



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil

**RELACIÓN ENTRE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR UN
FLUJO SUPERFICIAL EN SUELOS FINOS Y ALGUNAS
PROPIEDADES DE ESTOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN MATÍAS BASCUÑÁN CHAPARRO

PROFESOR GUÍA:
RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID DONOSO GONZÁLEZ
YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO DE 2010



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil

**RELACIÓN ENTRE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR UN
FLUJO SUPERFICIAL EN SUELOS FINOS Y ALGUNAS
PROPIEDADES DE ESTOS**

SEBASTIÁN MATÍAS BASCUÑÁN CHAPARRO

CALIFICACIÓN

PROFESOR GUÍA:

RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DAVID DONOSO GONZÁLEZ

YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE

JUNIO DE 2010

A

Ana Angélica Chaparro Ferrera
Hernán Andrés Chaparro Ferrera
Familia

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por todo el apoyo que me prestaron en la realización del presente trabajo de título y en los años que duró el programa de estudio para obtener el grado de ingeniero civil. Agradezco a mi profesor guía Ricardo Moffat por los consejos, las dudas resueltas, la compañía a la realización de la extracción de las muestras de suelo a la IX región y a las conversaciones de temas fuera del área de la universidad. A David Donoso por su disposición a responder dudas y su punto de vista práctico del tema de investigación. A Yarko Niño por el enfoque y los reparos en el área de la hidráulica que ayudaron a mejorar el modelo a escala utilizado en la presente memoria. Fuerza profesor. A mis amigos y compañeros de universidad, en especial a Israel Garrido, Roberto Olgún, Ronald Azaad y Nicolle Correia. Al apoyo de mis amigos y personas especiales en mi vida Francisco Juacida, Carolina Riquelme y Tere Ojeda. A mi nueva familia (primos y tíos) por toda la ayuda prestada.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. EROSIÓN Y TALUDES	12
1.2. EL FACTOR HUMANO Y CONSECUENCIAS DE LA EROSIÓN.....	12
1.3. FLUJO DE AGUA EN UN TALUD.....	14
1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TÍTULO.....	15
1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	16
CAPÍTULO 2. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. MECÁNICA DE LA EROSIÓN HÍDRICA	17
2.1.1. Base Hidrológica de la Erosión	17
2.1.2. Erosión por Impacto de Lluvia.....	19
2.1.3. Erosión por Escorrentía Superficial.....	20
2.2. FACTORES EROSIVOS	24
2.2.1. Erosividad	25
2.2.2. Erosionabilidad.....	26
2.2.3. Relieve topográfico.....	28
2.2.4. Cobertura Vegetal.....	29
2.3. RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE LA EROSIÓN Y PROPIEDADES DE SUELOS FINOS	31
2.3.1. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. USLE	32
2.3.2. Críticas a la USLE	38
2.3.3. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada. MUSLE.....	39
2.4. EQUIPOS DE LABORATORIO Y ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE EROSIÓN SUPERFICIAL EN SUELOS	39
2.4.1. Aparato Función de Erosión (EFA).....	40
2.4.2. Estudio de Erosión en Surcos.....	42
2.4.3. Simuladores de Flujo Superficial	42
2.4.4. Estudio de Erosión Mediante Ensayo Pinhole.....	44

CAPÍTULO 3. EQUIPO PARA ENSAYO DE EROSIÓN SUPERFICIAL	46
3.1. INTRODUCCIÓN	46
3.2. EQUIPO ORIGINAL (Verdugo, 2007).....	47
3.2.1. Características del Equipo.....	47
3.2.2. Instrumentación y Medición.....	52
3.2.3. Influencia del Equipo.....	54
3.3. MODIFICACIONES REALIZADAS AL EQUIPO	56
3.4. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO	64
3.4.1. Características del flujo uniforme.....	64
3.4.2. Establecimiento del flujo uniforme	65
3.4.3. Tensión de corte del flujo de agua en flujo uniforme	67
3.4.4. Flujo uniforme en el ensayo de erosión	67
CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS A ENSAYAR 69	69
4.1. INTRODUCCIÓN	69
4.2. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	70
4.3. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS DE LAS MUESTRAS	72
4.4. PROPIEDADES DE LOS SUELOS	74
4.4.1. Descripción Visual	75
4.4.2. Límites de Plasticidad.....	76
4.4.3. Diámetro Medio de Partículas.....	78
4.4.4. Resistencia al Corte No Drenada (S_u).....	80
4.5. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	89
CAPÍTULO 5. ENSAYO DE EROSIÓN SUPERFICIAL	96
5.1. INTRODUCCIÓN	96
5.2. CONDICIONES Y PARÁMETROS DEL ENSAYO DE EROSIÓN.....	96
5.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	97
5.4. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	98

CAPÍTULO 6. RESULTADOS	101
6.1. INTRODUCCIÓN	101
6.2. ENSAYOS DE EROSIÓN	101
6.2.1. Muestras Naturales	101
6.2.2. Muestras Remoldeadas	103
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN.....	111
7.1. INTRODUCCIÓN	111
7.2. MODIFICACIONES REALIZADAS AL EQUIPO	111
7.3. METODOLOGÍA	113
7.4. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL EQUIPO.....	114
7.5. COMPORTAMIENTO DE LAS MUESTRAS ANTE LA EROSIÓN	115
7.6. RELACIÓN DE LA EROSIÓN CON LAS PROPIEDADES DEL SUELO.....	118
7.7. RELACIÓN DE LA EROSIÓN CON PROPIEDADES NO CONTROLADAS EN ESTA INVESTIGACIÓN.....	136
7.8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN GENERAL	138
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

ANEXOS

Anexo 1	:	Especificaciones técnicas del equipo
Anexo 2	:	Calibración del perno para el sistema de subida de muestra
Anexo 3	:	Resultados de ensayos de resistencia a la compresión no confinada
Anexo 4	:	Valores de los límites de Atterberg de las muestras de suelo
Anexo 5	:	Análisis granulométrico de los suelos
Anexo 6	:	Fotografías de los taludes de donde provienen las muestras
Anexo 7	:	Registro de los volúmenes erosionados

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1	: Surcos y cambios de geometría en un talud debido a la erosión	13
Figura 2	: Caminos seguidos por el flujo de agua en el interior de un talud	14
Figura 3	: Evolución de la tasa de infiltración en el tiempo en diferentes suelos	18
Figura 4	: Impacto de una gota de lluvia	19
Figura 5	: Factores que afectan la erosión hídrica por escorrentía superficial	21
Figura 6	: Erosión por cárcavas en un talud	23
Figura 7	: Representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica	24
Figura 8	: Influencia de la pendiente del talud en el riesgo de erosión y éxito en la revegetación	29
Figura 9	: Talud protegido con Vegetación	31
Figura 10	: Diagrama de Funcionamiento del EFA	40
Figura 11	: Vista General del EFA	41
Figura 12	: Vista General Canal Simulador de Flujo Superficial	43
Figura 13	: Ensayo de Pinhole	44
Figura 14	: Muestra ensayada mediante Pinhole	45
Figura 15	: Esquema de fijación de la caja de acrílico y sistema de medición	48
Figura 16	: Vista General del Equipo	49
Figura 17	: Vista Frontal del Equipo	49
Figura 18	: Bomba activada por el motor eléctrico	50
Figura 19	: Variador de Frecuencias	50
Figura 20	: Cilindro de Descarga al Canal	51
Figura 21	: Calibración del Variador de Frecuencias	51
Figura 22	: Ciclo Hidráulico del Equipo	52
Figura 23	: Módulos Removibles sobre la Probeta	53
Figura 24	: Registro de los Perfiles en Papel Milimetrado	53
Figura 25	: Vista de la Probeta antes del Ensayo	55
Figura 26	: Capa de Arena sobre el Canal	57
Figura 27	: Distribución Granulométrica del Canal.	58
Figura 28	: Tubo de Descarga	58
Figura 29	: Sistema de Esponja para Flujo Uniforme	59
Figura 30	: Erosión Controlada por Caída de Agua	60
Figura 31	: Sistema de Perno para Elevación de la Muestra	61
Figura 32	: Esquema del Sistema de Perno para Elevación de la Muestra	62
Figura 33	: Estimación de Área Erosionado en un Corte Transversal	63
Figura 34	: Desarrollo del flujo uniforme con distintas pendientes	66
Figura 35	: Medición de alturas de agua en cada perfil	68
Figura 36	: Ubicación Muestras Limosas	71
Figura 37	: Ubicación Muestras Arcillosas	71
Figura 38	: Distribución Granulométrica de las Muestras Limosas	79
Figura 39	: Distribución Granulométrica de las Muestras Arcillosas	79
Figura 40	: Resistencia al Corte No Drenada Natural y Remoldeada a Humedad Natural	81
Figura 41	: Talud y discontinuidades del Sector 3	81

