na^+}{TDS} \quad (18)$$

Así es posible calcular, para cada muestra analizada, el porcentaje de sodio (%Na) y el Total de Sales Disueltas (TDS). Los valores obtenidos en base a los datos del Cuadro N° A.V.1 del Anexo V, se presentan en la Cuadro N° 5.4, y están graficados en la Figura N° 5.5 indicando con puntos blancos y negros las muestras dispersivas y no dispersivas respectivamente en el ensayo Pinhole. Se señalan además los límites propuestos por Sherard et.al (1975) como así también líneas para valores de ESP de 2 y 5.

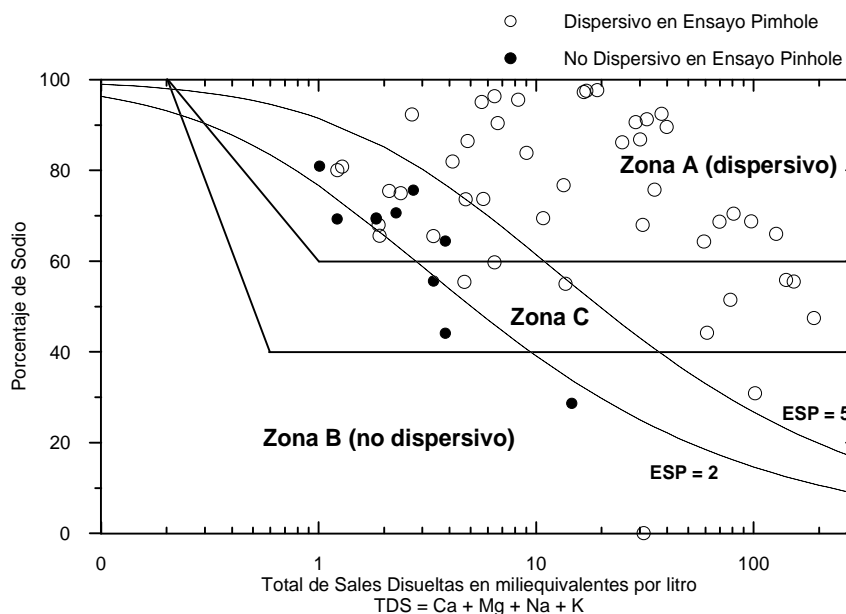
Como puede observarse, la mayoría de los suelos que clasificaron como No Dispersivos en el ensayo Pinhole se ubican en zona de suelos dispersivos o de transición según la clasificación presentada por SHERARD, et.al (1975), lo que indica ambigüedades al definir si un suelo es o no dispersivo.

Cuadro N° 5.4

Propiedades químicas y características dispersivas de las muestras

Muestra N°	Ubicación	Características Dispersivas	ESP	SAR	TDS meq/lt	% Na
1	Canal - Perfil N° 1	D1	10.1	8	2.68	92
2	Canal - Perfil N° 1	D2	14.5	11	6.66	90
3	Canal - Perfil N° 1	D2	19.8	14	5.62	95
4	Canal - Perfil N° 1	D2	25.2	18	6.43	96
5	Canal - Perfil N° 2	D2	3.1	3	1.28	81
6	Canal - Perfil N° 2	ND4	3.2	3	3.83	64
7	Canal - Perfil N° 2	D2	3	3	3.37	65
8	Canal - Perfil N° 3	D1	6.9	6	4.13	82
9	Canal - Perfil N° 3	D1	9.5	7	4.85	86
10	Canal - Perfil N° 3	D2	25.8	18	8.26	96
11	Canal - Perfil N° 3	D2	22.8	16	24.98	86
12	Canal - Perfil N° 4	D1	5.2	4	4.75	74
13	Canal - Perfil N° 4	D1	31.8	22	28.79	91
14	Canal - Perfil N° 4	D2	41.8	29	37.88	92
15	Canal - Perfil N° 5	D2	7.4	6	10.79	69
16	Canal - Perfil N° 5	D2	26.1	19	30.11	87
17	Canal - Perfil N° 5	D2	35.3	25	32.4	91
18	Canal - Perfil N° 5	D2	35.3	25	39.96	90
19	Canal - Perfil N° 6	D1	5.9	5	5.72	74
20	Canal - Perfil N° 6	D1	5.1	4	13.66	55
21	Canal - Perfil N° 7	D2	2.2	2	1.89	68
22	Canal - Perfil N° 7	D2	2.5	3	4.69	55
23	Canal - Perfil N° 7	D2	2	2	1.91	65
24	Canal - Perfil N° 8	D2	3.7	3	6.44	60
25	Canal - Perfil N° 8	D2	3.3	3	2.11	75
26	Canal - Perfil N° 8	D2	3.6	3	2.39	75
27	Canal - Perfil N° 9	D2	2.9	3	1.22	80
28	Canal - Perfil N° 9	ND4	2.8	3	2.27	71
29	Canal - Perfil N° 9	ND1	2.3	2	1.84	69
30	Canal - Perfil N° 9	ND3	1.6	2	1.22	69
31	Canal - Perfil N° 10	ND1	2.6	3	1.01	81
32	Canal - Perfil N° 10	ND1	2.3	2	1.84	69
33	Canal - Perfil N° 10	ND1	4	4	2.73	76
34	Canal - Perfil N° 11	ND2	1.9	2	3.38	56
35	Canal - Perfil N° 11	ND1	1.4	2	14.64	29
36	Canal - Perfil N° 11	ND1	1.1	2	3.83	44
37	Canal - Perfil N° 12	D1	20.9	15	153.48	55.5
38	Canal - Perfil N° 12	D2	19.4	14	141.57	55.8
39	Canal - Perfil N° 12	D2	9.1	7	61.2	44.1
40	Canal - Perfil N° 13	D2	17.9	13	189.67	47.5
41	Canal - Perfil N° 13	D2	25.3	18	127.32	66
42	Canal - Perfil N° 13	D2	23.8	17	97.57	68.7
43	Defensas Rcia.	D1	11.8	9	9.03	84
44	Defensas Rcia.	D1	10.9	8	13.38	77
45	Defensas Rcia.	D2	23.8	17	81.12	70.4
46	Defensas Rcia.	D2	6.1	5	101.68	30.8
47	Defensas Rcia.	D1	17.7	13	35.07	76
48	Defensas Rcia.	D2	16.4	12	59.24	64.3
49	Defensas Rcia.	D1	13.5	10	78.39	51.4
50	Defensas Rcia.	D1	12.7	9	30.97	68
51	Defensas Rcia.	D2	20.9	15	69.94	68.6
52	Defensas Las Palmas	D1	52	36	17.04	98
53	Defensas Las Palmas	D1	48.4	34	16.6	97
54	Defensas Las Palmas	D1	56.8	39	19.1	98

Figura N° 5.5
 Características dispersivas y sales disueltas en el agua de poro.
 Resultados de ensayos.



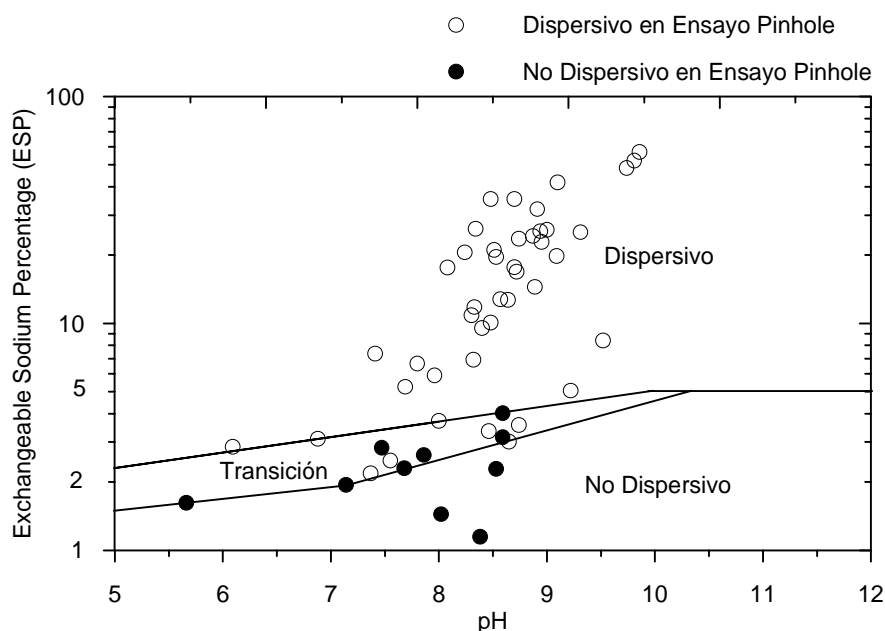
Los resultados anteriores llevaron a analizar otras correlaciones entre ensayos químicos y características dispersivas. Cuando se grafican los resultados empleando el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) y el pH del suelo, los sectores parecen estar mejor definidos, según se observan en la Figura N° 5.6. En la misma se observan los sectores definidos como suelos dispersivos, no dispersivos y una zona de transición definida en un entorno de ESP variando entre 2 y 5. Estos resultados son semejantes a los indicados por MITCHELL (1993), quien sugiere considerar a los suelos como no dispersivos cuando el valor del ESP es menor a 2. La correlación presentada en la Figura N° 5.6 es una primera aproximación, considerándose que los límites quedarían mejor definidos con mayor volumen de datos.

Lo observado en las Figuras N° 5.5 y 5.6 puede ser explicado si consideramos la correlación que existe entre el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) y la relación de adsorción de sodio (SAR) presentada en la Figura N° 5.4. Como se mencionó anteriormente, la dispersión se produce por una descompensación eléctrica de la partícula de arcilla. Así, el porcentaje de sodio intercambiable (ESP)

debería ser un indicador más representativo que los análisis químicos del agua de poro, reflejados a través de la relación de adsorción de sodio (SAR). La literatura internacional optó por utilizar el SAR, por ser de más fácil determinación, y porque existe la correlación con el ESP, ilustrada en la Figura N° 5.4. Sin embargo, si se considera al ESP como parámetro representativo, y se adopta la clasificación propuesta en la Figura N° 5.6, los límites de las zonas estarían definidos en un entorno de variación del ESP entre 2 y 5.

Figura N° 5.6

Correlación entre ESP y pH con características dispersivas.



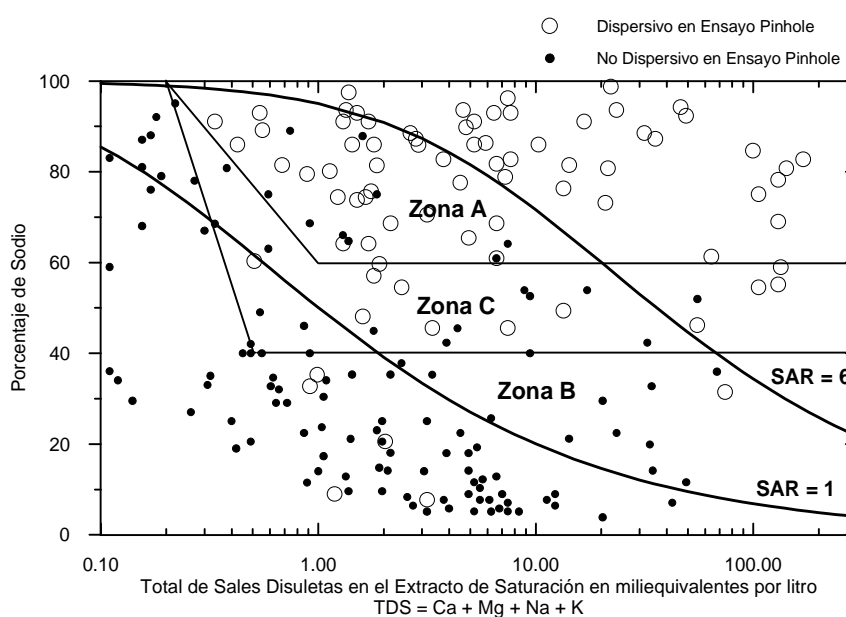
Ahora, cuando el ESP es igual a 2, el SAR asume un valor de 2.24 según la correlación de RICHARDS (1954) dada en Figura N° 5.4. Pero por la dispersión propia de la correlación, el SAR podría asumir un valor inferior de 1 y uno superior de 4 (líneas de trazo en Figura N° 5.4). De la misma manera, para un valor de ESP igual a 5, el SAR según la correlación asumiría un valor de 4.42, pero por la dispersión de la correlación es posible encontrar valores de SAR entre 2 y 6.