Figura 42	: Talud y Bloque Sector Muestra Roja, Camino La Pólvara	82
Figura 43	: Relación entre S_u y Humedad en Muestras Remoldeadas	84
Figura 44	: Relación entre S_u (normalizada a hum. nat.) y Humedad en Muestras Remoldeadas	85
Figura 45	: Relación entre S_u y Humedad en Muestras Naturales	88
Figura 46	: Relación del Índice de Plasticidad (IP) con las Otras Variables del Suelo	90
Figura 47	: Relación del Diámetro Medio de Partículas (D50) con las Otras Variables del Suelo	91
Figura 48	: Relación entre Resistencias No Drenadas Naturales y Remoldeadas	92
Figura 49	: Relación de la Resistencia No Drenada con los Límites de Atterberg	93
Figura 50	: Relación de Resistencia No Drenada a Humedad Natural con los Límites de Atterberg	95
Figura 51	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm^3) en Muestras Naturales, 1er Caudal	102
Figura 52	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm^3) en Muestras Naturales, 2do Caudal	103
Figura 53	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm^3) en Muestras Remoldeadas, 1er Caudal	104
Figura 54	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm^3) en Muestras Remoldeadas, 2do Caudal	106
Figura 55	: Erosión en Muestra Natural, Sector 4, 1er Caudal	107
Figura 56	: Erosión en Muestra Roja (AR), Natural, 1er Caudal	108
Figura 57	: Erosión en Muestra Roja (AR), Remoldeada, 1er Caudal	109
Figura 58	: Muestra de Suelo, Sector 3	116
Figura 59	: Relación entre la Erosión y la Resistencia No Drenada al Corte, 1er Caudal	120
Figura 60	: Relación entre la Erosión y la Resistencia No Drenada al Corte, 2do Caudal	121
Figura 61	: Relación entre la Tasa de Erosión Modificada y S_u . Muestras Naturales	125
Figura 62	: Relación entre la Tasa de Erosión Modificada y S_u . Muestras Remoldeadas	126
Figura 63	: Relación entre el Volumen Erosionado y los Límites de Atterberg. Muestras Naturales	128
Figura 64	: Relación entre el Tiempo de Ensayo y los Límites de Atterberg. Muestras Remoldeadas Relación entre la Erosión (Volumen Erosionado o Tiempo de Ensayo) y el Diámetro Medio de	130
Figura 65	: Partículas	131
Figura 66	: Volumen Erosionado en el Tiempo v/s Propiedades del Suelo. 1er Caudal	134
Figura 67	: Volumen Erosionado en el Tiempo v/s Propiedades del Suelo. 2do Caudal	135
Figura 68	: Materia Vegetal en Muestras del Camino La Pólvara, a) Muestra Roja, b) Muestra Amarilla.	138
Tabla 1	: Expresiones para la Tasa de Erosión de Suelos Cohesivos	32
Tabla 2	: Distribución Granulométrica Arena del Canal	57
Tabla 3	: Caudal Efectivo sobre la Probeta	59
Tabla 4	: Ubicación de las Muestras de Suelo a Analizar	70
Tabla 5	: Clasificación de Sensitividad de Suelos Cohesivos	74
Tabla 6	: Índices de Plasticidad de los Suelos Analizados	77
Tabla 7	: Diámetro Medio de Partículas de los Suelos Analizados	78
Tabla 8	: Resistencia al Corte No Drenada	80
Tabla 9	: Resistencias no Drenadas a Distintas Humedades en Muestra Remoldeadas	83
Tabla 10	: S_u en Muestras Naturales a Humedades Distintas a la Natural	86
Tabla 11	: Sensitividad de las Muestras Analizadas	87
Tabla 12	: Resistencias no Drenadas a Distintas Humedades en muestra Naturales	87

Tabla 13	: Planilla de Ingreso de Datos de Erosión	99
Tabla 14	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm ³) en Muestras Naturales, 1er Caudal	102
Tabla 15	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm ³) en Muestras Naturales, 2do Caudal	103
Tabla 16	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm ³) en Muestras Remoldeadas, 1er Caudal	104
Tabla 17	: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm ³) en Muestras Remoldeadas, 2do Caudal	105
Tabla 18	: Humedad (en %) al Término de los Ensayos de Erosión	118
Tabla 19	: S _u (en KPa) al Término de los Ensayos de Erosión	119
Tabla 20	: Tasa de Erosión, en [cm ³ /min], de los Suelos	123
Tabla 21	: Tasa de Erosión Modificada	124

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

AUTOR: SEBASTIÁN BASCUÑÁN CHAPARRO

FECHA: 11 de Junio de 2010

PROFESOR GUÍA: SR. RICARDO MOFFAT C.

“RELACIÓN ENTRE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR UN FLUJO SUPERFICIAL EN
SUELOS FINOS Y ALGUNAS PROPIEDADES DE ESTOS”

El presente trabajo de título tiene como objetivo principal estudiar la relación entre la erosión superficial en suelo fino y algunas de sus propiedades geotécnicas, tales como la resistencia no drenada, límites de Atterberg y tamaño medio de partícula.

La erosión es producida por un flujo superficial controlado en un canal de experimentación desarrollado para este fin. En cada ensayo se utiliza a una pendiente y un caudal definidos para producir erosión visible en cada una de las muestras de suelo ensayadas. El modelo a escala es analizado mediante la teoría de canales para determinar cómo afectan las condiciones de borde respectivas y la manera de minimizarlas.

Se presenta la recopilación bibliográfica realizada con el fin de conocer los diversos procesos de erosión, sus consecuencias, las condiciones mínimas para producir erosión, los tipos de suelos más propensos a ella, las características del suelo que más influyen en permitir un proceso erosivo, la rutina experimental normada para definir la propensión a la erosión que un suelo fino posee y algunas de las relaciones entre las propiedades de un suelo fino y la erosionabilidad producida en equipos similares al utilizado en esta investigación.

Para obtener los resultados finales que permiten validar este trabajo de título, se extrajeron 8 tipos de suelos distintos, provenientes de la V, IX y Región Metropolitana, ensayados a una pendiente de 45° y a dos caudales de 10.2 lt/min y 24.4 lt/min. Las muestras analizadas fueron tanto inalteradas como remoldeadas.

En base a los resultados obtenidos en terreno y en laboratorio, se proponen relaciones empíricas entre la erosionabilidad producida en los diversos tipos de suelo y las distintas propiedades analizadas.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. EROSIÓN Y TALUDES

Los taludes de suelo y roca tienen su origen en los primeros años de la formación del planeta Tierra. Desde las cordilleras, los cerros, las dunas, orillas de fuentes hídricas, etc. existen algunos que se han mantenido en el tiempo siendo testigos de las transformaciones más abruptas que el planeta ha sufrido. Los más antiguos han logrado un equilibrio tal que les ha permitido permanecer estables incluso soportando cambios en su geometría inicial.

La erosión es un fenómeno complejo que básicamente consiste en la disgregación o meteorización de un suelo o de un material rocoso por la acción de agentes atmosféricos, y la posterior denudación por arrastre de las partículas disgregadas. Proviene del verbo latino *erodere* que significa roer. Es un fenómeno geológico natural, generador de sedimentos, que ha existido siempre en la superficie terrestre, comenzando cuando las rocas se pusieron en contacto con la atmósfera. En última instancia se debe a la energía solar y a la presencia de un potencial regulador que es la gravedad y puede tener lugar en toda la superficie del planeta, aunque no con la misma intensidad en el tiempo y en el espacio.

La intensidad con que se manifiesta la erosión, depende de una serie de factores que, a su vez y en última instancia, dependen de la geología y del clima de la región. Además, desde que el hombre existe debe añadirse un factor antrópico.

En el caso de Chile, existe una gran cantidad de vías que están fundadas en las laderas de los cerros. La necesidad de conectividad mezclada con nuestra topografía abrupta y accidentada, ha obligado al hombre a intervenir taludes naturales y construir otros artificiales, que están expuestos de igual forma a los fenómenos que producen erosión.

1.2. EL FACTOR HUMANO Y CONSECUENCIAS DE LA EROSIÓN

El hombre es, sin duda, el factor más activo que puede modificar negativamente la evolución de los procesos erosivos de la región. La destrucción de bosques y zonas de vegetación densa transformándolos en áreas cultivables, el pastoreo abusivo, el arado del suelo siguiendo las líneas de máxima pendiente del terreno, las prácticas de cultivo inadecuadas, los incendios, la utilización de suelos fértiles para la expansión urbana e industrial, la apertura indiscriminada y mal planificada de

vías de comunicación y pistas forestales, y la explotación a cielo abierto de recursos minerales y rocas industriales, entre otras muchas acciones humanas, producen cambios importantes en el suelo que afectan a sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y que conducen a una grave degradación del mismo, en algunas ocasiones de consecuencias irreversibles.

La recuperación del suelo perdido como consecuencia de los procesos erosivos, mediante formación natural “de suelo nuevo a partir de la roca madre, es lentísimo, calculándose que para formar, en condiciones naturales, una capa de 2 a 3 cm de espesor son necesarios de 300 a 1000 años” (López, 2002). Por medio de operaciones agrícolas puede acortarse ese período, siendo necesario de 15 a 25 años para que, con las labores correspondientes, se forme una capa de 1 cm de espesor de suelo nuevo.

Si se considera que la pérdida de una capa de suelo de tan sólo 1 mm de espesor equivale a 13 ton de tierra por hectárea, y que anualmente se ocupan en “España más de 30.000 hectáreas de tierras o suelos cultivables para construcciones residenciales, aperturas de vías de comunicación, actividades industriales y explotaciones mineras a cielo abierto” (López, 2002), se puede encontrar ante un número indeterminado de millones de toneladas de suelo perdido que constituyen un grave problema por partida doble: por un lado, por la lentitud de los procesos de regeneración y por otro, por la posibilidad de que por erosión se produzca el arrastre y depositación de sedimentos al pie de las laderas, depresiones, en vías de comunicación, etc., causando cuantiosos daños. La Figura 1 muestra la formación de surcos y los notables cambios en la geometría producidos por erosión en un talud de suelo limoso ubicado en el sector de Tranapunte, IX Región.



Figura 1: Surcos y cambios de geometría en un talud debido a la erosión (Sector Tranapunte, IX región)

El proceso erosivo presenta variabilidad espacial y temporal tan importante que resulta obligatorio acotar las dimensiones físicas del problema que se quiere abordar, pues cada uno de los factores que controlan el fenómeno de erosión tendrá un mayor o menor peso relativo en función de la premisa anterior. Es por esta razón que generalmente el proceso erosivo no es considerado al momento de realizar el análisis de la estabilidad de taludes. Un proceso tan extenso no logra ser abarcado en su totalidad y, generalmente, se omite un análisis profundo y a largo plazo de él.

1.3. FLUJO DE AGUA EN UN TALUD

El agua que cae sobre un talud puede infiltrarse, o bien escurrir sobre su superficie. En el primer caso, el agua sigue varios caminos. Si la cantidad que cae es poca quedará retenida en los primeros centímetros o decímetros del terreno, que normalmente es suelo o roca alterada; si la lluvia es más intensa, el agua atraviesa esta primera capa incrementando el contenido de humedad y percolando vertical y lateralmente hacia el pie del talud.

La infiltración se define como el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el interior del suelo o roca a través de los poros o intersticios del macizo rocoso. La infiltración puede ser dividida en dos partes: la que aumenta el contenido en agua de la zona no saturada y la que se dirige, por percolación, hasta la zona saturada. Parte de la recarga en la primera zona se pierde por evapotranspiración, mientras que en la zona saturada lo pueden hacer por escorrentía subterránea, tal como se muestra en la Figura 2.