Por lo tanto, **debido a la dispersión en la correlación**, si se tienen datos de cationes del agua de poro, el sector de transición se ampliaría a valores de SAR

entre 1 y 6. Para comprobar esta hipótesis, se graficaron sobre el universo de ensayos presentados por SHERARD et.al (1975) curvas correspondientes a valores de SAR de 1 y 6 (Figura N? 5.7). Se puede observar que el sector limitado por ambas curvas refleja en forma más coherente la transición entre muestras dispersivas y no dispersivas.

Figura N? 5.7

Relación de las características dispersivas con las sales disueltas en el agua de poro, según líneas de igual SAR



Esto conduce a pensar que si la literatura internacional hubiera empleado ensayos químicos para estimar directamente el valor de ESP, tal vez la transición del universo de ensayos, presentado por SHERARD et.al (1975), sería mas estrecha y mejor definida. En la Figura N? 5.5 se ha intentado dar una idea gráfica de cómo se reduciría esta transición. A tal efecto se graficaron líneas de trazos para valores de ESP de 2 y 5 . Las mismas, según RICHARDS (1954), corresponden a valores de SAR de 2.24, y 4.42 respectivamente.

Por lo tanto, se concluye que la realización de análisis químicos para determinar directamente el parámetro ESP, reduciría la incertidumbre al definir el

comportamiento dispersivo de un suelo en función de sus características químicas. Debido a que este parámetro es calculado en los estudios de suelos con fines agrícolas en cada ambiente geomorfológico, es posible emplear las cartas de suelos ya elaboradas para establecer los locales de posible ocurrencia de suelos dispersivos.

Sin embargo, y como ya ha sido explicado, existen otras variables que pueden influir en el comportamiento del suelo frente al fenómeno de la dispersión. Por lo tanto el procedimiento aquí sugerido intenta ser una guía para establecer sectores dispersivos en cartas de suelos, pero de ninguna manera pretende sustituir al ensayo Pinhole.

5.4. Estabilizaciones con Cal

Con el objetivo de evaluar las propiedades de la cal como mejorador, se consideró adicionar tal material en algunas muestras de suelo altamente dispersivas (D1 según Anexo I) extraídas del canal de derivación del río Negro al río Salado, de las defensas del Gran Resistencia y de las defensas de Las Palmas.

Para determinar la cantidad de cal óptima se prepararon muestras con cantidades crecientes de este material y se realizaron ensayos pinhole sobre las mismas, estableciéndose como porcentaje óptimo aquel que transformaba a las muestras en no dispersivas. Los porcentajes de cal utilizados fueron de 1, 2, 3 y 4 % del peso seco, y las muestras fueron ensayadas luego de un día de curado. Los resultados obtenidos indican que con 2 % de cal el suelo se comportaba como no dispersivo (ND1 según Anexo I) y en algunos casos fue necesario solo 1 % de cal.

Si bien en el Anexo I se explica en detalle la manera en que se efectúa la clasificación del suelo en dispersivo o no dispersivo, resulta oportuno mencionar el comportamiento de muestras que en el ensayo pinhole clasifican como D1 y ND1 para visualizar el efecto de la cal sobre el suelo. La clasificación D1 se refiere a una muestra donde el agua destilada del ensayo Pinhole provoca una erosión que agranda el orificio efectuado de 1 mm a más de 2 mm de diámetro durante 5 minutos de

ensayo y con una carga hidráulica de solo 5 cm (en algunos casos se han observado diámetros superiores a 5 mm). El agua que atraviesa la muestra es completamente turbia por la presencia de coloides en suspensión. La clasificación ND1 se refiere a una muestra donde el agua destilada del ensayo Pinhole no provoca ninguna erosión para una carga hidráulica de 102 cm, resultando en un diámetro final igual al inicial (1 mm) y el agua que fluye a través de la muestra resulta completamente cristalina.

A efectos de utilizar cal como estabilizante en sectores de obras con problemas de erosión por la presencia de suelos dispersivos, es necesario considerar que los porcentajes óptimos de cal obtenidos en laboratorio probablemente no coincidan con los óptimos en campo debido a diferencias en la preparación de las muestras.

En laboratorio, la cal fue adicionada sobre muestras finamente divididas y luego se efectuó un mezclado hasta alcanzar una distribución bastante homogénea. Es posible que este resultado sea muy difícil de conseguir en campo, necesitándose probablemente cantidades mayores de cal. Una manera de evaluar la cantidad de cal a adicionar en obras reales es elaborando terraplenes de prueba con porcentajes de cal crecientes y observar el comportamiento del mismo frente al agua de lluvia a través de un monitoreo en el tiempo. También se podrían recoger al azar muestras de suelo inalteradas del terraplén y efectuar ensayos pinhole sobre las mismas.

Otra forma de disminuir el sodio intercambiable podría ser empleando el procedimiento usado por los agrónomos, que consiste en adicionar el estabilizante al agua de riego, incorporándose el mismo al suelo mediante filtración. En el caso de taludes podrían efectuarse surcos transversales que retarden el escurrimiento del agua volcada desde el coronamiento, permitiendo una mayor infiltración.

El procedimiento adecuado a cada caso obedecerá no sólo a consideraciones técnicas sino también a aquellas de carácter práctico y económico. En lugares donde resulte necesario proteger contra la erosión por dispersión extensas zonas, se propone efectuar pequeños sectores de prueba empleando distintos estabilizantes, a su vez utilizando técnicas diferentes para su incorporación al suelo y posteriormente realizar el seguimiento de su comportamiento en campo frente al agua

de lluvia. Este procedimiento no fue efectuado en este trabajo por restricciones de tiempo y presupuesto, quedando planteado como sugerencia para futuras investigaciones.

6. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN EN EL DEPARTAMENTO MAIPÚ

Con el objeto de ampliar la escala de análisis y evaluar la influencia de las propiedades químicas de los suelos en la formación de procesos de erosión, se consideró analizar el Departamento Maipú de la Provincia del Chaco, porque en el mismo existen cartas geomorfológicas que permiten detectar sectores degradados y a su vez, cartas edafológicas con las características químicas de los suelos.

6.1. Procesos de erosión en el Departamento Maipú

Las características geomorfológicas del departamento Maipú fueron analizadas por POPOLIZIO (1978), permitiendo identificar procesos de erosión típicamente pseudokársticos que se están generando en forma natural. Los mismos fueron descritos en el Capítulo 4 (Figura N° 4.15) y son señalados nuevamente en la Figura N° 6.1.

6.2. Cartas edafológicas del Departamento Maipú

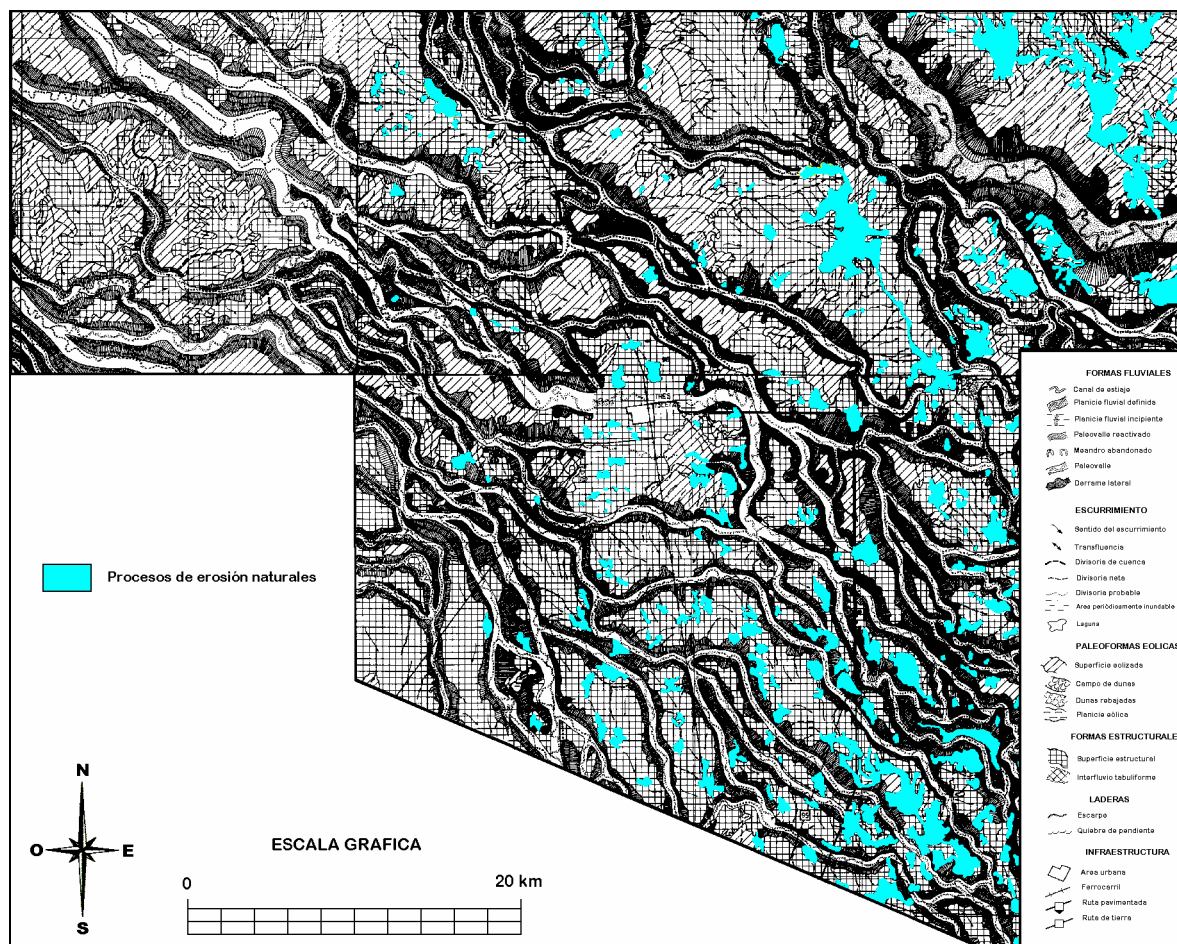
Para establecer los locales de posible ocurrencia de suelos dispersivos en el Departamento Maipú, se analizaron las cartas de suelos edafológicas elaboradas por el I.N.T.A., aplicándose la correlación entre las propiedades químicas de los suelos y sus características dispersivas propuesta en la Figura N° 5.4 del *Capítulo 5*.

Para aplicar tal correlación se estimaron, en cada serie de suelos del departamento, valores de porcentaje de sodio intercambiable (ESP) y de pH del perfil. Los mismos fueron calculados como el promedio de los valores de cada estrato de

suelo. El Cuadro N° 6.1 presenta los valores adoptados para cada una de las series y el resultado de aplicar la correlación propuesta puede observarse en la Figura N° 6.2.

Figura N° 6.1

Características geomorfológicas del Departamento Maipú. POPOLIZIO (1978)



Los sectores blancos de la Figura N° 6.2 corresponden a aquellas series de suelos que clasifican como no dispersivos según la Figura N° 5.4 del *Capítulo 5*. A efectos de simplificar el procesamiento digital de imágenes se agruparon las series que clasifican como dispersivas y en transición, las que fueron representadas en color rojo.

Probablemente lo correcto hubiera sido separar las series dispersivas de las que clasifican en transición y además analizar las características dispersivas de cada capa de suelo y no adoptar valores promedios de ESP y pH para un perfil. Esto último

permitiría analizar la influencia de la capa superficial y la evolución de la erosión hacia estratos inferiores, siendo necesario entonces generar figuras semejantes a la N° 6.2 para cada capa de suelo.

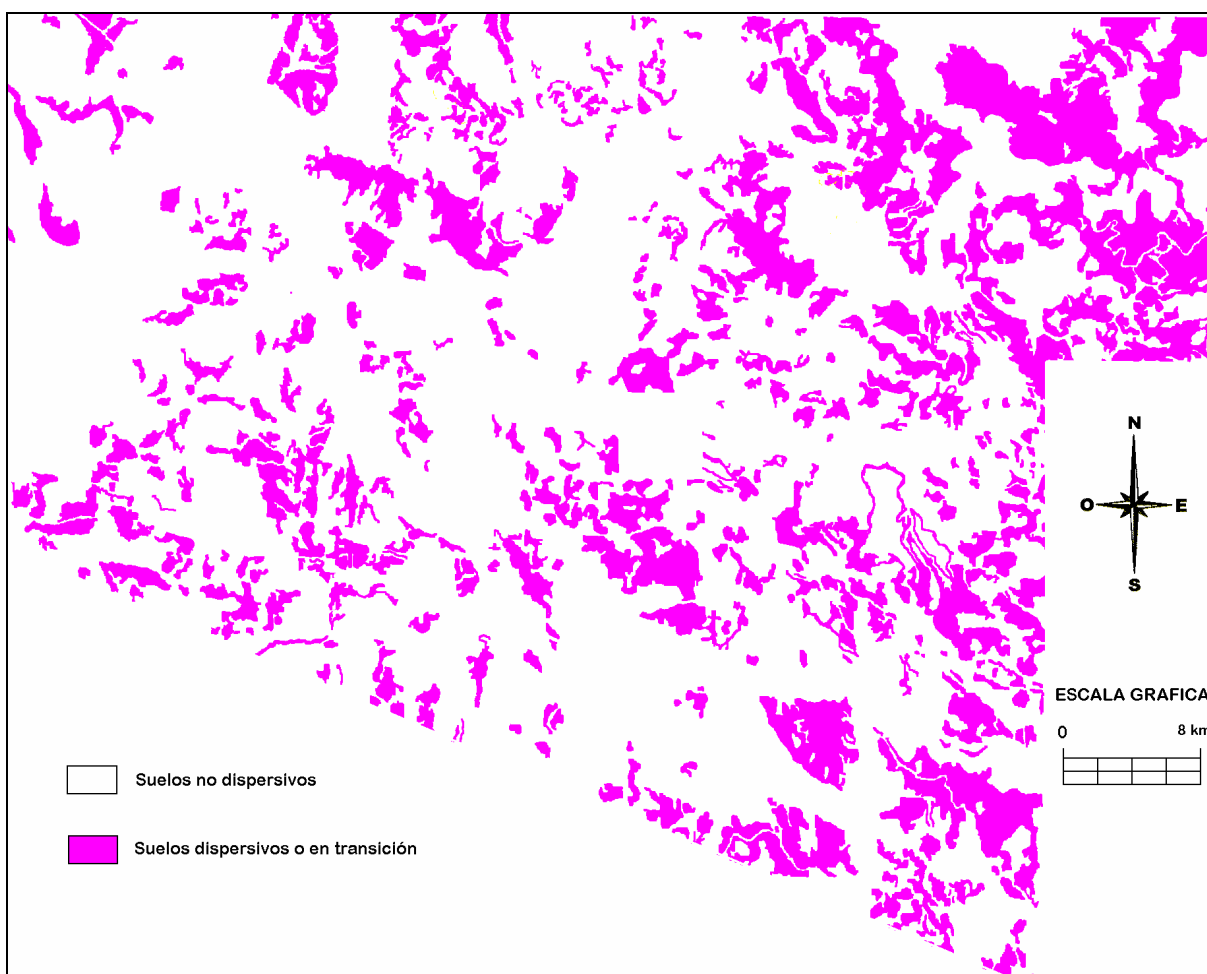
Sin embargo, el procedimiento para efectuar lo anterior es bastante laborioso porque para poder superponer las cartas geomorfológicas con las edafológicas es necesario efectuar un procesamiento digital de las mismas para corregir las diferencias de escalas y las distorsiones que dificultan su superposición (en este caso se empleó el programa IDRISI). Las limitaciones de tiempo del trabajo llevaron a las simplificaciones mencionadas, sugiriéndose para futuras investigaciones el procedimiento arriba descrito.

Cuadro N° 6.1

Propiedades químicas de las series de suelo del Departamento Maipú

Serie	Parámetros		Serie	Parámetros		Serie	Parámetros	
	ESP	pH		ESP	pH		ESP	pH
Aborigen	5.6	7.06	Güemes	7.7	7.30	Paraisal	1.5	6.18
Alelai	2.7	6.80	Hornos	1.7	5.93	Paz	2.5	6.57
Avia Terai	2.3	6.85	Independencia	12.3	7.40	Redel	9.5	6.75
Bajo Hondo Chico	16.2	7.66	Iporá Guazú	4.1	6.74	Sevilla	2.9	6.77
Bajo Hondo Grande	2.1	6.35	Julián	2.1	6.03	Silencio	3.3	6.08
Biegum	3.6	6.22	Laglaive	10.0	6.40	Tacural	2.2	6.08
Caba	2.2	6.42	Límite	3.7	7.23	Tizón	10.5	7.73
Castelli	3.5	7.08	Machagay	2.5	6.30	Tolosa	3.2	7.45
Chaco	2.7	6.88	Matanza	1.9	7.15	Tres Isletas	2.2	6.02
Chile	1.6	6.36	Napalpí	77.6	7.52	Urraca	2.9	6.38
Delfina	1.9	6.70	Novoa	4.2	6.80	Vargas	3.7	7.03
Feldman	10.7	7.47	Ñaró	2.1	6.37	Vélez	2.1	6.44
Flecha	2.4	7.07	Obraje	3.8	6.80	Vieja	2.9	6.25
Florida	12.3	7.00	Palenque	1.4	6.93	Zanatta	2.3	7.05
Golondrina	7.8	6.00	Pampa Mapache	S/D	7.02	Zaparinqui	1.7	6.40

Figura N° 6.2
Características dispersivas de los suelos del Departamento Maipú



6.3. Análisis de la correlación sugerida

Con el objeto de evaluar la correlación sugerida en el *Capítulo 5*, se efectuó la superposición de la carta geomorfológica (Figura N° 6.1) y los sectores clasificados según sus características dispersivas (Figura N° 6.2). A efectos de poder obtener una mejor apreciación de detalles, se amplió la escala de representación dividiendo al departamento en dos sectores. Los resultados obtenidos se indican en las Figuras N° 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6. En las dos últimas se han indicado solamente los procesos de erosión y los sectores clasificados según la correlación mencionada.

El análisis de estas figuras permite extraer algunas conclusiones. En primer término, si observamos las Figuras N° 6.5 y 6.6 es posible concluir que un alto porcentaje de sectores con procesos de erosión corresponden a suelos no dispersivos pero que limitan y/o están asociados a sectores de suelos que clasifican como dispersivos o en transición. Parecería que el proceso de erosión se inicia en estos últimos sectores, siendo removido el suelo dispersivo y quedando el material resistente a la erosión. Sin embargo, la existencia de suelos que clasifican como dispersivos o en transición no necesariamente implica la existencia de procesos de erosión, como se observa fundamentalmente en la Figura N° 6.5. Esto indica, que además del factor químico, existen otros que condicionan a estos procesos como podrían ser la vegetación, la pendiente natural del suelo, su estructura, entre otros; lo que convierte al problema en un sistema multivariable.

En este caso, no se ha podido encontrar una correlación con el tipo de vegetación, pero se estima que la pendiente natural puede ser un factor, que asociado a la presencia de suelos dispersivos, influye en la generación de procesos de erosión.

Lo anterior se deduce al observar la mayor densidad de fenómenos pseudokársticos presentes al Este del Departamento (Figura N° 6.4) por la posible existencia de una mayor pendiente natural que acelera el escurrimiento del agua en sentido SE. El quiebre de pendiente comienza a la altura de la localidad de Tres Isletas y es coincidente con las líneas de fallas con dirección SO-NE mencionadas por POPOLIZIO (1980).

Observando las Figuras N° 6.3 y 6.4 es posible concluir también que gran parte de los valles y paleovalles de cursos de agua poseen suelos que tampoco son dispersivos, tal vez por la composición granulométrica de los mismos y además, si existieran suelos dispersivos, los mismos ya habrían sido removidos por la acción del agua encauzada.

En el caso de los derrames laterales, un alto porcentaje tampoco presenta características dispersivas, aunque en los sectores que clasifican como tales existen a menudo procesos de erosión.

Finalmente, los fenómenos pseudokársticos más significativos se desarrollan sobre paleoformas eólicas y superficies estructurales que tienen asociados sectores con suelos dispersivos.

Las observaciones antes mencionadas pueden resultar de suma utilidad para seleccionar yacimientos de suelos o proyectar trazas de canales. En el primer caso, si no se cuentan con cartas edafológicas que permitan identificar sectores no dispersivos, una primera aproximación sería escoger lugares donde las fotografías aéreas indican que se han generado procesos de erosión naturales. En el caso de canales de escurrimiento, los mismos deberían diseñarse por los sectores donde el agua tiende a escurrir naturalmente, minimizándose de esta manera los problemas de erosión de taludes, con la consecuente reducción de costos de mantenimiento.

De todas formas, estos procedimientos intentan ser una guía para establecer preliminarmente las características dispersivas de los suelos en base a cartas ya elaboradas y a fotografías aéreas, pero de ninguna manera sustituyen al ensayo Pinhole, debiéndose ejecutar el mismo para determinar la aptitud del material para su utilización en obras de ingeniería.

Figura N° 6.3
 Superposición de cartas geomorfológicas y características dispersivas
 Sector Oeste del Departamento Maipú

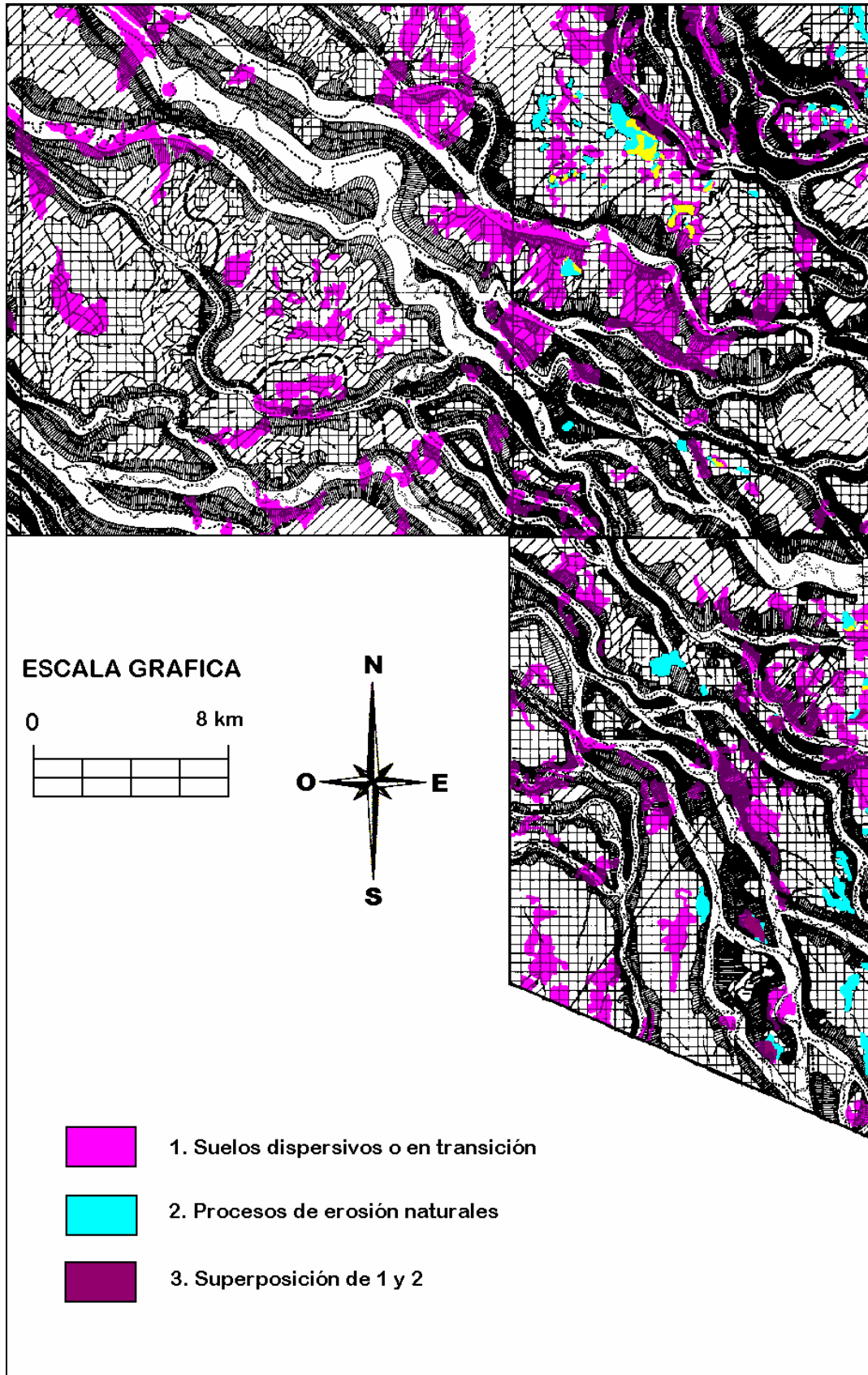


Figura N° 6.4
Superposición de cartas geomorfológicas y características dispersivas
Sector Este del Departamento Maipú