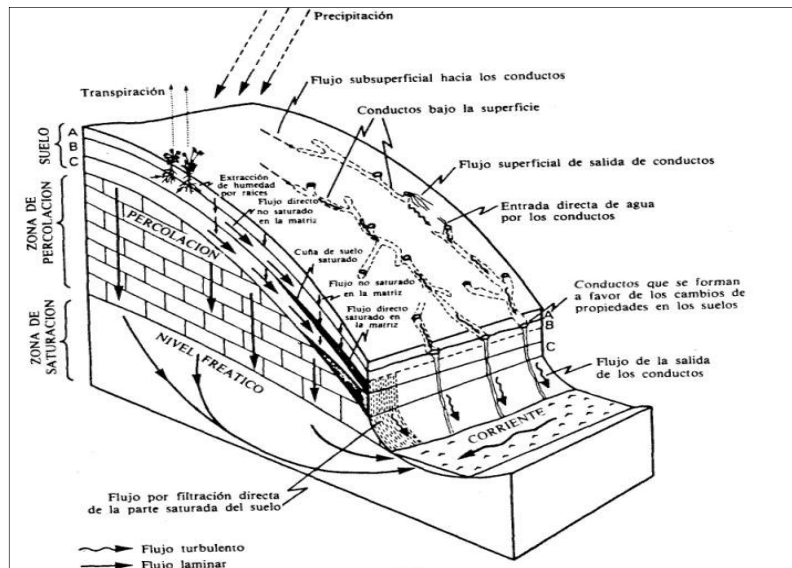


Figura 2: Caminos seguidos por el flujo de agua en el interior de un talud (Manual de Ingeniería de Taludes, 2006).

El flujo de agua en el suelo o roca depende, en primera instancia, de la naturaleza del terreno, siendo marcadamente distinto en un caso u otro. La diferencia está relacionada con la presencia y forma de los intersticios de los materiales más que con las características litológicas, siendo el flujo semejante en el caso de que una roca y un suelo tengan semejantes características hidráulicas.

El movimiento del agua tiene lugar a través de los poros o pequeñas fisuras del terreno o a través de grietas y juntas que pueden llegar a ser de grandes dimensiones. Cuando tiene lugar un flujo de agua subterráneo en suelos, puede tener lugar el fenómeno de erosión interna del terreno.

En el caso de fuertes lluvias, el agua percola hacia abajo elevando el contenido de humedad del terreno hasta llegar a saturarlo y haciendo subir este nivel hasta la superficie para producir una nueva escorrentía superficial.

Cuando se tiene un suelo con granulometría fina, hay resistencia al flujo vertical, pudiendo ocurrir el flujo lateral y poco profundo rápidamente. Además, en este tipo de suelo, se produce una saturación permanente del material de suelo antes de lograr un descenso rápido. Debido a esto, la importancia de estudiar la estabilidad de taludes en suelos finos se fundamenta en el hecho que, ante una lluvia fuerte o continuada, ocurrirá la saturación de las arcillas con las consiguientes consecuencias en los parámetros de resistencia de los materiales que forman el talud.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE TÍTULO

El objetivo y principal alcance del presente trabajo de título es determinar relaciones empíricas entre la erosionabilidad producida en suelos finos obtenidos en el territorio chileno debido a un flujo superficial (en términos del volumen erosionado) y algunas propiedades de estos, tales como la resistencia al corte en condición no drenada, el tamaño medio de partícula y los índices de plasticidad.

Para lograr este objetivo se requiere de un estudio previo acerca de las formas de erosión producidas en los taludes, los comportamientos de los suelos ante la situación de escorrentía superficial, investigación acerca de las diversas condiciones de caudal y pendiente que representen de manera fehaciente los ocurridos en los terrenos naturales y posibles condiciones de borde que significa trabajar en un modelo a escala.

Con estos datos se espera determinar la relación de la erosión producida en todos los suelos ensayados con las propiedades indicadas anteriormente. Además, de las mismas relaciones, se espera obtener un patrón acerca de la erosionabilidad en suelos de similar distribución

granulométrica, es decir, comparar la erosionabilidad entre sólo arcillas y sólo limos. Finalmente se procura relacionar las propiedades del suelo entre ellas, para determinar cómo afectan a los resultados obtenidos la interdependencia entre las variables.

1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el desarrollo del presente trabajo de título se comienza con la recopilación bibliográfica incluida en el Capítulo 2 en la que se explica la mecánica del proceso de erosión hídrica tanto por impacto de gotas de lluvia como por la escorrentía superficial, los diversos factores que influyen en la erosión de los suelos, las propiedades del suelo que afectan su potencial erosivo y los equipos utilizados en otras investigaciones similares a la actual.

El Capítulo 3 incluye las características del equipo experimental diseñado para esta investigación y las modificaciones que se le realizaron con respecto al equipo original desarrollado por Verdugo, 2007. El Capítulo 4 contiene las propiedades de los suelos obtenidas en laboratorio. En el Capítulo 5 se muestra el procedimiento de ensayo y las variables utilizadas en el equipo de erosión y en el Capítulo 6 los resultados obtenidos de los ensayos de erosión realizados.

En el Capítulo 7 y 8 del presente trabajo se incluyen el análisis de resultados y las conclusiones, además de recomendaciones para futuras investigaciones. Con esto se logra:

- Determinar una relación empírica entre las propiedades del suelo analizadas y el volumen de suelo erosionado debido al flujo superficial.
- Concluir acerca de la variable que más importancia tiene entre las analizadas.
- Determinar qué tipo de suelo es más propenso a la erosión.
- Incluir recomendaciones para futuros trabajos relacionados con el actual, que logren obtener relaciones con otro tipo de propiedades geomecánicas de los suelos a analizar.

CAPÍTULO 2. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. MECÁNICA DE LA EROSIÓN HÍDRICA

La erosión hídrica se define como aquella en la que los procesos de disgregación de la roca o suelo, y de denudación y transporte, son efectuados por el agua. Cuando la energía aportada por el agente erosivo no es suficiente para mantener el transporte de partículas, ocurre un tercer fenómeno, la depositación (Morgan y Rickson, 1995).

El mayor agente de desprendimiento es el efecto del impacto de la lluvia. Como resultado del impacto de las gotas de agua, las partículas de suelo pueden ser proyectadas por el aire hasta algunos centímetros de distancia. La continua exposición de los suelos a intensas tormentas de lluvia debilita el suelo en forma considerable. La estructura del suelo también es afectada por efectos climáticos debido a las constantes alternancias entre las condiciones secas y húmedas, o de congelamiento y descongelamiento. Además del efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre el terreno, el flujo de agua es una importante contribución al desprendimiento de las partículas de suelo.

Los agentes de transporte de sedimentos comprenden aquellos que actúan en importantes superficies y contribuyen a remover una capa relativamente uniforme de suelo y aquellos que concentran su acción en canales. El primer grupo corresponde al flujo de ancho infinitamente superior a su profundidad. El segundo grupo incluye pequeños canales, como surcos, o grandes cárcavas. Comúnmente se distingue la erosión en canales (*rill erosion*) y erosión entre canales (*sheet o interrill erosion*) que es una combinación de escurrimiento superficial e impacto de gota. A estos agentes que actúan externamente transportando material por la superficie, se debe agregar el transporte por movimientos en masas como deslizamientos rotacionales y reptación en que el agua afecta el suelo internamente alterando su resistencia.

2.1.1. Base Hidrológica de la Erosión

Los procesos erosivos del agua están estrechamente ligados a los patrones de movimiento que toman los escurrimientos en la superficie del suelo. Durante una lluvia parte del agua cae directamente a tierra (impacto directo). La lluvia que alcanza el suelo bajo cualquier forma puede ser aglutinada en pequeñas depresiones en la superficie o infiltrar el suelo contribuyendo al aumento de la humedad de éste, y a la generación de flujos subsuperficiales percolando a mayores

profundidades. Cuando el suelo no es capaz de seguir almacenando agua, el exceso contribuye a los flujos superficiales, resultando en erosión por flujos superficiales o canales. En el caso de pendientes elevadas, el agua no se aglutina por lo que el escurrimiento se inicia más tempranamente.

La tasa de infiltración es, por tanto, un factor que controla la generación de flujos superficiales. El agua es conducida a través del suelo por gravedad y capilaridad. Durante una lluvia, los espacios entre partículas son ocupados por el agua y las fuerzas capilares van decreciendo, por lo que la tasa de infiltración disminuye hacia valores inferiores. Este nivel corresponde, en teoría, a la conductividad hidráulica saturada del suelo. Sin embargo, en la práctica este nivel, que corresponde a la conductividad hidráulica parcialmente saturada, es inferior a la conductividad hidráulica saturada debido principalmente al aire atrapado en los poros del suelo. En la Figura 3 se muestra este comportamiento.

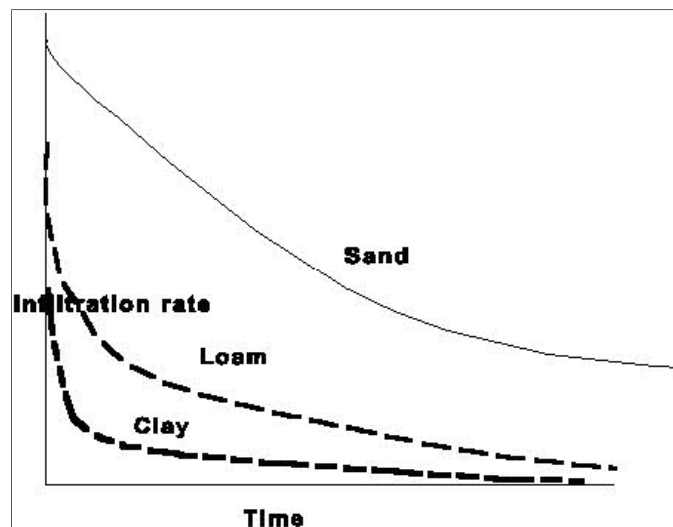


Figura 3: Evolución de la tasa de infiltración en el tiempo en diferentes suelos (Slope Stabilization and Erosion Control, 1995).

Si bien es esperable que frente a una intensidad de lluvias menor a la capacidad de infiltración no ocurra escurrimiento superficial, la evidencia empírica indica que no ocurre necesariamente esta relación. La evidencia empírica demuestra que el escurrimiento ocurre de todas maneras debido a la formación de una costra superficial que se forma con el suelo in situ (costra estructural) o cuando se forma por la deposición de partículas finas (costra deposicional). En pendientes mayores, Boiffin (1985) menciona que esta costra difícilmente se forma debido a la mayor erosión presentada (Morgan, 2005)

2.1.2. Erosión por Impacto de Lluvia

La acción de gotas de lluvia sobre las partículas del suelo se puede explicar mediante 2 efectos: por una parte tiene un efecto de consolidación, compactando el suelo, y por otra parte se producen fuerzas disruptivas en cuanto el agua se dispersa velozmente y retorna al punto de impacto mediante flujos en chorro. En la Figura 4 se ilustra este último proceso. Morgan y Rickson (1995) hace referencia a los estudios de Huang en 1982 en que se estima que la velocidad local de esos chorros alcanza el doble de la velocidad de caída de las gotas (entre 4 m/s y 9 m/s) dependiendo de su tamaño. Estos chorros de alta velocidad imparten velocidad a algunas partículas de suelo lanzándolas por el aire, contenidas en pequeñas gotas que son formadas por el fraccionamiento de la gota de lluvia en contacto con el suelo. En suma, las gotas de lluvia tienen un efecto de consolidación y dispersión del suelo.