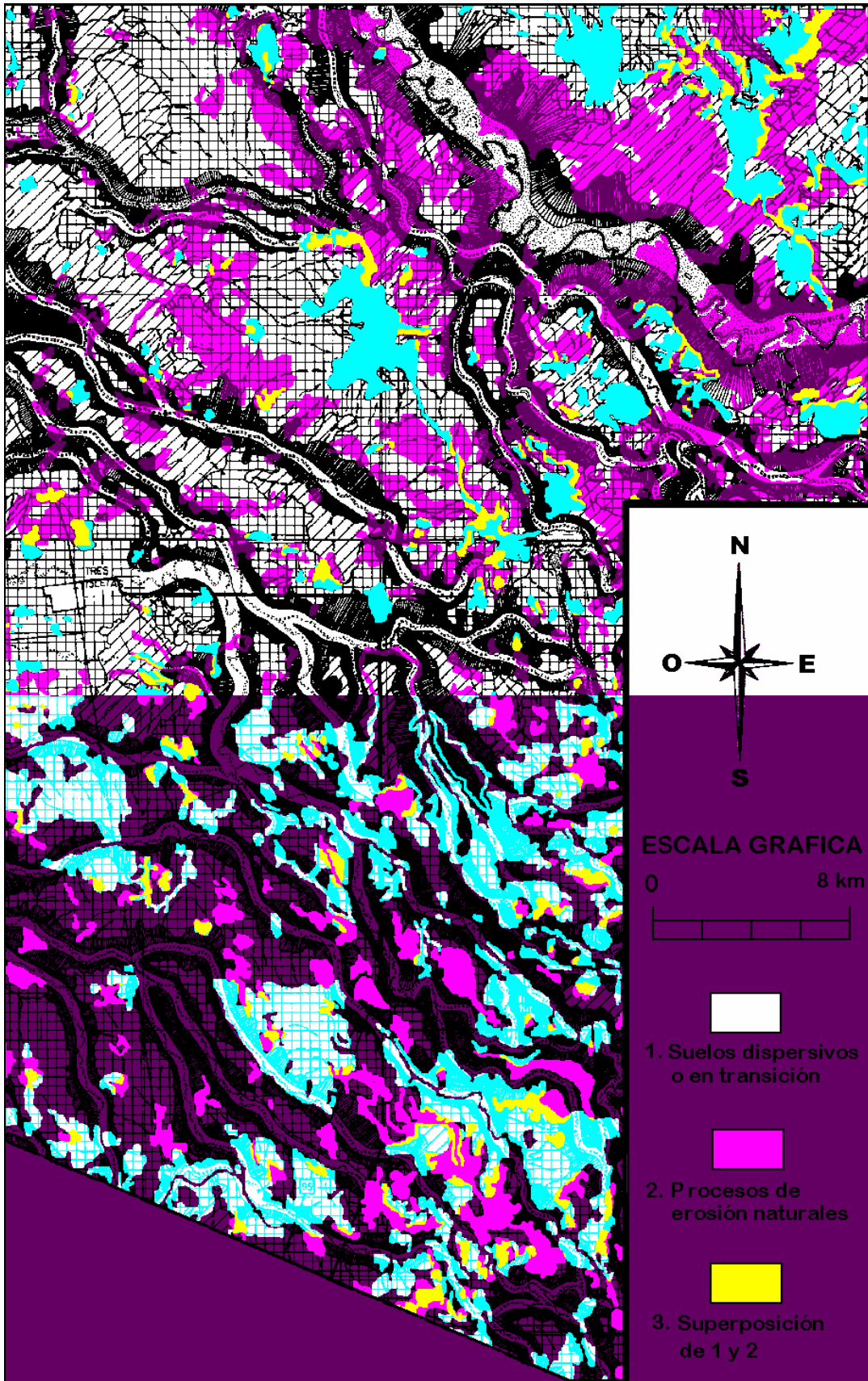


Figura N° 6.5
Procesos de erosión y características dispersivas de los suelos
Sector Oeste del Departamento Maipú

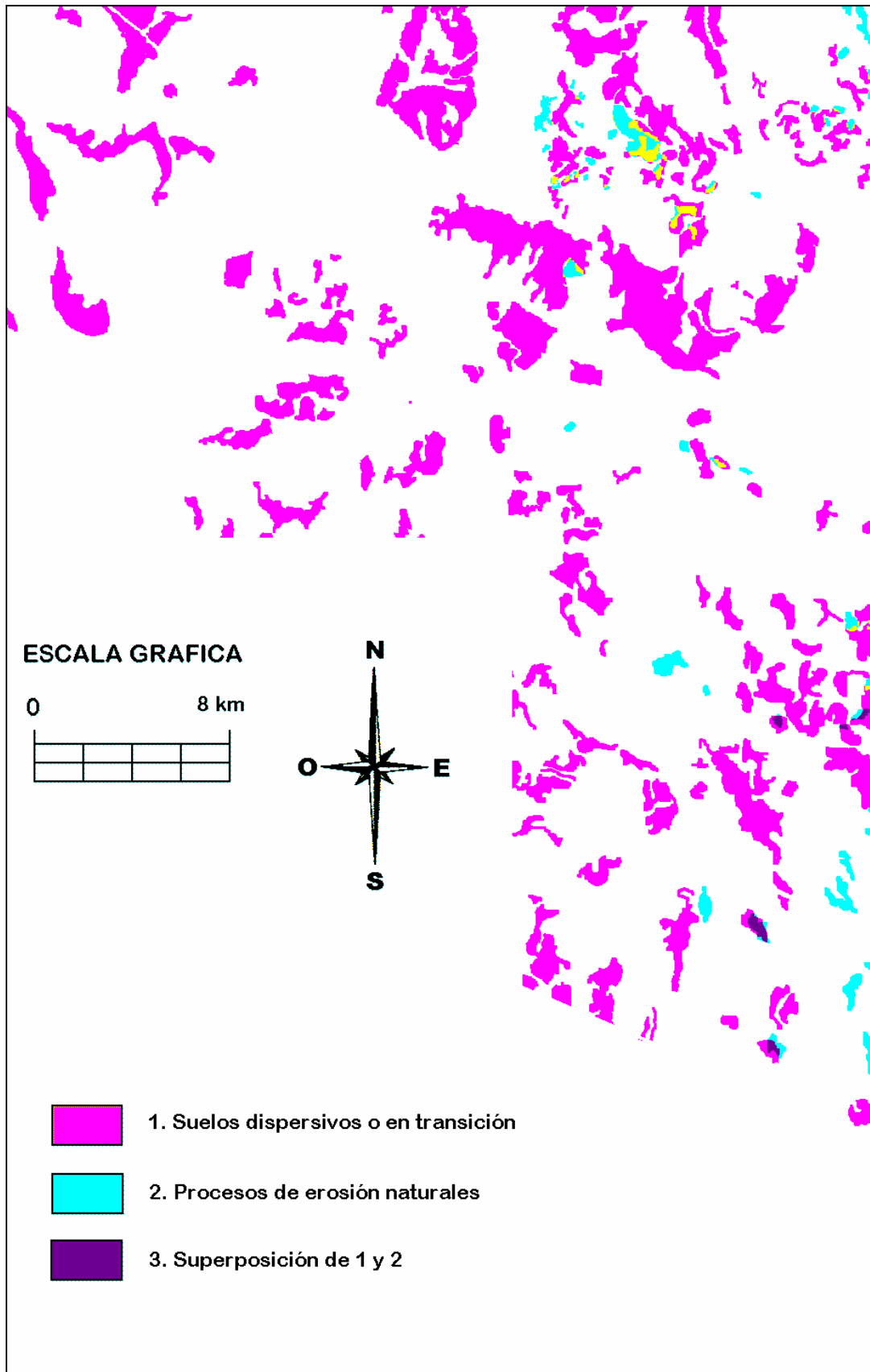
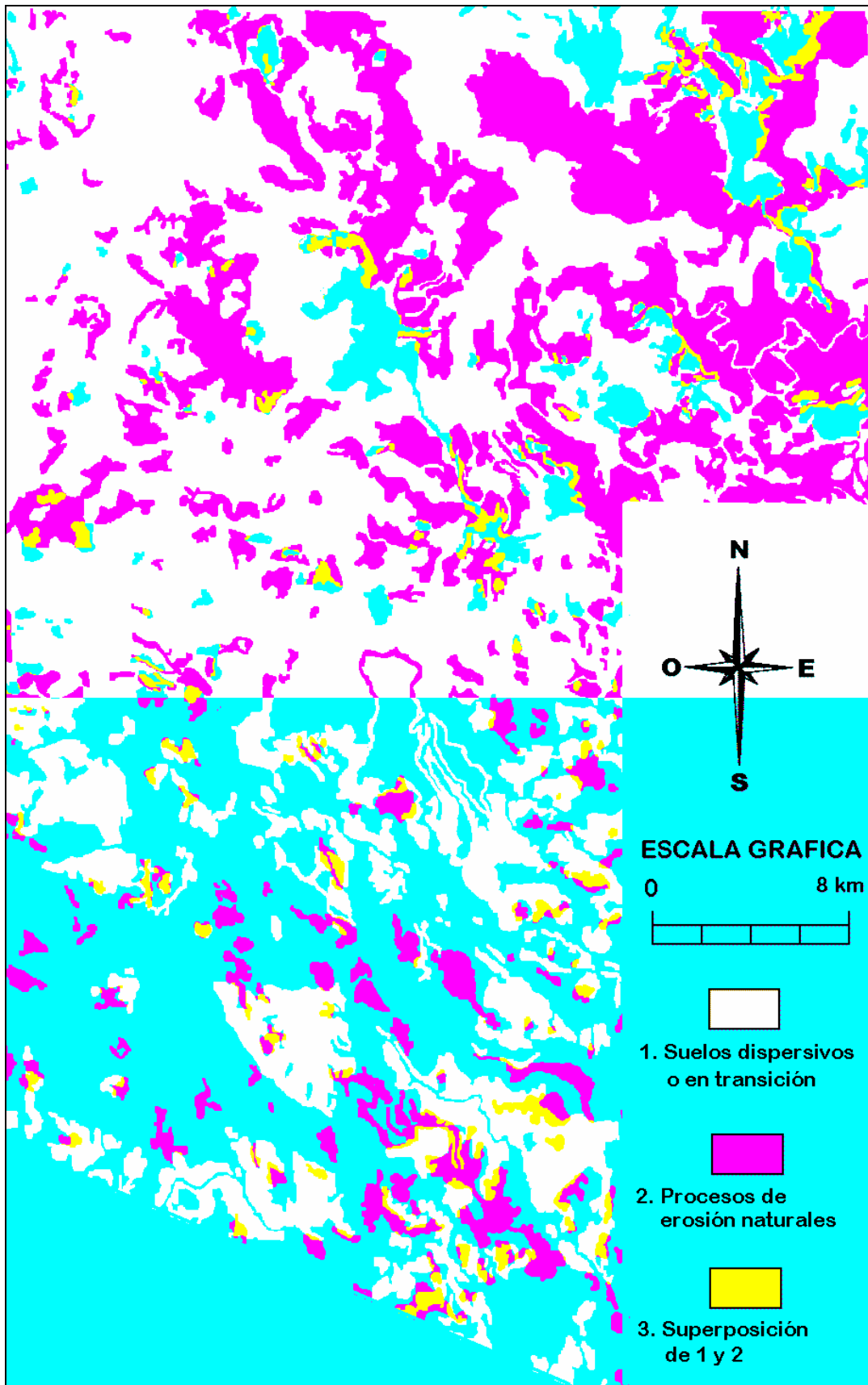


Figura N° 6.6
Procesos de erosión y características dispersivas de los suelos
Sector Este del Departamento Maipú



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BOURDEAUX, G; IMAIZUMI, H. Dispersive Clay at Sobradinho Dam. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 13-24.
- COLE, B.A.; RATANASEN, C.; MAIKLAD, P.; LIGGINS, T.B.; CHIRAPUNTU, S. Dispersive Clay in Irrigation Dams in Thailand. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 25-41.
- DASCAL, O.; HURTUBISE, J. Chemical Treatment of a Sensitive, Cemented Clay (ChamplainClay). Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 69-73.
- FORSYTHE, P. Experiencies in Identification and Treatment of Dispersive Clays in Mississippi Dams. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 135-155.
- GHUMAN, O.S.; ALLEN, R.L.; Mc NEILL, R.L. Erosion, Corrective Maintenance, and Dispersive Clays. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 172-190.
- HAYWARD, H.E. et.al. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Departamento de Agricultura de U.S.A. Editorial Limusa. 1973. 172 pp.
- HEAD, K.H. Manual of Soil Laboratory Testing. Vol.2. Chapter : Erodibility Test. pp. 458-468. 1981.
- HEINZEN, R.T.; ARULANANDAN, K. Factors Influencing Dispersive Clays and Methods of Identification. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 202-217.
- HOLMGREN, G.; FLANAGAN, C. Factors Affecting Spontaneous Dispersion of Soil Materials as Evidenced by the Crumb Test. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 218-239.

- I.N.T.A. Carta de Suelos de la República Argentina. Provincia del Chaco. Los suelos del Departamento Maipú. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1980.
- LAMBE, W. ; WHITMAN, R. Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Sons, Inc. 1979. 553 pp.
- MITCHELL, J.K. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, Inc. 1993. 437 pp.
- PHILLIPONNAT, G. Problemas routiers de lutte contre l'érosion en Zona Tropicale. Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Paris. 1970. pp. 2-19.
- POPOLIZIO, E. El pseudokarst y su importancia en los estudios hidrológicos del N.E.A. Centro de Geociencias Aplicadas. Serie C - Investigación N° 1. UNNE. 1975.
- POPOLIZIO, E. La importancia de los procesos pseudokársticos en la evolución de las redes fluviales de la llanura. GEOCIENCIAS VI. Centro de Geociencias Aplicadas. UNNE. 1976.
- POPOLIZIO, E. Fotointerpretación aplicada al estudio de la cuenca del río Negro - Provincia del Chaco. Centro de Geociencias Aplicadas. Serie C - Investigación. UNNE. 1978.
- POPOLIZIO, E. Bajos submeridionales - Grandes unidades taxonómicas de Sante Fé. Centro de Geociencias Aplicadas. Serie C - Investigación. UNNE. 1978.
- POPOLIZIO, E. Bajos submeridionales - Grandes unidades taxonómicas del Chaco. Centro de Geociencias Aplicadas. Serie C - Investigación. UNNE. 1980.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook N° 60. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 1954.
- RYKER, N. Encountering Dispersive Clays on Soil Conservation Service Projects in Oklahoma. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 370-389.
- RUIZ, C. Materiales para Caminos. Apunte de Curso de Posgrado. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. 1960.
- SHERARD, J.L.; DUNNINGAN, L.P.; DECKER, R.S. Some Engineering Problems with Dispersive Clays. Proceedings ... American Society for Testing and Materials. Publication N° 623, 1976, pp. 3-12.

SHERARD, J.L.; DUNNINGAN, L.P.; DECKER, R.S; STEELE, E. Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils. Proceedings ... American Society for Civil Engineers, Vol. 102. N? GT8, Aug. 1975.

ANEXO I

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PINHOLE

En este anexo se describen brevemente los principios, procedimientos y análisis de los resultados para el ensayo Pinhole, según HEAD (1981). Mayores detalles son dados por SHERARD et.al (1976).

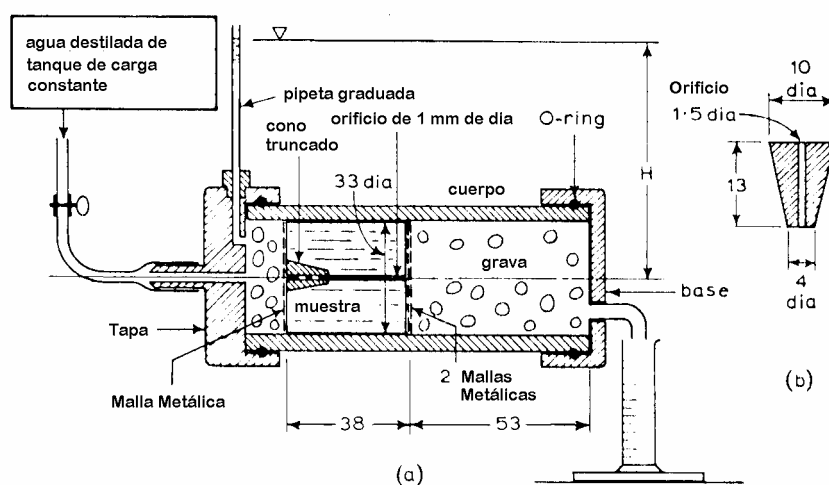
El principio del ensayo consiste en provocar un flujo de agua destilada a través de un orificio de 1 mm de diámetro efectuado en una muestra de suelo compactado. Cuando el suelo es dispersivo, el agua emergente de la muestra contiene partículas coloidales en suspensión. Si el suelo es resistente a la erosión por dispersión el agua es totalmente cristalina.

El aparato para el ensayo Pinhole está esquematizado en la Figura N° A.I.1 y está compuesto por :

- ? Cuerpo cilíndrico de plástico de 33 mm de diámetro interno y 101.6 mm de longitud
- ? Dos tapas extremas con sellos O-rings, conexiones para suministro de agua, para medir la carga hidráulica y para permitir la salida del agua.
- ? Tres mallas metálicas de 33 mm de diámetro y 1.18 mm de apertura.
- ? Cono plástico truncado de 12.7 mm de largo con un orificio de 1.5 mm de diámetro (Figura N° A.I.1.b)
- ? Aguja de 1 mm de diámetro y de aproximadamente 100 mm de longitud.
- ? Grava de aproximadamente 5 mm
- ? Depósito de agua destilada con posibilidad de aplicar carga hidráulica constante en un rango variable entre 50 mm y 1020 mm.
- ? Compactador Harvard Miniatura con resorte de 6.8 Kg. (15 lb).

- ? Cronómetro
- ? Zaranda de 2 mm de abertura de malla.
- ? Pipetas cilíndricas con graduaciones de 10 ml, 25 ml y 50 ml.
- ? Mangueras de conexión y medición de carga hidráulica

Figura N? A.I.1
Aparato para el ensayo Pinhole



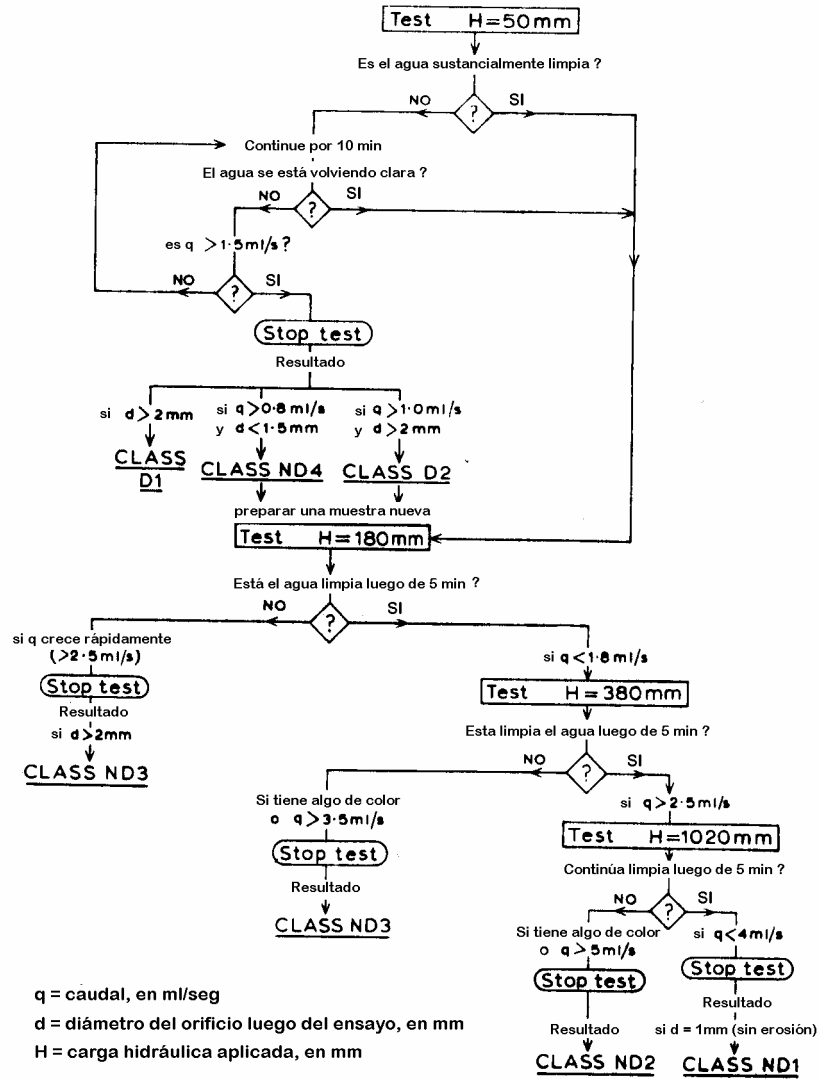
El ensayo se debe ejecutar sobre muestras de suelo con contenido de humedad natural sin dejarlas secar, según el siguiente procedimiento :

1. Determinar el contenido de humedad natural y los límites de Atterberg, usando una porción de suelo idéntica a la que se va a ensayar.
2. Remover todas las partículas mayores de 2 mm.
3. Llevar al suelo a una humedad cercana al límite plástico por secado gradual o adicionando agua destilada.
4. Posicionar el molde cilíndrico del aparato sobre su base, colocar grava en una longitud de 53 mm y luego dos mallas metálicas.
5. Compactar la muestra a ensayar dentro del cilindro en cinco capas, aplicando 16 impactos con el Compactador Harvard Miniatura en cada capa, hasta lograr una longitud total de 38 mm. Esta energía es equivalente al 95% del Proctor Normal.
6. Introducir el Cono Plástico Truncado en el centro de la parte superior de la muestra con presión del pulgar.

7. Realizar un orificio de 1 mm de diámetro con la aguja metálica, usando como guía el Cono Plástico Truncado.
8. Colocar una malla metálica sobre la muestra y llenar el espacio restante con grava.
9. Ajustar la tapa superior y colocar el aparato en posición horizontal.
10. Aplicar una carga hidráulica de 50 mm medido desde el eje central del aparato.
11. Dejar circular agua hasta lograr un flujo permanente durante unos pocos minutos. Observar y registrar el color del agua colectada en las pipetas graduadas. Si no hay flujo de agua desmontar el aparato, rehacer el orificio de 1 mm y retornar al ítem 8.
12. Medir el caudal observando el volumen de agua recogida y el tiempo transcurrido durante un período de 5 a 10 min. Observar y registrar el color o la claridad del agua y si existen partículas visibles. El Cuadro N° A.I.1 indica un modelo de planilla para efectuar los registros durante el ensayo.
13. La Figura N° A.I.2 indica un diagrama de flujo para la ejecución del ensayo pinhole. Luego de realizar el ensayo con carga hidráulica de 50 mm ingresar a este diagrama y evaluar si es necesario incrementar la misma a 180 mm, 380 mm y/o 1020 mm.
14. Cuando se completa el ensayo, desmontar el aparato y remover la muestra de suelo. Medir el diámetro resultante comparándolo con la aguja de 1 mm de diámetro y efectuar un esquema de la configuración del orificio con sus diámetros de entrada y salida.
15. Ingresar nuevamente al diagrama de Figura N° A.I.2 y clasificar al suelo. Los resultados del ensayo son evaluados según la apariencia del agua colectada, el caudal de salida de agua y el diámetro final del orificio. Los suelos son clasificados en Dispersivos (categorías D1 y D2) y No Dispersivos (categorías ND1 a ND4), según se indican en el Cuadro A.I.2. La principal diferencia entre suelos dispersivos y no dispersivos es obtenida de los resultados del ensayo con carga hidráulica de 50 mm.

Figura N? A.I.2

Diagrama de Flujo para ejecutar el ensayo pinhole



ANEXO II

MEJORADORES QUÍMICOS PARA SUSTITUCIÓN DEL SODIO INTERCAMBIABLE

A continuación se presentan los procedimientos elaborados por el Laboratorio de Salinidad de los E.U.A., para la rehabilitación de suelos salinos y sódicos con fines agrícolas, extraídos de HAYWARD et. al (1973).

El tipo y cantidad de mejorador químico que se va a aplicar a un suelo para sustituir el sodio intercambiable depende de las características propias del suelo, de la velocidad de sustitución deseada y de limitaciones económicas.

Los mejoradores químicos con fines agrícolas que se aplican en el suelo son de tres tipos, según se indican en el Cuadro N° A.II.1 :

Cuadro N° A.II.1

Mejoradores químicos con fines agrícolas para suelos sódicos

Mejoradores para suelos sódicos	Productos Químicos
Sales solubles de calcio	Cloruro de calcio Yeso
Ácidos o formadores de ácido	Azufre Ácido sulfúrico Sulfato de hierro Sulfato de aluminio Cal-azufre
Sales de calcio de baja solubilidad (puede contener magnesio también)	Roca caliza molida Subproductos de la cal usada en los ingenios azucareros

La efectividad de cada mejorador depende de varios factores, siendo los principales : el contenido de carbonatos de metales alcalino-térreos y el pH. Si se considera la respuesta de los suelos alcalinos a diferentes tipos de mejoradores se pueden establecer tres categorías :

1. Suelos que contienen carbonatos de metales alcalino-térreos
2. Suelos prácticamente libres de carbonatos metales alcalino-térreos y cuyo pH es mayor de 7.5.
3. Suelos prácticamente libres de carbonatos metales alcalino-térreos y cuyo pH es menor de 7.5.