Figura 4: Impacto de una gota de lluvia (Verdugo, 2007)

El efecto de consolidación se observa en la formación de una costra superficial, comúnmente de unos pocos milímetros de espesor, que resulta de la compactación que reduce el índice de vacíos, y por el llenado de los poros por material fino desprendido del agregado de suelo por el impacto de la gota de lluvia.

La respuesta de un suelo a una lluvia depende de su contenido de humedad, de su estructura y de la intensidad de la lluvia. La recopilación de Morgan (2005), indica que, según Le Bissonnais (1990), existen 3 posibles respuestas:

- Si el suelo está inicialmente seco y la intensidad de lluvia es alta, el agregado de suelo se desintegra rápidamente por *slaking*. Esto es rompimiento por compresión de aire bajo el impacto de agua.
- Si el agregado está inicialmente parcialmente húmedo o la intensidad de lluvia es baja, ocurren microfisuras y el agregado se rompe en agregados más pequeños. La rugosidad decrece pero la infiltración se mantiene alta por la cantidad de poros que quedan entre los micro agregados.
- Si el agregado está inicialmente saturado, la capacidad de infiltración depende de la conductividad hidráulica saturada del suelo y se requiere de una gran cantidad de lluvia para sellar la superficie.

En cuanto al efecto de las gotas de lluvia sobre el desprendimiento de partículas, se ha determinado que los suelos más vulnerables son aquellos cuyos tamaños medios de partículas están entre 0.004 mm y 0.25 mm correspondiente a arenas finas y limos no plásticos. Los suelos más gruesos son más resistentes por el peso de sus partículas, y los más finos son más resistentes debido a que el efecto de la gota debe vencer los enlaces físico-químicos existentes entre los minerales que conforman las arcillas.

Otro factor importante en el desprendimiento de partículas es la resistencia al corte de la superficie del suelo. El desprendimiento de partículas de suelos representa un efecto combinado de compresión y corte bajo el impacto de una gota, lo cual tiene mayores posibilidades de ocurrir en condiciones saturadas en las que la resistencia al corte es menor.

2.1.3. Erosión por Escorrentía Superficial

El escurrimiento superficial ocurre en pendientes cuando la capacidad de infiltración o la humedad máxima del suelo han sido superadas.

El factor más importante en cuanto a relaciones hidráulicas, es la velocidad del flujo. Debido a la resistencia inherente del suelo, la velocidad del flujo (que ejerce un esfuerzo de corte sobre el suelo) debe alcanzar un umbral antes de iniciar la erosión. Básicamente el desprendimiento se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo superan las fuerzas que la mantienen en reposo.

La velocidad umbral de corte se define como la velocidad del flujo que produce un esfuerzo de corte ejercido sobre una superficie, suficiente para comenzar el transporte de las partículas de dicha superficie (Contreras, 1999).

Según el estudio de Savat (1982), recopilado por Morgan y Rickson (1995), las partículas de tamaño superior a 0.2 mm (arenas finas) tiene una velocidad umbral de corte ascendente debido a que el peso de las partículas hace más dificultosa un transporte debido a un flujo. Para partículas de tamaño menor al indicado, los sedimentos cohesivos tienen una resistencia mayor a la velocidad del flujo debido a la cohesión entre las partículas. En el caso de los sedimentos no cohesivos con tamaños menores a 0.2 mm, la velocidad crítica de corte sigue disminuyendo con el diámetro de partículas. Para suelos heterogéneos, las partículas pequeñas quedan protegidas por las más grandes, por lo que, recién cuando las velocidades superan el umbral de corte de las partículas mayores, las partículas más pequeñas se ven afectadas

La erosión hídrica por escorrentía superficial (también llamada arroyada superficial), ya sea difusa o concentrada, es afectada por una serie de factores que se muestran en la Figura 5.

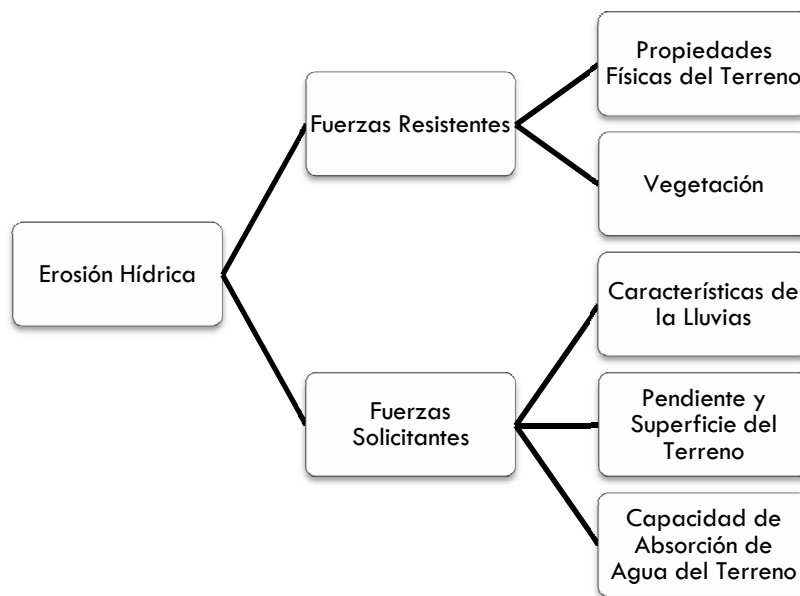


Figura 5: Factores que afectan la erosión hídrica por escorrentía superficial (Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes, 2002)

En lo referente a su forma de manifestarse pueden diferenciarse cuatro modalidades o tipos erosivos (López, 2002).

2.1.3.1. Erosión Laminar o en Manto

Consiste en una remoción de delgadas capas de suelo producidas por el agua que discurre por terrenos uniformes y de poca pendiente, provocando la pérdida de la porción de suelo con mayor contenido en materia orgánica, lo que conduce a un empobrecimiento en elementos nutrientes y a un descenso de la capacidad de almacenamiento de agua.

La erosión laminar es poco perceptible en las primeras fases, ya que apenas se modifica la superficie del suelo, pero con el tiempo se produce una concentración importante de gravas y guijarros en esa superficie, raíces de los arbustos y otras plantas menores quedan al descubierto y se produce acumulación de suelo en el tramo final de los terrenos en pendiente. En la erosión laminar actúan dos procesos: el desprendimiento y arranque de partículas del suelo por efecto del contacto directo de las gotas de lluvia, ocasionando un desplazamiento por salpicadura y, el transporte de una delgada lámina de agua denominada flujo laminar.

2.1.3.2. Erosión por arroyada anastomosada o trezada

La lámina de agua no suele discurrir a mucha distancia, ya que lo más normal es que se concentre en las depresiones e irregularidades del terreno formando pequeños hilillos de corriente no jerarquizados y de trayectoria cambiante.

2.1.3.3. Erosión en regueros o surcos

Los hilillos de corriente de trayectoria cambiante se van concentrando a favor de las líneas de máxima pendiente del terreno apareciendo concentraciones de flujo y aumentos de velocidad del agua con el consiguiente incremento de la potencia erosiva, llegándose a abrir pequeñas incisiones longitudinales de cerca de 30 cm de profundidad, con sección en forma de U o de V denominados regueros o surcos.

Este tipo de erosión se ve favorecido por la caída de aguaceros intensos y por la existencia de una erosión laminar, por arroyada difusa, previas.

2.1.3.4. Erosión en cárcavas o barrancos

Si las pequeñas incisiones por las que circula el agua en el terreno no se eliminan (por meteorización o por laboreo) éstas irán progresando en el sentido de aguas arriba captando desprendimientos de materiales de mayor tamaño debido a su falta de cohesión por humedad, llegando a producir profundas incisiones, de más de 30 cm hasta varios metros de profundidad, con secciones en forma de U, V o de una combinación de ambas.

Las cárcavas se producen en terrenos que previamente han sufrido alguna de las anteriores modalidades de erosión. Crecen en profundidad y en anchura por erosión de la corriente de agua y de los materiales que ésta arrastre, por la caída de agua en la cabecera de la cárcava, lo que da lugar a una erosión remontante, y por desmoronamiento de las paredes debido a la inestabilidad de la

ladera en la que encaja. En la Figura 6 se muestra una erosión por cárcavas producida en un talud (suelo limoso, sector Tranapunte, IX región).



Figura 6: Erosión por cárcavas en un talud (Tranapunte, IX región)

La presencia de cárcavas en un terreno indica un estado avanzado de erosión. El daño que producen es muy importante y en ocasiones irreversible. Su estabilización y corrección requieren mover grandes cantidades de tierra, construir pequeñas presas, fijar taludes, frenar la erosión de los terrenos que desaguan en ella y otras acciones que en conjunto pueden llegar a representar un coste económico elevado.

Otro tanto puede decirse de la erosión interna que se forma en terrenos poco o nada consolidados por lavado, arrastre y erosión sub-superficial, a favor de un gradiente hidráulico en las proximidades de una ladera o talud.

En la Figura 7 (López, 2002) se muestra una representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica mencionada.