Cualquiera de las sales solubles de calcio, los ácidos o los formadores de ácidos, se pueden usar para suelos del grupo 1, pero la aplicación de la caliza será de poca eficiencia. La aplicación de mejoradores ácidos o formadores de ácidos a suelos de los grupos 2 y 3 tiende a acidificar su reacción. Cuando la cantidad de mejorador ácido o formador de ácido es suficiente para volver muy ácido al suelo, la elección de mejoradores debe limitarse a las sales solubles de calcio. En general, la acidificación de los suelos en las regiones áridas hasta un pH de 6.0 ó 6.5, es benéfica para el desarrollo de las plantas.

Aun cuando la aplicación solamente de caliza a suelos de los grupos 2 y 3 será benéfica, la efectividad de la misma en distintos suelos es diferente, ya que la solubilidad del CaCO_3 con relación al pH varía sustancialmente, como se indica en el Cuadro N? A.II.2 :

Cuadro N? A.II.2
Solubilidad del CaCO_3 en relación al pH

pH de la solución saturada de carbonato de calcio	Solubilidad del CaCO_3 en me./lt
6.21	19.3
6.5	14.4
7.12	7.1
7.85	2.7
8.60	1.1
9.2	0.82
10.12	0.36

Según estos datos, la efectividad de la caliza como mejorador disminuye para pH mayores de 7.5 pero es notablemente efectiva a pH menores de 7.0. Por esta razón, la caliza puede usarse con ventajas en suelos del grupo 3, pero su eficacia en los suelos del grupo 2 es dudosa.

A.II.1. Reacciones químicas de varios mejoradores en suelos sódicos

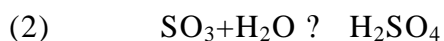
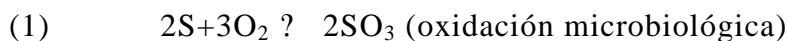
Las siguientes ecuaciones químicas ilustran la forma en que los diversos mejoradores químicos reaccionan en diferentes clases de suelos sódicos. En dichas ecuaciones, la X representa el complejo del intercambio de suelo.

Grupo 1 : Suelos que contienen carbonatos alcalino-térreos :

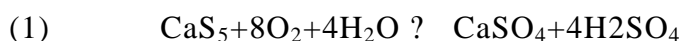
YESO :



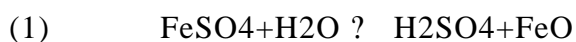
AZUFRE :



CAL-AZUFRE (polisulfuro de calcio) :



SULFATO DE HIERRO :



Grupo 2 : Suelos prácticamente libres de carbonatos metales alcalino-térreos y cuyo pH es mayor de 7.5.

YESO : igual que en el Grupo 1

AZUFRE : pasos (1) y (2) como en el Grupo 1.



CAL-AZUFRE : paso (1) como en el Grupo 1

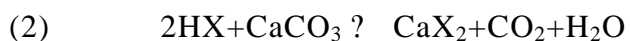


SULFATO DE HIERRO : paso (1) como en el Grupo 1



CALIZA : existen dos posibilidades





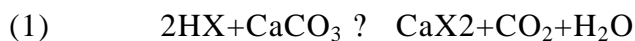
Grupo 3 : Suelos prácticamente libres de carbonatos metales alcalino-térreos y cuyo pH es menor de 7.5.

YESO : igual que en los Grupos 1 y 2

CAL-AZUFRE : Igual que en el Grupo 2

SULFATO DE HIERRO : Igual que en el Grupo 2

CALIZA : Igual que en el Grupo 2 y si el hidrógeno intercambiable está presente :



A.II.2. Cálculo de las cantidades de varios mejoradores químicos que se necesitan para la sustitución del sodio intercambiable

Las determinaciones del sodio intercambiable y de la capacidad de intercambio catiónico son guías muy valiosas para calcular la cantidad de mejoradores químicos que se requieren para reducir el porcentaje de sodio intercambiable de los suelos sódicos a los niveles que se señalan. Supongamos que una capa de 0 a 30 cm de suelo sódico contiene 4 meq de sodio intercambiable por cada 100 gr. y posee una capacidad de intercambio catiónico de 10 meq/100 gr. Por lo tanto, el porcentaje de sodio intercambiable es de 40%. Si se desea reducir este porcentaje hasta un 10%, será necesario reemplazar 3 meq de sodio intercambiable por cada 100 gr. de suelo. Si se supone una sustitución cuantitativa, será necesario aplicar el mejorador a razón de 3 meq/100 gr. de suelo. El Cuadro N° A.II.3 indica que se requieren 12.6 ton de yeso o 2.67 toneladas de azufre por hectárea para sustituir 3 meq/100gr de sodio intercambiable en una capa de 30 cm. de suelo.

Cuadro A.II.3

Cantidades de yeso y azufre necesarias para sustituir las cantidades indicadas de sodio intercambiable.

Sodio Intercambiable meg/100 gr. de suelo	Yeso ¹ (CaSO ₄ .2H ₂ O)		Azufre (S)	
	Ton/hectárea- 30 cm (²)	Ton/hectárea- 15 cm (³)	Ton/hectárea- 30 cm (²)	Ton/hectárea- 15 cm (³)
1	4.2	2.2	0.89	0.40
2	8.8	4.4	1.78	0.80
3	12.6	6.7	2.67	1.20
4	16.8	8.9	3.56	1.60
5	21.0	11.1	4.45	2.00
6	25.2	13.3	5.34	2.40
7	29.4	15.5	6.23	2.80
8	33.6	17.7	7.12	3.20
9	37.8	20.0	8.01	3.60
10	42.0	22.2	8.90	4.00

¹ Las cantidades de yeso se dan con aproximación de 0.10 ton.

² Una hectárea-30 cm de suelo pesa aproximadamente 4.000.000 kgs.

³ Una hectárea-15 cm de suelo pesa aproximadamente 2.000.000 kgs.

Considerando en el ejemplo que esos 30 cm por hectárea poseen en peso seco de aproximadamente 4.000.000 kg., el porcentaje de mejorador a aplicar resulta :

$$\% \text{ Yeso} = \frac{12.600 \text{ kg}}{4.000.000 \text{ kg}} * 100 = 0.315 \%$$

$$\% \text{ Azufre} = \frac{2.670 \text{ kg}}{4.000.000 \text{ kg}} * 100 = 0.07 \%$$

Si se quiere emplear otro tipo de mejoradores, la información complementaria que se indica en el Cuadro A.II.4 ayuda a convertir las toneladas de azufre necesarias según el Cuadro A.II.3, en toneladas de otro mejorador.

Cuadro N? A.II.4

Equivalencias entre mejoradores

Mejorador	Toneladas equivalentes a 1 ton de azufre
Azufre	1.00
Solución de polisulfuro de calcio con 24 % de azufre	4.17
Ácido sulfúrico	3.06
Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	5.38
Sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	8.69
Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)	6.94
Caliza (CaCO_3)	3.13

El desarrollo de las reacciones mencionadas depende de la interacción de diversos factores, tales como las diferencias en las energías de sustitución del calcio y del sodio, el porcentaje de sodio intercambiable y la concentración catiónica total de la solución del suelo. Para el caso general, donde se aplica una cantidad de yeso equivalente a la cantidad de sodio intercambiable que hay en la capa superficial de 15 a 30 cm de suelo, se ha determinado que cuando el porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 25 %, el 90 % o más del calcio aplicado en el mejorador reemplaza al sodio intercambiable a medida que el suelo es lavado. Pero si el porcentaje de sodio intercambiable disminuye a un 10 %, solo el 50 % del calcio

agregado reemplaza al sodio. De manera general, HAYWARD et. al (1973) sugieren que la relación de aplicación del yeso y de azufre indicada en el Cuadro N? A.II.3 sea multiplicada por el factor 1.25 para compensar la falta de sustitución cuantitativa.

A.II.3. Velocidad de la reacción de los mejoradores químicos, consideraciones económicas y formas de aplicación

La selección de un mejorador químico puede estar determinada por el tiempo que requiere su reacción en el suelo. En general, los mejoradores mas baratos actúan mas lentamente.

Debido a su solubilidad en el agua, el cloruro de calcio es probablemente la fuente mas eficaz de calcio soluble, pero raramente se usa debido a su costo elevado. El ácido sulfúrico y los sulfatos de hierro y aluminio que se hidrolizan fácilmente en el suelo para formar ácido sulfúrico, son de reacción rápida. El ácido sulfúrico es lo suficientemente barato para su aplicación en el campo, pues los sulfatos de hierro y aluminio no son económicamente recomendables. Por su costo relativamente bajo, el yeso y el azufre son los mejoradores mas comúnmente usados para rehabilitación de suelos. El grado de reacción del yeso para sustituir al sodio está limitado únicamente por su solubilidad en el agua, la cual es cerca de 0.25 por ciento a temperaturas ordinarias.

Como ya fue mencionado, la solubilidad de la caliza aplicada a los suelos sódicos, está notablemente influenciada por el pH y por la presencia de hidrógeno intercambiable. A menos que el suelo sea marcadamente ácido, la reacción química de la caliza es lenta.

El grado de fineza de las partículas del mejorador es también un factor importante que afecta la velocidad de reacción de la caliza, el yeso y el azufre al aplicarse al suelo. Cuanto mas fino sea, mas rápida será la reacción.

Los mejoradores químicos como el yeso, el azufre o la caliza se aplican normalmente “al voleo” y luego se incorporan al suelo con discos o arado. Otra forma de aplicarlos es a través del agua de riego.

ANEXO III

PERFILES DE SUELO DEL CANAL DE DERIVACIÓN DEL RIO NEGRO AL RIO SALADO

Cuadro N° A.III.1

Perfil N° 1. Progresiva +400. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 1

Ubicación : Progresiva +400

Fecha : 04/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre # 200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones					
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat									
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																												
	0.00	0.30							Gris oscuro	Sí	X					X	X																			Suelo Orgánico
1	0.30	1.00							Marrón claro	No	X					X	X							X	42.7	19.8	22.9	11.7	99	CL	A-7-6 (24)					
2	1.00	1.50							Marrón oscuro	No		X			X	X								X	62.8	20.7	42.1	16.2	94	CH	A-7-6 (44)				Concreciones calcáreas	
3	1.50	2.75							Marrón pardo	No		X			X	X							X	63.1	20.4	42.7	15.9	94	CH	A-7-6 (45)				Concreciones calcáreas		
4	2.75	3.25							Marrón pardo	No		X			X	X							X	76.6	20.3	56.3	16.7	94	CH	A-7-6 (59)				Concreciones verdosas		

Cuadro N° A.III.2

Perfil N° 2. Progresiva +900. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 2

Ubicación : Progresiva +900

Fecha : 04/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre # 200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones						
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat										
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																													
	0.00	0.25							Gris	No	X					X	X																				Suelo Orgánico
5	0.25	0.60							Gris oscuro	No	X			X	X							X	53.2	22.6	30.6	14.3	94	CH	A-7-6 (28)					Suelo Orgánico			
	0.60	1.10							gris pardo	No	X			X	X						X																
6	1.10	2.25							marrón	No	X			X	X						X	54.5	19.7	34.8	17.6	92	CH	A-7-6 (34)						Concreciones calcáreas blancas			
7	2.25	2.75							verde pardo	No	X			X	X						X	57.4	21.3	36.1	20.1	94	CH	A-7-6 (38)									
	2.75	3.20							marrón	No	X			X	X						X															Concreciones verdosas	

Cuadro N° A.III.3

Perfil N° 3. Progresiva +1650. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 3

Ubicación : Progresiva +1650

Fecha : 07/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre # 200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones	
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat					
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																								
8	0.00	0.40							Gris oscuro	Sí		X				X	X							X	52.4	24.2	28.2	16.3	95	CH	A-7-6 (30)	Suelo Orgánico
9	0.40	1.20							Gris claro	No	X			X	X						X	51.5	21.8	29.7	15.9	94	CH	A-7-6 (31)	Estructura muy abierta			
10	1.20	1.75							Marrón claro	No	X			X	X						X	61.7	20.2	41.5	14.9	94	CH	A-7-6 (43)	Concreciones calcáreas			
	1.75	2.00							Marrón pardo	No	X			X	X						X											
11	2.00	3.00							Marrón pardo	No	X			X	X						X	65.5	19.9	45.6	14.9	88	CH	A-7-6 (43)	Concreciones calcáreas			