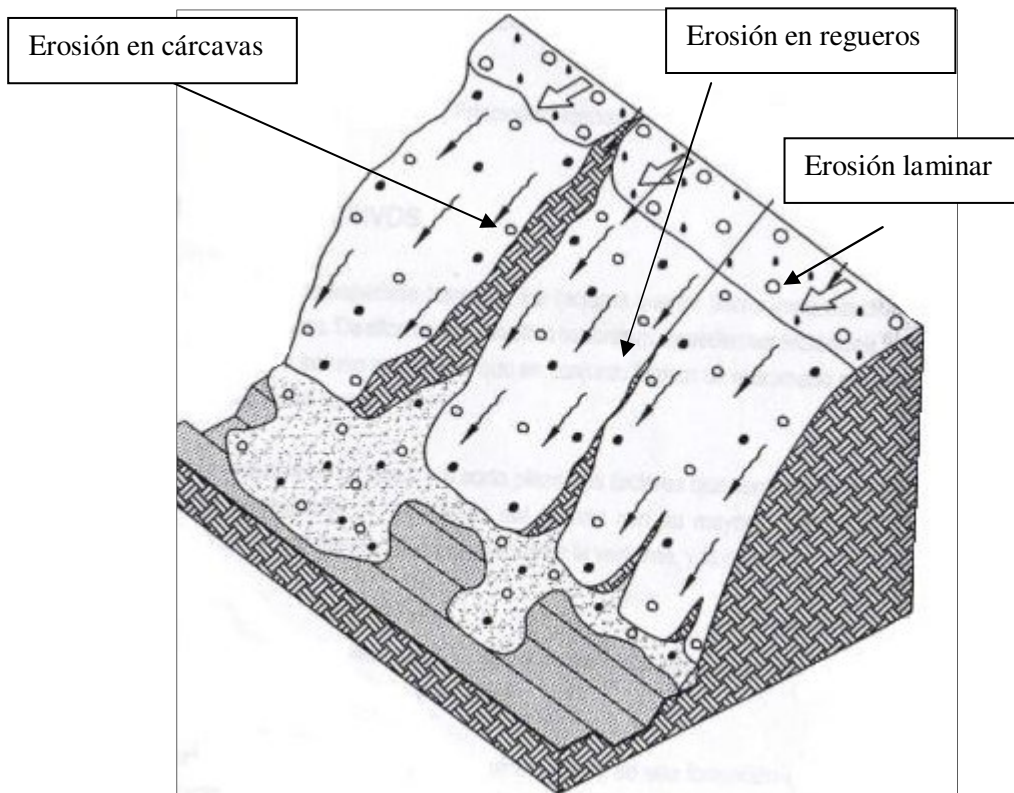


Figura 7: Representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica (Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes, 2002)

2.2. FACTORES EROSIVOS

Los factores que en última instancia determinan la erosión son, entre otros, tectónicos litológicos, edafológicos, morfológicos, e incluso antrópicos, que en conjunto forman un entramado complejo interdependiente a lo largo del tiempo.

En lo que refiere a la escala reducida de un talud, y a corto plazo, los factores que controlan la erosión son el clima con su erosividad, las características del suelo presente en el terreno, el relieve topográfico con su pendiente y la cobertura vegetal propia o implantada en la superficie.

Se define la erosividad de un clima determinado como la capacidad potencial para provocar la erosión. Es función de las características físicas de la lluvia y el viento.

Se define la erosionabilidad como la susceptibilidad o vulnerabilidad de un suelo o una roca a la erosión. Es función tanto de las características del suelo como del relieve y la vegetación.

La erosividad depende exclusivamente de las propiedades de la lluvia o del viento y es independiente de la erosionabilidad, pero una medida cuantitativa de la misma sólo puede efectuarse cuando tiene lugar la erosión. Del mismo modo, los valores relativos de la erosionabilidad no son influenciados por la lluvia o por el viento, pero sólo pueden medirse cuando la lluvia o el viento, con una determinada erosividad, los pone de manifiesto.

2.2.1. Erosividad

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte, por la contribución de la lluvia a la escorrentía superficial.

Los impactos de las gotas de lluvia dispersan y separan las partículas de suelo, con lo que se inicia la pérdida del mismo. La eficacia de una lluvia en esa disgregación depende directamente de su energía cinética, es decir, de la masa de cada una de las gotas y de su velocidad. Una gota de lluvia alcanza una velocidad límite, llamada velocidad terminal, que no puede sobrepasar y que, lo mismo que la masa, es función del diámetro de la gota. Ante la dificultad de evaluar directamente ese diámetro, se recurre al registro de la intensidad de lluvia, que es la cantidad que cae en cada instante, dato que se puede obtener con el empleo de un pluviógrafo de registro continuo. Como existe una relación entre la intensidad de lluvia y la distribución de las gotas que la componen por tamaños, quedan así relacionadas la intensidad de lluvia y la energía cinética.

Está comprobado que la erosión hídrica está relacionada con dos tipos de lluvia, la tormenta intensa de corta duración que supera la capacidad de infiltración del suelo, y el aguacero de larga duración y baja intensidad que satura el suelo. La mayor parte de la energía cinética de la lluvia se disipa en el rozamiento con la superficie del terreno, de manera que sólo un 0.2% de la energía de las gotas de lluvia, y entre un 3% a un 4% de la energía de la escorrentía se consume en la erosión.

El agua y el aire tienen propiedades físicas completamente diferentes, y eso hace que las características del transporte de sedimentos en uno u otro fluido difieran significativamente. Las fuerzas de cohesión que mantienen a las moléculas de agua juntas frente al movimiento desordenado de las moléculas de aire, la menor compresibilidad del agua, su mayor densidad y viscosidad, hacen que una corriente de agua pueda arrastrar y mantener en suspensión partículas de sedimentos mucho más grandes que una corriente de aire fluyendo a una misma velocidad.

2.2.2. Erosionabilidad

La erosionabilidad de un suelo es la inversa de la resistencia a la erosión. Un terreno con erosionabilidad elevada sufrirá más erosión que otro con erosionabilidad baja si ambos están expuestos a las mismas condiciones climatológicas.

Mientras que la erosividad de la lluvia o del viento es una medida bastante directa de las propiedades físicas de ambos agentes, la evaluación de la erosionabilidad de un suelo es mucho más complicada, ya que depende de numerosas variables.

La erosionabilidad del suelo depende de la textura, de la estructura, de la resistencia al esfuerzo cortante, de la capacidad de infiltración y de los contenidos minerales y orgánicos.

Textura de un suelo es la proporción relativa de los diferentes componentes minerales del suelo: arena (partículas entre 2 mm y 0.05 mm), limo (entre 0.05 mm y 0.002 mm) y fracción fina arcillosa (inferior a 0.002 mm). La textura es función de la granulometría que se determina mediante análisis mecánicos cuyos resultados se representan gráficamente en una curva granulométrica acumulativa. Los suelos con un alto contenido en arenas finas, medias y gruesas (0.1 mm – 2 mm) son poco erosionables debido a su alta permeabilidad; los que tienen un alto porcentaje de arcilla suelen ser bastante coherentes (mayor cohesión) por lo que resisten mejor la dispersión provocada por los impactos de las gotas de lluvia. Los suelos menos resistentes a la erosión son los limosos y los que contienen un elevado porcentaje de arena muy fina (0.06 mm – 0.25 mm).

Al mismo tiempo que la textura se debe tener en cuenta la presencia de elementos gruesos (gravas, piedras). Los suelos pedregosos son menos susceptibles a la erosión que sus equivalentes menos pedregosos, dado que las piedras superficiales los protegen del impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía generada es menor al ser más permeables.

La estructura de un suelo es la agrupación o unión de las partículas individuales mediante cementos tales como arcillas, coloides húmicos, óxidos de hierro o microorganismos para formar unidades de mayor tamaño llamados agregados. En general, un suelo no es un material masivo y macizo, sino que es posible identificar unidades de tamaño y forma diferentes, siendo los terrones la forma más conocida de agregados. Aunque un suelo tenga la misma granulometría puede presentar diferentes estructuras. La estructura determina la distribución en el espacio de la materia sólida y de los poros, algunos de los cuales están ocupados por agua, mientras que otros, los de mayor tamaño, lo están por aire. Esa distribución condiciona las propiedades físicas del suelo: aireación, retención de agua, etc. La estructura no es necesariamente permanente, pudiendo verse modificado por causa

del clima, la forma y otros factores. La facultad de un suelo para mantener su estructura ante agentes externos que lo dispersan es una medida de la estabilidad de los agregados.

La estabilidad de los agregados influye directamente en la erosionabilidad de un suelo y está relacionada con la textura, el contenido de materia orgánica y la presencia de cationes bivalentes. Son más estables aquellos agregados que contienen una cantidad importante de arcilla y materia orgánica, y “además predominan los cationes bivalentes (calcio y magnesio) sobre los monovalentes (sodio y potasio)” (López, 2002). También depende del tipo de mineral arcilloso presente: la illita y la montmorillonita forman agregados más rápidamente, pero su estructura cristalina es más abierta y las mayores dilataciones y contracciones que se producen con los cambios de humedad, hacen que sus agregados sean menos estables que los formados con caolinita.

La resistencia al corte de un suelo es una medida de su cohesión y de la capacidad para resistir las tensiones ejercidas por la gravedad, movimientos de fluidos y cargas mecánicas. Disminuye al aumentar el contenido de humedad del suelo.

Cuando un suelo está saturado y por consiguiente su resistencia al corte es mínima, se produce el desprendimiento de partículas por mecanismos combinados de compresión y de corte provocado por el impacto de las gotas de lluvia.

La capacidad de infiltración depende del tamaño y estabilidad de los agregados y de la forma del perfil del suelo. Cuando un suelo está bastante seco, la velocidad de infiltración es alta, pero disminuye con rapidez a medida que continúa con la aportación de agua como consecuencia de que las arcillas se expanden y taponan parcialmente los poros, llegando a un momento en que el valor de la velocidad de infiltración ya no disminuye más. La velocidad de infiltración depende, sobre todo, de la granulometría del suelo. Los suelos arenosos tienen una velocidad de infiltración mayor que los arcillosos, mientras que los suelos limosos tienen valores intermedios entre ellos. Los suelos con agregados estables mantienen mejor sus espacios porosos, mientras que los suelos con arcillas expansivas o los mineralizados inestables al agua tienden a permitir bajas tasas de infiltración. Cuando la cantidad de agua aportada por la precipitación sobrepasa la velocidad de infiltración, el exceso de agua forma charcos sobre la superficie, y si el suelo está en pendiente, produce escorrentía.

Los componentes orgánicos y minerales también son importantes debido a su influencia sobre la estabilidad de los agregados. La materia orgánica fresca está formada por restos vegetales y animales de toda naturaleza que se superponen al suelo mineral o se incorporan a él. Las moléculas complejas que la constituyen soportan, en primera instancia, una descomposición microbiana que libera compuestos simples, en general solubles. Parte de estos compuestos sufren un proceso de mineralización transformándose en compuestos inorgánicos solubles o gaseosos, por ejemplo, CO₂,

aunque, algunos de ellos pueden reorganizarse durante la humificación. Otra parte se escapa de la mineralización y sirve para la construcción de nuevas moléculas, cada vez más complejas, de naturaleza coloidal y de color oscuro, cuyo conjunto constituye el humus en sentido estricto (proceso de humificación). Estos compuestos húmicos contraen enlaces más o menos fuertes con los componentes minerales, (arcillas y óxidos), y luego se mineralizan a su vez, pero más lentamente que la materia orgánica fresca (mineralización secundaria). El papel que desempeña la materia orgánica en la erosionabilidad de un suelo depende de su origen. La proveniente de restos vegetales y estiércoles contribuye a la estabilidad de los agregados del suelo. Suelos con menos de un 3,5 % de materia orgánica pueden considerarse erosionables (López, 2002).

Respecto a los componentes minerales, el factor más importante sobre la erosionabilidad es la proporción de arcilla fácilmente dispersable en el suelo. Una alta proporción de sodio intercambiable puede deteriorar la estructura de un suelo al humedecerse, con la consiguiente pérdida de resistencia, seguida de la formación de una costra superficial y descenso de la infiltración al rellenar con partículas de arcilla desprendidas el espacio poroso del suelo. El aporte de sodio con los fertilizantes para mantener la cobertura vegetal puede a veces llevar a pequeños aumentos de sodio intercambiable que se traduce en un deterioro muy marcado de la estructura del suelo. El exceso de carbonato cálcico en las fracciones de arcilla y limosas del suelo, también, conduce a una alta erosionabilidad.

La congelación y el deshielo también alteran la erosión del suelo por su efecto sobre la densidad, conductiva hidráulica resistencia al esfuerzo cortante y estabilidad de los agregados.

2.2.3. Relieve topográfico

El relieve topográfico es el factor geomorfológico que más influye en los procesos erosivos. Dentro del relieve no solamente son importantes la pendiente y longitud del talud, sino también la forma del perfil y la estructura o forma geométrica de las laderas.

En una superficie plana las gotas de lluvia salpican a las partículas de suelo aleatoriamente en todas las direcciones, en un terreno con pendiente las partículas se desplazan cuesta arriba, debido a su trayectoria parabólica, recorren menos distancia que si van cuesta abajo, por lo que, estadísticamente, cuando llueve sobre un terreno inclinado y desnudo, las partículas de suelo, por efecto de la salpicadura, tienden a desplazarse cuesta abajo, aumentando la proporción en función de la pendiente.

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica crecen al aumentar la inclinación y la longitud de un talud como consecuencia del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial y sus efectos se hacen sentir mucho más en las partes inferiores de las laderas, porque a igualdad de precipitación con las partes superiores, soportan el paso del agua que discurre por la ladera.

En tierras de labores, donde la protección de la vegetación es nula en determinados períodos, la erosión laminar, por arrastre de los elementos más finos, se inicia con pendientes de tan sólo el 2% o 3%, es intensa cuando la pendiente alcanza el 4% o 5% y la formación de cárcavas y arrastre total son incontenibles cuando las pendientes alcanzan el 18% o 20% (López, 2002).

La Figura 8 se muestra la influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación.

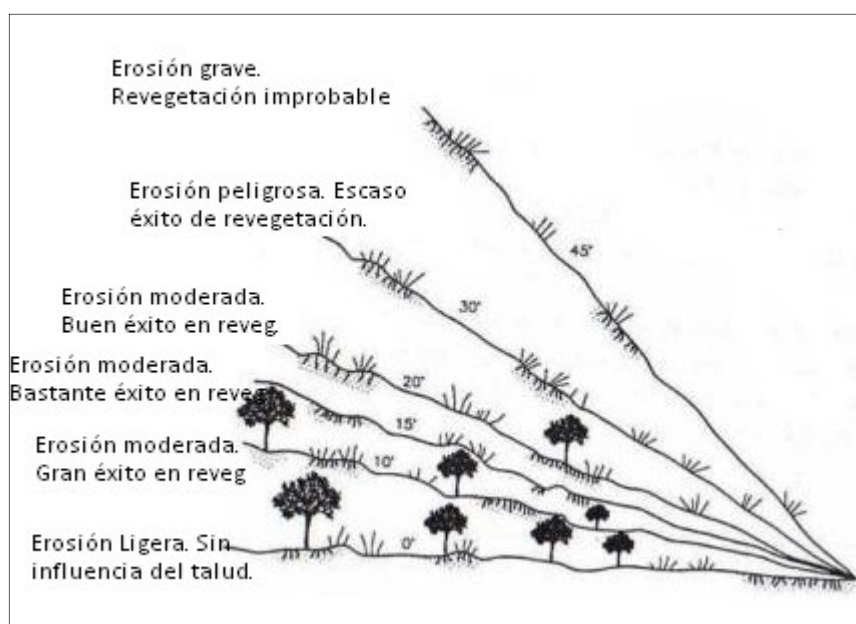


Figura 8: Influencia de la pendiente del talud en el riesgo de erosión y éxito en la revegetación (Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes, 2002)

La propia estructura del relieve condiciona extraordinariamente la escorrentía y, por lo tanto, los procesos de erosión que pueda desencadenar.

2.2.4. Cobertura Vegetal

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Sus componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del

agua en movimiento y del viento, disminuyendo su efecto erosivo al no actuar directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a aumentar la resistencia mecánica del suelo. Además, la mayor cantidad de materia orgánica presente en el suelo incrementa su estabilidad y porosidad, lo que supone un aumento en la capacidad de infiltración.

La eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, sobre todo, de la altura y continuidad de la vegetación y de la densidad de la cobertura del suelo.

Las gotas de lluvia que caen desde una altura de 7.0 m pueden llegar a alcanzar más del 90% de su velocidad terminal máxima de caída (López, 2002). Además, las gotas de lluvia interceptadas por la cubierta pueden unirse a otras en las hojas, aumentando de tamaño y haciéndose más erosivas. La acumulación de agua en los puntos de goteo de las hojas puede producir localizaciones de muy alta intensidad de impacto de gota que, a su vez, pueden superar la capacidad de infiltración y jugar un papel muy importante en la formación de escorrentía.

La cubierta vegetal disipa la energía del agua en movimiento sobre el suelo al aportar rugosidad al flujo superficial, reduciendo su velocidad. Las mayores reducciones de velocidad se consiguen con cubiertas vegetales densas y espacialmente uniformes. La vegetación agrupada o las gramíneas que forman matorrales son menos eficaces y pueden incluso, llevar a concentraciones de flujo con altas velocidades localizadas entre los matorrales.

Una vegetación arbórea y arbustiva densa es una de las más efectivas para reducir la erosión, pero una cubierta herbácea puede tener la misma eficacia y se obtiene más rápidamente.

La cubierta herbácea, por muy bien conservada que esté, no garantiza la protección del suelo por encima del 30% de pendiente. Los cultivos agrícolas no garantizan la estabilidad del suelo, de modo que la erosión comienza con pendientes de tan sólo el 3%. La siguiente Figura muestra un talud protegido contra la erosión debido a la vegetación.



Figura 9: Talud protegido con Vegetación (Marienberg)

2.3. RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE LA EROSIÓN Y PROPIEDADES DE SUELOS FINOS

Muchos intentos se han realizado para obtener relaciones entre la erosión de suelos finos con propiedades del sedimento, con propiedades del fluido que erosiona y con las condiciones del flujo. Según Navarro (2004), McNeil et al. (1996) comprobaron que los parámetros más importantes del sedimento que afectaban el fenómeno de la erosión son la densidad, el contenido de agua, el diámetro medio de partículas y el contenido orgánico. Entre las características del fluido que afectan la erodabilidad, Navarro (2004) menciona, además, el PH del fluido (Ravinger et al., 2001). Navarro (2004) destaca que Briaud et al. (2001) encontraron relaciones entre la erosionabilidad del suelo y el esfuerzo de corte inducido por el agua en mediciones realizadas con el *Erosion Function Apparatus* EFA. En este último caso, la curva obtenida tenía una forma cóncava hacia arriba (aumenta ambos).

Los mismos investigadores correlacionaron la erosión con propiedades del suelo tales como la densidad, los índices de plasticidad, la resistencia al corte, el contenido de finos (propiedades que al incrementarse en valor, aumentan la resistencia a la erosión del suelo); índice de vacíos, hinchamiento del suelo e incluso la temperatura de éste (propiedades que al disminuir en valor, aumentan la resistencia a la erosionabilidad del suelo) (Navarro, 2004).

De la misma forma se han definido variadas relaciones matemáticas en las que están incluidas variables dependientes tanto del suelo como del flujo. La siguiente tabla muestra algunas de ellas:

Tabla 1: Expresiones para la Tasa de Erosión de Suelos Cohesivos (Navarro, 2004)

Partheniades (1962)	$E = \alpha_1 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\left(\frac{\beta_1}{\tau_b} - \beta_2\right)}^{\left(\frac{\beta_1}{\tau_b} - \beta_2\right)} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) d\omega \right]$
Kandiah (1974); Arulandan (1975)	$E = \alpha_3 \left(\frac{\tau_b - \tau_s}{\tau_s} \right)$
Lamberton y Lebon (1977)	$E = \alpha_5 (\tau_b^{\beta_s} - \tau_s^{\beta_s}) \tau_b^{1/2}$
Thorn y Parsons (1980)	$E = \alpha_6(z) (\tau_b - \tau_s(z))$
Parchure y Mehta (1985)	$E = \alpha_7 \exp \left[\alpha_8 \left(\frac{\tau_b - \tau_s(z)}{\tau_s(z)} \right)^{1/2} \right]$
Maa y Mehta (1987)	$E = \alpha_9 \left(\frac{\tau_b - \tau_R}{\tau_R} \right)$

en donde E es la tasa de erosión (en unidades de [fuerza/longitud²/tiempo]) y los demás parámetros son dependientes del suelo, del fluido y del flujo.

Existen otros investigadores que han intentado relacionar la erosión producida en los suelos con otras variables, incluidas las analizadas en este trabajo de título. Un resumen de algunos investigadores y las variables con las que han relacionado la erosión se presentan a continuación (Sarfraz, Umesh y Kittur, 2003; Zreik, Krishnappan, Germaine, Ladd, 1998):

- Índice de plasticidad - Dunn, 1959; Smerdon y Beasley, 1961
- Resistencia no confinada y resistencia mediante veleta – Kamphius y Hall, 1983
- Densidad seca – Migniot, 1968
- Porcentaje de material fino – Raudiviki, 1992
- Grado de consolidación – Hanson, 1993; Robinson, 1995

2.3.1. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. USLE

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE de su sigla en inglés) es el resultado de más de 40 años de investigaciones y experiencias sobre los parámetros que en ella intervienen, y está basada en el análisis estadístico de la erosión medida en campo, sobre parcelas experimentales sometidas a ensayos en condiciones de lluvia natural y artificial.