Cuadro N° A.III.4

Perfil N° 4. Progresiva +2050. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 4

Ubicación : Progresiva +2050

Fecha : 07/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre # 200 %	Clasificación S.U.C.S.	Clasificación H.R.B.	Observaciones	
			Angularidad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat					
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																								
12	0.00	0.30							Gris oscuro	Sí		X				X	X							X	49.1	21.8	27.3	15	95	CL	A-7-6 (28)	Suelo Orgánico
13	0.30	1.75							Gris claro	No	X			X	X								X	63.7	20.1	43.6	16.1	88	CH	A-7-6 (41)	Estructura muy abierta	
14	1.75	2.50							Marrón grisáceo	No	X		X	X							X	73.9	19.2	54.7	15.9	88	CH	A-7-6 (42)	Estr. abierta c/concr.calcáreas			
	2.50	3.10							Pardo verdoso	No	X		X	X							X									Concreciones verdosas		

Cuadro N° A.III.6

Perfil N° 6. Progresiva +4650. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 6

Ubicación : Progresiva +4650

Fecha : 08/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat				
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																							
19	0.00	0.60							Gris oscuro	No	X			X			X						X	44.8	21	23.8	11.7	96	CL	A-7-6 (24)	Estructura abierta
20	0.60	2.90							Marrón claro	No		X		X			X						X	60.7	22.9	37.8	16.9	96	CH	A-7-6 (41)	Estructura abierta
	2.90	3.10							Verdo pardo	No		X		X		X							X								Suelo verde arcilloso

Cuadro N° A.III.7

Perfil N° 7. Progresiva +5400. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 7

Ubicación : Progresiva +5400

Fecha : 09/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasificación S.U.C.S.	Clasificación H.R.B.	Observaciones	
			Angularidad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat					
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																								
21	0.00	0.60							Negro	Sí		X			X		X							X	60.8	22.3	38.5	8	97	CH	A-7-6 (33)	Suelo Orgánico
22	0.60	2.70							Verde amarillento	No	X			X		X							X	46.9	19.9	27	20.1	96	CL	A-7-6 (27)	Mat. originario de Estruct. abierta	
23	2.70	3.20							Verde pardo	No	X			X		X							X	57.1	20.7	36.4	20.6	96	CH	A-7-6 (30)	Arcilla pesada	

Cuadro N° A.III.8

Perfil N° 8. Progresiva +5900. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 8

Ubicación : Progresiva +5900

Fecha : 09/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasificación S.U.C.S.	Clasificación H.R.B.	Observaciones		
			Angularidad			Forma					seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat						
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																									
24	0.00	0.70							Negro	Sí		X					X	X							X	67.3	23.1	44.2	16	94	CH	A-7-6 (47)	Suelo Orgánico
25	0.70	1.50							Gris verdoso	No		X			X	X									X	62.8	22.4	40.4	17.7	95	CH	A-7-6 (44)	
26	1.50	3.00							Marrón pardo	No		X			X	X									X	56.2	20.8	35.4	20.6	97	CH	A-7-6 (38)	Concreciones calcáreas

Cuadro N° A.III.9

Perfil N° 9. Progresiva +6250. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 9

Ubicación : Progresiva +6250

Fecha : 10/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat				
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																							
27	0.00	0.50							Negro	Sí		X			X								X	56.4	20.8	35.6	16.2	94	CH	A-7-6 (37)	Suelo Orgánico
28	0.50	0.80							Verde oscuro	No	X				X								X	68.4	21.5	46.9	17.2	93	CH	A-7-6 (49)	
29	0.80	1.40							Pardo verdoso	No	X				X								X	64.9	20.6	44.3	17.9	84	CH	A-7-6 (40)	Concreciones calcáreas
30	1.40	3.00							Pardo	No	X				X								X	58.5	21.3	37.2	20.7	97	CH	A-7-6 (41)	

Cuadro N° A.III.10

Perfil N° 10. Progresiva +7050. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 10

Ubicación : Progresiva +7050

Fecha : 10/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat				
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																							
31	0.00	0.70							Negro	Sí		X			X	X					X	55.1	21.1	34	19	96	CH	A-7-6 (36)	Suelo Orgánico		
32	0.70	1.80							Marrón	No	X			X	X						X	53.4	19.4	34	16.8	96	CH	A-7-6 (36)	Concreciones calcáreas		
	1.80	2.00							Verde pardo	No	X			X	X						X								Arcilla verde c/concrec.calcáreas		
33	2.00	3.00							Pardo	No	X			X	X						X	55.9	19.8	36.1	18.4	97	CH	A-7-6 (39)	Concreciones calcáreas		

Cuadro N° A.III.11

Perfil N° 11. Progresiva +7850. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 11

Ubicación : Progresiva +7850

Fecha : 11/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones		
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat						
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																									
34	0.00	0.70							Negro	Si		X			X	X					X					53.7	19.8	33.9	16.7	97	CH	A-7-6 (36)	Suelo Orgánico
35	0.70	1.60							Pardo blancuzco	No	X			X	X						X					53	18.9	34.1	19.1	93	CH	A-7-6 (34)	Muchas concrec.calcáreas finas
36	1.60	3.00							Pardo	No	X			X	X						X					56.2	20.6	35.6	23.2	96	CH	A-7-6 (37)	Sin concreciones calcáreas

Cuadro N° A.III.12

Perfil N° 12. Progresiva +8400. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 12

Ubicación : Progresiva +8400

Fecha : 11/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones				
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat								
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																											
	0.00	0.30							Negro	Sí	X			X			X																		Suelo Orgánico
37	0.30	0.80							Gris claro		X			X			X						X	57.8	19.5	38.3	18.7	92	CH	A-7-6 (39)					
38	0.80	2.10							Pardo c/blanco	No	X			X			X						X	55.5	16.2	39.3	17.7	90	CH	A-7-6 (37)			Concreciones calcáreas finas		
39	2.10	3.10							Pardo	No	X			X			X						X	87.3	17.9	69.4	19.6	86	CH	A-7-6 (64)			Sin concreciones calcáreas		

Cuadro N° A.III.13

Perfil N° 13. Progresiva +8850. Canal de Derivación.

Obra : Canal de Derivación del río Negro al río Salado

Perfil N° 13

Ubicación : Progresiva +8850

Fecha : 14/08/1996

Tipo de Perforación : Barreno Manual

Muestra N°	Prof. Inicial [m]	Prof. Final [m]	Suelos Arenosos						Color	Olor	Humedad			Consistencia			Cementación			Estructura				Propiedades Indices				Lavado sobre #200 %	Clasifi- cación S.U.C.S.	Clasifi- cación H.R.B.	Observaciones
			Angulari- dad		Forma						seco	parcial// saturado	saturado	blando	firme	duro	débil	moderada	fuerte	estratificada	fisurada	bloques	homogénea	LL	LP	IP	Wnat				
			angular	subangular	subredondeado	redondeado	aplanado	alargado																							
40	0.00	0.80							Gris oscuro	Sí		X			X	X					X	60.4	19.3	41.1	19.4	94	CH	A-7-6 (30)	Suelo Orgánico		
	0.80	1.50							Pardo oscuro	No	X			X	X						X										
41	1.50	2.80							Pardo	No	X			X	X						X	57	17.1	39.9	21.4	93	CH	A-7-6 (42)	Concreciones calcáreas		
42	2.80	3.10							Verdo oscuro	No		X		X	X						X	67.4	18.1	49.3	24.6	90	CH	A-7-6 (47)			

ANEXO IV**RESULTADOS DE ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA Y
DOBLE SEDINTOMETRÍA**

ANEXO V

**PROPIEDADES QUÍMICAS DE LAS MUESTRAS
ANALIZADAS**

Cuadro N° A.V.1
Propiedades químicas de las muestras colectadas

Muestra N°	Ubicación	pH	Cationes Intercambiables				Capacidad de Intercam. Catiónico m.eq./100gr	Conduct. Eléctrica Ext.Sat mmhos/cm	% Carbonatos	Iones Solubles en el Extracto de Saturación						
			Ca m.eq./100gr	Mg m.eq./100gr	Na m.eq./100gr	K m.eq./100gr				Ca m.e./lt	Mg m.e./lt	Na m.e./lt	K m.e./lt	Carbonatos m.e./lt		
1	Canal - Perfil N° 1	8.48	12.667	4.293	1.61	0.327	15.99	0.3	0.85							
2	Canal - Perfil N° 1	8.89			2.52	0.474	17.42	0.69								
3	Canal - Perfil N° 1	9.09			3.224	0.533	16.28	0.59							1.19	
4	Canal - Perfil N° 1	9.31			4.252	0.514	16.85	0.668							2.72	
5	Canal - Perfil N° 2	6.88	16.62	3.017	0.672	0.379	21.71	0.153								
6	Canal - Perfil N° 2	8.59			0.63	0.753	19.99	0.416							1.98	
7	Canal - Perfil N° 2	8.65			0.67	0.808	22.28	0.37							2.03	
8	Canal - Perfil N° 3	8.32	20.085	4.293	1.48	0.293	21.42	0.445								
9	Canal - Perfil N° 3	8.4			14.84	4.752	2.04	0.33							21.42	0.516
10	Canal - Perfil N° 3	9			4.56	0.39	17.68	0.84	1.68							
11	Canal - Perfil N° 3	8.95			5.28	0.34	23.12	2.31							3.92	
12	Canal - Perfil N° 4	7.69			17.208	5.401	1.16	0.27							22.1	0.506
13	Canal - Perfil N° 4	8.91			5.52	0.43	17.34	2.63	2.18							
14	Canal - Perfil N° 4	9.1			7.44	0.45	17.82	3.38							2.75	
15	Canal - Perfil N° 5	7.41	14.789	6.596	1.4	0.209	19.04	1.072								
16	Canal - Perfil N° 5	8.34			3.72	0.47	14.28	2.74							1.45	
17	Canal - Perfil N° 5	8.48			5.76	0.539	16.32	2.93							2.72	
18	Canal - Perfil N° 5	8.7			6.24	0.514	17.68	3.55							2.76	
19	Canal - Perfil N° 6	7.96			1.187	0.51	20.15	0.6	0.6							
20	Canal - Perfil N° 6	9.22			0.9	0.79	17.81	1.33							1.01	
21	Canal - Perfil N° 7	7.37	13.233	5.333	0.42	0.36	19.24	0.218								
22	Canal - Perfil N° 7	7.55			12.957	5.463	0.4	0.66							16.12	0.5
23	Canal - Perfil N° 7	8.19			0.32	0.77	16.38	0.22							1.36	
24	Canal - Perfil N° 8	8	19.76	6.136	0.77	0.551	20.71	0.669								
25	Canal - Perfil N° 8	8.46			0.588	0.817	17.57	0.241							0.768	
26	Canal - Perfil N° 8	8.74			0.672	0.955	18.85	0.27							1.19	

Cuadro N° A.V.1.
Propiedades químicas de las muestras colectadas. Continuación.