Estima las pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un período representativo de años, que se producen en una parcela (pequeña superficie del terreno sometida exclusivamente a

procesos de erosión hídrica superficial de tipo laminar y en regueros), bajo determinadas condiciones de clima, relieve, vegetación y usos de suelo. No evalúa más que el suelo removido en la parcela considerada, con un factor de relieve determinado, y no considera las sedimentaciones y depósitos que pueden producirse procedentes de materiales erosionados en otras zonas.

La USLE es una ecuación establecida empíricamente para predecir exclusivamente la erosión laminar y en regueros en áreas relativamente pequeñas y, aunque tiene en cuenta la mayor parte de los factores que afectan a la erosión pluvial, posee las siguientes limitaciones:

- Es empírica. Se necesita de gran experiencia para asignar valores a alguno de los factores en determinadas situaciones, particularmente en el caso del factor de vegetación o de cultivo.
- Sólo predice el valor medio de la pérdida anual de suelo. Las tormentas inusuales o los acontecimientos meteorológicos durante un año en particular pueden producir mayor cantidad de sedimentos que los estimados.
- No debe ser empleada para evaluar las tasas de erosión debidas a causas geomorfológicas como movimientos en masa, erosión en cauces, etc., donde el agente activo no es la energía cinética de la lluvia, sino la humedad del suelo, y que pueden llegar a producir problemas de drenaje, de estabilidad de taludes, etc.
- No pronostica la erosión en cárcavas. Este hecho no debe ser considerado un inconveniente a la hora de establecer criterios de diseño de taludes. Debe asumirse que la aparición de grandes surcos o cárcavas en un talud es un error de diseño que puede acarrear consecuencias graves.
- No estima los depósitos de sedimentos, sólo pérdidas de suelo. el material desprendido de las partes superiores de un talud puede quedar retenido en las partes más bajas del mismo, sin que tenga que terminar necesariamente en un curso de agua.

A pesar de sus limitaciones, la USLE es un método sencillo para estimar las pérdidas de suelo, identificar áreas críticas y evaluar las medidas que se adopten para reducir dichas pérdidas. Proporciona una base racional para dimensionar balsas de decantación y otros sistemas de recogida de sedimentos, así como sus lugares de construcción. Ofrece una idea del grado de variación de cada uno de los factores que intervienen en la erosión, su importancia relativa y en qué medida pueden ser controlados o modificados para limitar las pérdidas de suelo.

La Ecuación Universal de Pérdidas del Suelo, en su forma actual, responde a la siguiente expresión:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde:

- A = Pérdidas de Suelo en toneladas por hectárea y año (t/ha·año).
- R = Índice de erosión pluvial o factor de lluvia ($J \cdot \text{cm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$). Es un número que indica la erosividad de la lluvia en una escala basada en el índice $E \cdot I_{30}$.
- K = Factor erosionabilidad del suelo ($\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}/\text{ha} \cdot J \cdot \text{cm}$). Es un número que indica el valor de la erosión por unidad de R para un suelo determinado, en una parcela mantenida en barbecho (tierra que no se siembra durante uno o varios ciclos vegetativos) continuo, con una pendiente del 9% y una longitud de talud de 22.1 m.
- L = Factor de longitud del talud (adimensional). Es una relación que compara las pérdidas de suelo con las de una parcela experimental de 22.1 m de longitud.
- S = Factor de pendiente del talud (adimensional). Es una relación que compara las pérdidas de suelo con las de una parcela experimental con un 9% de pendiente.
- C = Factor de cultivo o de vegetación (adimensional). Es una relación que compara las pérdidas de suelo con las de una experimental mantenida en barbecho continuo.
- P = Factor de prácticas de conservación del suelo (adimensional). Es una relación que compara las pérdidas de suelo con las de una parcela experimental arada en el sentido de la pendiente.

Los factores se obtienen de la siguiente forma:

Índice de Erosión Pluvial, R

El índice que propone la USLE para cuantificar el efecto erosivo de las lluvias, debido a su intensidad, tiene por expresión:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log_{10} I) (I_j \cdot T_j) \cdot I_{30}}{100}$$

donde:

- R = Índice de erosión pluvial ($J \cdot \text{cm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$).
- T_j = Período de tiempo para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero (h)
- I_j = Intensidad de la lluvia en los intervalos (cm/h)

I_{30} = Máxima intensidad de lluvia en 30 minutos (cm/h).

j = Intervalos homogéneos del aguacero.

n = número de intervalos.

El valor de R correspondiente a un año es la suma de los valores de R para cada una de las lluvias registradas en ese tiempo. Para obtener un valor representativo es necesario computar un ciclo de al menos 10 años.

Todos estos cálculos requieren una información detallada de las precipitaciones, con un registro continuo de las variaciones de intensidad de lluvia durante un aguacero, suministrado por pluviógrafos. Su elaboración consume mucho tiempo dada la gran cantidad de datos que es necesaria manejar. No obstante, el valor del índice de erosividad de las lluvias es relativamente constante para cada área geográfica, puesto que se trata de un valor promedio anual.

Un aspecto importante del factor R es su distribución a lo largo del año, pudiendo expresarse en porcentajes acumulados del valor de R anual para cada mes. Con estos datos se pueden detectar los períodos de mayor riesgo de erosión pluvial, en los que es conveniente lograr que la vegetación presente su máxima cobertura o desarrollo sobre el suelo, con lo que se pueden planificar con antelación las mejores épocas para realizar hidrosiembras, plantaciones u otras prácticas de conservación que contribuyan a aumentar la protección del suelo de un talud contra la erosión hídrica.

Factor de Erosionabilidad, K

El factor K cuantifica la erosionabilidad de cada suelo mediante una expresión deducida experimentalmente y representa la tasa de erosión del suelo por unidad de R , cuando las condiciones de relieve y vegetación son consideradas estándar.

Los factores que determinan la erosionabilidad de un suelo son, por orden de importancia, textura, contenido en materia orgánica, estructura y permeabilidad, estando K definido por la expresión:

$$100 K = 10^{-4} \cdot 2.71 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - a) + 4.2 \cdot (b - 2) + 3.23 \cdot (c-3)$$

donde:

M = Factor representativo de la textura. Es el producto entre el porcentaje de limos y arenas muy finas (0.002 – 0.1 mm) por el porcentaje de partículas de suelo

comprendidas entre 0.002 y 2.0 mm de diámetro, o lo que es igual, 100 menos el porcentaje de arcilla de la muestra.

$$M = (\% \text{limo} + \text{arena muy fina}) \cdot (100 - \% \text{arcilla})$$

a = porcentaje de materia orgánica.

b = número correspondiente a la estructura del suelo según la siguiente codificación:

1. Gránulo muy fino y limo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo fino (1 – 2 mm)
3. Gránulo y grumo medio (2 – 5 mm) y gránulo grueso (5 – 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (> 10 mm)

c = clase de permeabilidad del perfil del suelo, según la codificación del USDA – Soil Survey Manual, que diferencia los siguientes grados:

1. Rápida a muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta
6. Muy Lenta

Los valores de la textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 – 20 cm superiores del suelo, y los de permeabilidad a todo el perfil.

El factor K está comprendido en el intervalo [0.01 – 1.00]

Factores de Longitud y de pendiente del talud, L y S

El factor de longitud, L , y el factor de pendiente del talud, S , fueron evaluados por separado y tienen representación individualizada, pero suelen reunirse bajo la denominación de *Factor Topográfico* $L \cdot S$, integrando de esa forma el efecto del relieve sobre la pérdida del suelo.

La ecuación, obtenida del análisis estadístico de datos, para representar el producto $L \cdot S$ tiene por expresión:

$$L \cdot S = \left(\frac{\gamma}{22.1} \right)^m \cdot \left(\frac{0.43 + 0.3 s + 0.043 s^2}{6.613} \right)$$

donde:

γ = longitud de talud o de ladera en metros. Distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio del depósito de sedimentos, o hasta el lugar en que la escorrentía se concentra en un cauce.

s = pendiente de la ladera en %.

m = exponente influenciado por la interacción entre la longitud y el ángulo de inclinación de la ladera que toma los siguientes valores:

- Pendiente de 5% o superiores = 0.5
- Pendientes entre 3 y 5% = 0.4
- Pendientes entre 1 y 3% = 0.3
- Pendientes uniformes de menos del 1% = 0.2

Estas ecuaciones son estrictamente aplicables al caso de laderas de pendiente uniforme con un mismo tipo de suelo y vegetación en toda su longitud, debiendo utilizarse factores correctores para el caso en que a lo largo del recorrido de la escorrentía superficial se produzcan cambios sensibles de pendiente o de alguno de los otros factores.

La obtención de los parámetros γ y s que definen el factor topográfico no presenta dificultad cuando se trata de una parcela concreta del terreno, siempre que se tenga en cuenta que γ está determinado por la distancia entre el origen del flujo superficial y el lugar donde se produce el depósito de sedimentos o el flujo se concentra en un cauce.

Los valores de L y S así calculados predicen la erosión promedio que tiene lugar sobre la totalidad del talud, pero, evidentemente no está distribuida igualmente a lo largo de toda su longitud. Las pérdidas de suelo por unidad de superficie aumentan con la potencia m de la distancia al extremo superior de la ladera, siendo m el exponente mencionado anteriormente.

En el caso de irregularidades en el talud, pueden dividirse parcelas de características similares y obtener los factores en cada una de ellas para obtener la pérdida total de suelo en el talud.

Factor de cultivo, C

El factor de vegetación *C* recoge la influencia que la cubierta vegetal y sus residuos producen sobre el suelo, frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino que la velocidad de la escorrentía superficial.

Para terrenos en barbecho o completamente desnudos el factor *C* es la unidad.

Existen variadas tabulaciones relacionadas con el tipo de vegetación, valor del factor *R*, altura de vegetación, época del año con las que se obtiene el factor *C*.

Factor de prácticas de conservación, P

El último factor de la USLE, *P*, recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando trabajos culturales o disponiendo de la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía. Otras prácticas de conservación como rotación de cultivos herbáceos, tratamientos fertilizantes, cubiertas artificiales, etc., se consideran dentro de los trabajos de cultivo y, por lo tanto, su influencia en las pérdidas de suelo ya están incluidas dentro del factor de vegetación *C*.