Muestra N°	Ubicación	pH	Cationes Intercambiables				Capacidad de Intercam. Catiónico m.eq./100gr	Conduct. Eléctrica Ext.Sat mmhos/cm	% Carbonatos	Iones Solubles en el Extracto de Saturación				
			Ca m.eq./100gr	Mg m.eq./100gr	Na m.eq./100gr	K m.eq./100gr				Ca m.e./lt	Mg m.e./lt	Na m.e./lt	K m.e./lt	Carbonatos m.e./lt
27	Canal - Perfil N° 9	6.09	14.934	5.021	0.55	0.24	19.24	0.146						
28	Canal - Perfil N° 9	7.47			0.53	0.49	18.72	0.258	0.43					
29	Canal - Perfil N° 9	7.68			0.43	0.54	18.72	0.213	1.69					
30	Canal - Perfil N° 9	5.66			0.29	0.62	17.94	0.146	1.52					
31	Canal - Perfil N° 10	7.86	19.683	5.893	0.56	0.22	21.32	0.123						
32	Canal - Perfil N° 10	8.53			0.37	0.39	16.25	0.213	0.76					
33	Canal - Perfil N° 10	8.59			0.796	0.45	19.8	0.305	0.82					
34	Canal - Perfil N° 11	7.14	17.749	2.72	0.432	0.257	22.27	0.371						
35	Canal - Perfil N° 11	8.02			0.297	0.42	20.62	1.417	5.88					
36	Canal - Perfil N° 11	8.38			0.227	0.44	19.8	0.416	2.29					
37	Canal - Perfil N° 12	8.24					21.94	9.9	9.9	48.6	17.8	85.12	1.96	6.2
38	Canal - Perfil N° 12	8.53					20	9.12	0.43	52.2	10.2	79	0.17	3.8
39	Canal - Perfil N° 12	9.52					24.42	2.913	3.81	26.4	7.6	27	0.2	3.5
40	Canal - Perfil N° 13	8.08					20.95	11.76		56.4	42.6	90	0.67	6.7
41	Canal - Perfil N° 13	8.94					17.82	9.607	0.28	33.2	9.8	84	0.32	3.8
42	Canal - Perfil N° 13	8.87					21.45	8.943	0.56	28	2	67	0.57	3.6
43	Defensas Resistencia	8.33	15.525	3.897	2.3	0.4	19.5	0.911						
44	Defensas Resistencia	8.3	14.946	3.406	1.87	0.396	17.22	1.305						
45	Defensas Resistencia	8.74					12.55	7.188		21	2	57.12	1	5.7
46	Defensas Resistencia	7.8					27.83	4.207		58.6	9.8	31.36	1.92	5.9
47	Defensas Resistencia	8.7	21.735	4.536	3.217	0.293	18.19	3.15						
48	Defensas Resistencia	8.72					17.06	5.152		16.6	2.6	38.08	1.96	6.8
49	Defensas Resistencia	8.57					14.97	4.432		32.6	3.4	40.32	2.07	4.35
50	Defensas Resistencia	8.64	26.735	7.455	2.632	0.44	20.76	2.812						
51	Defensas Resistencia	8.51					22.05	6.131		18	2.1	48	1.84	4
52	Defensas Las Palmas	9.81	13.26	3.057	8.59	0.54	16.51	1.628						
53	Defensas Las Palmas	9.74	13.788	1.996	8.3	0.66	17.15	1.59						
54	Defensas Las Palmas	9.86	17.104	1.355	8.19	0.47	14.42	1.807						

LISTA DE FIGURAS

Figura N? 2.1: Modelos Seudokársticos Aerolares. POPOLIZIO (1975).....	6
Figura N? 2.2: Procesos de interconexión de modelos areolares. POPOLIZIO (1975).....	6
Figura N? 2.3: Procesos de erosión que interconectan modelos areolares. POPOLIZIO (1975).....	7
Figura N? 2.4: Transfluencia de aguas de una cuenca a otra. POPOLIZIO (1975).....	7
Figura N? 2.5: Modelos seudokársticos en terraplenes de caminos. POPOLIZIO (1975).....	8
Figura N? 2.6: Conductos de erosión en el coronamiento del talud. POPOLIZIO (1975).....	9
Figura N? 2.7: Evolución de procesos seudokársticos en taludes. POPOLIZIO (1975).....	9
Figura N? 2.8: Modelo seudokárstico avanzado con placa vertical separada. POPOLIZIO (1975).....	10
Figura N? 2.9: Evolución a cárcavas de gran extensión. POPOLIZIO (1975)	10
Figura N? 2.10: Erosión en perfiles homogéneos. PHILLIPONNAT (1970)	11
Figura N? 2.11: Erosión en perfiles homogéneos. PHILLIPONNAT (1970)	12
Figura N? 2.12: Erosión en perfiles no homogéneos. PHILLIPONNAT (1970)	12
Figura N? 2.13: Representación de átomos de sodio y cloro. RUIZ (1960).....	14
Figura N? 2.14: Representación de una molécula de agua. RUIZ (1960)	15
Figura N? 2.15: Representación de una molécula dipolar	15
Figura N? 2.16: Catió n sodio con su esfera de solvatación. RUIZ (1960).....	16
Figura N? 2.17: Estructuras básicas de los silicatos. LAMBE & WITHMAN (1979).....	17
Figura N? 2.18: Estructura ideal de la caolinita. LAMBE & WITHMAN (1979)	18
Figura N? 2.19: Comparación de tamaños de partículas. LAMBE & WITHMAN (1979).....	20

Figura N? 2.20: Disposición del ion sodio en la partícula de arcilla. LAMBE & WITHMAN (1979).....	20
Figura N? 2.21: Partículas de arcillas completamente hidratadas. LAMBE & WITHMAN (1979).....	21
Figura N? 2.22: Representación tridimensional de iones adsorbidos. LAMBE & WITHMAN (1979).....	22
Figura N? 2.23: Características de la doble capa. LAMBE & WITHMAN (1979).....	23
Figura N? 2.24: Intercambio catiónico entre sodio y calcio. LAMBE & WITHMAN (1979).....	23
Figura N? 2.25: Distribución de iones adyacentes a la partícula de arcilla de acuerdo al concepto de doble capa difusa. MITCHELL (1993).	26
Figura N? 2.26: Aparato para ensayo pinhole.....	28
Figura N? 2.27: Relación de las características dispersivas con las sales disueltas en el agua de poro. SHERARD et.al (1975)	30
Figura N? 2.28: Correlación entre ESP y SAR. MITCHELL (1993).....	31
Figura N? 4.1: Corte transversal del canal en progresiva +1600.....	41
Figura N? 4.2: Características geomorfológicas Canal Río Negro - Río Salado. POPOLIZIO (1978).....	42
Figura N? 4.3: Fotografías aéreas de la zona del canal de derivación.....	43
Figura N? 4.4: Erosiones entre progresivas 0000 - 1300.....	44
Figura N? 4.5: Erosiones entre progresivas 1300 - 2300.....	44
Figura N? 4.6: Procesos de erosión entre progresivas 2300 - 4500.....	45
Figura N? 4.7: “Alero” formado por capa orgánica resistente a la erosión.....	45
Figura N? 4.8: Talud del canal representativo entre progresivas 4500 - 8900	46
Figura N? 4.9: Perfil longitudinal del canal	47
Figura N? 4.10: Corte transversal del terraplén de defensas en la zona del riacho Barranqueras	48
Figura N? 4.11: Procesos de erosión en el terraplén de defensas del Gran Resistencia.....	48
Figura N? 4.12: Tubificaciones que ocasionaron el colapso de las defensas de Las Palmas.....	49

Figura N° 4.13: Procesos pseudokársticos en el terraplén de defensas de Las Palmas.....	50
Figura N° 4.14: Ubicación del Departamento Maipú.....	51
Figura N° 4.15: Características geomorfológicas del Departamento Maipú. POPOLIZIO (1978).....	52
Figura N° 5.1: Equipo para ensayo pinhole construido.....	56
Figura N° 5.2: Determinación del % θ en curvas granulométricas.....	58
Figura N° 5.3: Correlación entre TDS y C.E. en el extracto de saturación.....	63
Figura N° 5.4: Correlación entre ESP y SAR.....	64
Figura N° 5.5: Características dispersivas y sales disueltas en el agua de poro. Resultados de ensayos.....	67
Figura N° 5.6: Correlación entre ESP y pH con características dispersivas.....	68
Figura N° 5.7: Relación de las características dispersivas con las sales disueltas en el agua de poro, según líneas de igual SAR.....	69
Figura N° 6.1: Características geomorfológicas del Departamento Maipú. POPOLIZIO (1978).....	74
Figura N° 6.2: Características dispersivas de los suelos del Departamento Maipú.....	76
Figura N° 6.3: Superposición de cartas geomorfológicas y características dispersivas. Sector Oeste del Departamento Maipú.....	79
Figura N° 6.4: Superposición de cartas geomorfológicas y características dispersivas. Sector Este del Departamento Maipú.....	80
Figura N° 6.5: Procesos de erosión y características dispersivas de los suelos. Sector Oeste del Departamento Maipú.....	81
Figura N° 6.6: Procesos de erosión y características dispersivas de los suelos. Sector Este del Departamento Maipú.....	82
Figura N° A.I.1: Aparato para el ensayo Pinhole.....	89
Figura N° A.I.2: Diagrama de Flujo para ejecutar el ensayo pinhole.....	92

LISTA DE CUADROS

Cuadro N? 2.1:	Mejoradores químicos para suelos sódicos.....	34
Cuadro N? 4.1:	Progresivas de los perfiles de suelos efectuados.....	46
Cuadro N? 5.1:	Resultados de ensayos pinhole.....	57
Cuadro N? 5.2:	Comparación del método de Doble sedintometría con ensayos pinhole.....	60
Cuadro N? 5.3:	Perfil representativo de la Serie Bajo Hondo Grande. INTA (1980).....	61
Cuadro N? 5.4:	Propiedades químicas y características dispersivas de las muestras	66
Cuadro N? 6.1:	Propiedades químicas de las series de suelo del Departamento Maipú.....	75
Cuadro N? A.I.1:	Planilla para ensayos Pinhole	91
Cuadro N? A.I.2:	Clasificación de suelos a partir de datos de ensayos pinhole. SHERARD et. al (1976).....	91
Cuadro N? A.II.1:	Mejoradores químicos con fines agrícolas para suelos sódicos.	93
Cuadro N? A.II.2:	Solubilidad del CaCO_3 en relación al pH.....	94
Cuadro A.II.3:	Cantidades de yeso y azufre necesarias para sustituir las cantidades indicadas de sodio intercambiable	97
Cuadro N? A.II.4:	Equivalencias entre mejoradores.	98
Cuadro N? A.III.1:	Perfil N? 1. Progresiva +400. Canal de Derivación.....	102
Cuadro N? A.III.2:	Perfil N? 2. Progresiva +900. Canal de Derivación.....	103
Cuadro N? A.III.3:	Perfil N? 3. Progresiva +1650. Canal de Derivación.....	104
Cuadro N? A.III.4:	Perfil N? 4. Progresiva +2050.....	105
Cuadro N? A.III.5:	Perfil N? 5. Progresiva +3200. Canal de Derivación.....	106
Cuadro N? A.III.6:	Perfil N? 6. Progresiva +4650. Canal de Derivación.....	107
Cuadro N? A.III.7:	Perfil N? 7. Progresiva +5400. Canal de Derivación.....	108
Cuadro N? A.III.8:	Perfil N? 8. Progresiva +5900. Canal de Derivación.....	109
Cuadro N? A.III.9:	Perfil N? 9. Progresiva +6250. Canal de Derivación.....	110

Cuadro N? A.III.10: Perfil N? 10. Progresiva +7050. Canal de Derivación.....	111
Cuadro N? A.III.11: Perfil N? 11. Progresiva +7850. Canal de Derivación.....	112
Cuadro N? A.III.12: Perfil N? 12. Progresiva +8400. Canal de Derivación.....	113
Cuadro N? A.III.13: Perfil N? 13. Progresiva +8850. Canal de Derivación.....	114
Cuadro N? A.V.1: Propiedades químicas de las muestras colectadas.....	171

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

?	
A	: unidad Angstrom igual a 1×10^{-10} m
Al	: átomo de aluminio
C	: carbono
Ca	: átomo de calcio
CE	: conductividad eléctrica del extracto de saturación
CH	: arcilla de alta plasticidad según el Sistema Unificado de Suelos
CIC	: capacidad de intercambio catiónico
Cl	: átomo de cloro
CL	: arcilla de baja plasticidad según el Sistema Unificado de Suelos
cm	: centímetro
d	: diámetro del orificio de la muestra en el ensayo Pinhole
D1	: muestras dispersivas en el ensayo Pinhole
D2	: muestras dispersivas en el ensayo Pinhole
ESP	: exchange sodium percentage o porcentaje de sodio intercambiable
Fe	: átomo de hierro
gr	: gramo
H	: átomo de hidrógeno
H	: carga hidráulica aplicada en el ensayo Pinhole
I.G.M.	: Instituto Geográfico Militar
I.N.T.A.	: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IP	: índice plástico
K	: átomo de potasio
kg	: kilogramo
km	: kilómetro
LL	: límite líquido
LP	: límite plástico
m	: metro
meq	: miliequivalente
Mg	: átomo de magnesio
min	: minuto

ml	: mililitros
mm	: milímetro
N	: nitrógeno
Na	: átomo de sodio
ND1	: muestras no dispersivas en el ensayo Pinhole
ND2	: muestras no dispersivas en el ensayo Pinhole
ND3	: muestras no dispersivas en el ensayo Pinhole
ND4	: muestras no dispersivas en el ensayo Pinhole
N?	: número
# 200	: tamiz de 200 mallas por pulgada
O	: átomo de oxígeno
pH	: potencial hidrógeno
%	: porcentaje
q	: caudal en el ensayo Pinhole
SAR	: sodium adsorption ratio o relación de adsorción de sodio
seg	: segundos
Si	: átomo de silicio
S.U.C.S.	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TDS	: total de sales disueltas en el extracto de saturación
ton	: tonelada
?	: unidad micrón igual a 0.001 milímetros
vol	: volumen
Wnat	: humedad natural