2.3.2. Críticas a la USLE

La USLE se utiliza habitualmente para predecir pérdidas medias anuales de suelo. Como ha sido deducida y comprobada con datos procedentes de estaciones experimentales en Estados Unidos, que una vez combinados representan más de 10.000 parcelas/año, se acepta generalmente como segura, convirtiéndose en una herramienta para los técnicos que trabajan en conservación de suelos.

Aunque la ecuación es llamada universal, su base de datos, si bien es extensa, está limitada al Este de las Montañas Rocosas, a pendientes aptas para el cultivo, normalmente entre 0° y 7° de inclinación, y a suelos con bajo contenido de montmorillonita.

Durante la década de los setenta, la USLE fue ampliamente utilizada para evaluar pérdidas de suelo por erosión laminar y en regueros, apoyándose en estimaciones de más de un millón de puntos de muestreo. La información obtenida sirvió de base para formular políticas de conservación de suelos, llegando a emplearse en condiciones ajenas a sus datos básicos, por ejemplo, para terrenos forestales.

Como consecuencia de esas experiencias se hicieron una serie de cambios que hoy día están incorporados en la RUSLE (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada).

La RUSLE incluye revisiones del índice de erosión pluvial R ; un nuevo factor de erosionabilidad K , variable estacionalmente, obtenido ponderando estimaciones instantáneas de K por la porción anual de R para períodos sucesivos de 15 días y modificaciones de los otros factores de la ecuación, teniendo en cuenta factores, tales como la rugosidad superficial.

2.2.3. Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada. MUSLE

La extensión del modelo USLE a pequeñas cuencas hidrográficas a partir de la década de los setenta ha dado lugar al modelo MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), que se utiliza para predecir los sedimentos aportados en una cuenca por un aguacero concreto.

El modelo MUSLE tiene por expresión:

$$Y = 11.8(Q \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde:

Y	=	sedimentos emitidos por una tormenta aislada (t/ha)
Q	=	volumen de escorrentía en la cuenca vertiente (m ³)
q _p	=	caudal instantáneo máximo (m ³ /s)
K, L, S, C, P	=	mismos factores que en la USLE.

2.4. EQUIPOS DE LABORATORIO Y ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE EROSIÓN SUPERFICIAL EN SUELOS

Los estudios experimentales respecto de la erosión superficial de suelos han tenido diversas características. Algunos de estos, presentan ensayos enfocados a la agricultura, a la protección de taludes camineros, a la protección de taludes de presas de tierra y al estudio del socavamiento de suelos en cercanías de estructuras.

A continuación, se describen 4 aparatos experimentales destinados a cuantificar la erosión producida en suelos finos, en términos de la tasa de socavamiento, masa de suelo erosionada, o del volumen de la masa erosionada.

2.4.1. Aparato Función de Erosión (EFA)

Este equipo (*Erosion Function Apparatus, EFA*) se desarrolló para estudiar el comportamiento de suelos finos y roca blanda sometidos a flujos de agua con el fin de predecir la tasa de socavamiento de estructuras con fundaciones sumergidas en cursos de agua (Briaud, 2001). Consiste básicamente en colocar una probeta de suelo obtenida a través de un tubo Shelby, en una apertura al fondo de un canal de sección rectangular. El agua fluye por el canal y erosiona la muestra de suelo que sobresale de forma constante en 1 mm del fondo del canal. La tasa de erosión en función del esfuerzo de corte impuesto por el agua es calculada. La tasa de erosión en función del esfuerzo de corte es el resultado de un ensayo con el EFA (ver Figura 10).

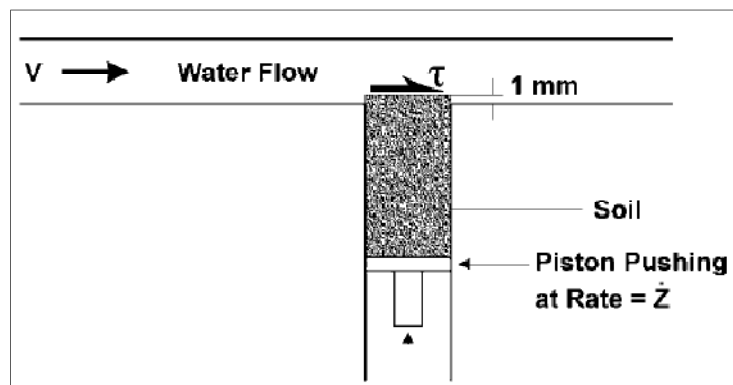


Figura 10: Diagrama de Funcionamiento del EFA (Briaud, 2001)

La muestra de suelo se obtiene un tubo Shelby de 76,2 mm de diámetro externo. Una de las extremidades del tubo llevo con suelo se ubica a través de un orificio circular en el fondo de un canal de sección rectangular. La sección es de 101.6 x 50.8 mm y la pendiente es horizontal. El canal tiene 1.22 m de largo. El agua es llevada al canal usando una bomba. Una válvula regula el flujo y la velocidad se mide a través de un equipo concebido para tal efecto (flow meter). Un pistón en el otro extremo del tubo mantiene la muestra a 1 mm sometida al flujo mientras se produce la erosión como se muestra en la Figura 11. El equipo de erosión utilizado en esta investigación se basa en el mismo principio de mantener siempre una altura de suelo, a lo menos coplanar al canal, para evitar la erosión por caída de agua y asegurar la provocada por el flujo superficial.

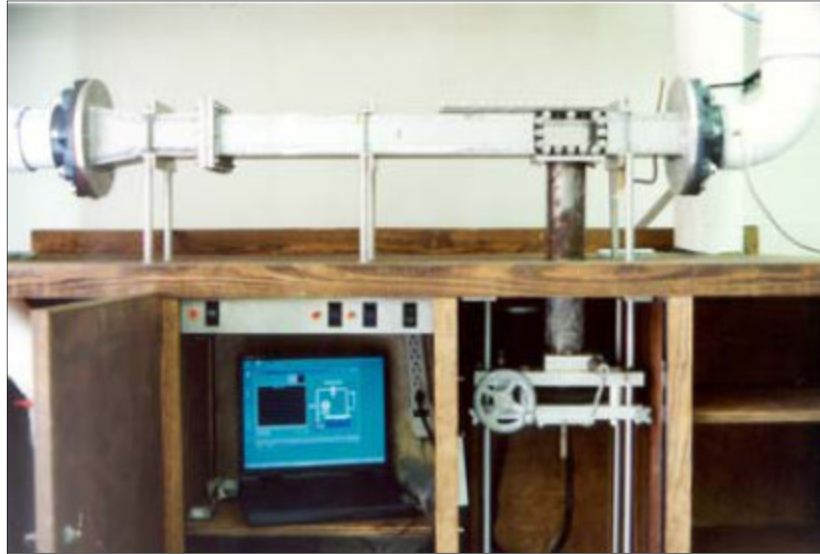


Figura 11: Vista General del EFA (Briaud, 2001)

El procedimiento es el siguiente:

1. Ubicar la probeta en el EFA, llenar el canal con agua y esperar una hora.
2. Fijar la velocidad del flujo en 0.3 m/s.
3. Subir la probeta de modo de someter 1.0 mm al flujo.
4. Registrar el tiempo en que el suelo se erosiona 1.0 mm.
5. Cuando el suelo se erosionó 1.0 mm o después de una hora (lo que ocurra primero), incrementar la velocidad a 0.6 m/s y volver a 1.0 mm de exposición al flujo.
6. Repetir el paso 4.
7. Repetir pasos 5 y 6 para velocidades de 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s, 4.5 m/s y 6.0 m/s.

El resultado del ensayo consiste en la curva de tasa de erosión versus el esfuerzo de corte. La tasa de erosión se obtiene como la simple división de la longitud de la probeta erosionada por el tiempo que demoró en erosionarse. El esfuerzo de corte se calcula como:

$$\tau = \frac{f \rho v^2}{8}, \text{ [unidades de presión]}$$

, donde τ es el esfuerzo de corte [unidades de presión], f el factor de fricción obtenido del diagrama de Moody (adimensional, valores entre [0.01 y 1.00]), ρ es la densidad del agua [unidades de densidad] y v es la velocidad promedio del flujo de agua [unidades de velocidad].

2.4.2. Estudio de Erosión en Surcos

Esta investigación se realizó para estudiar el comportamiento erosivo en surcos y determinar relaciones entre los flujos superficiales y la masa de suelo erosionada, variando los caudales y la pendiente (Nearing, 1997, recopilado por Morgan, 2005).

Los estudios en laboratorio se realizaron en un canal de 3.0 m de longitud en el suelo con el suelo levemente compactado sobre una cama de arena en la que se induce una superficie con forma de “V”. La profundidad de este surco fue de 0.5 cm y de 15 cm de ancho. Las pendientes usadas para el canal fueron de 5, 10, 15 y 20%. El agua se agrega desde el extremo elevado del canal con caudales en incremento. Al igual que en el equipo de erosión utilizado para esta investigación existen variadas posibilidades de pendientes y caudales para el estudio de la erosión. Se miden los caudales, las velocidades, la concentración de sedimentos y el ancho del flujo. Los flujos nominales de entrada son 2.2, 4.4, 8.8, 13.2 y 17.6 lt/min. La velocidad media del flujo se calcula midiendo la velocidad de un colorante vertido en el flujo y multiplicando por un factor de corrección. El ancho de los surcos se mide con regla graduada.

Los resultados de la investigación indican que el mejor indicador de la carga de sedimento q_s ($gs^{-1} cm^{-1}$), definida como la masa de suelo desprendida por unidad de tiempo y de longitud del canal es el *Stream Power* ω (gs^{-3}) calculado como:

$$\omega = r_w g S q$$

, donde r_w es la densidad del agua [masa/longitud³], g es la constante gravitacional [longitud/tiempo²], S la pendiente (adimensional, en términos de distancia vertical/distancia horizontal) y q es el caudal por unidad de ancho [longitud²/tiempo].

2.4.3. Simuladores de Flujo Superficial

El laboratorio Experimental de Geomorfología de la Universidad de Leuven en Bélgica, desarrolló un simulador de flujo superficial (recopilado por Morgan RPC, 2005) que consiste en un canal acrílico y aluminio, de 4 metros de largo y 0.4 de ancho, alimentado en su extremo superior por un flujo de agua. Este flujo de agua se distribuye por un tubo cilíndrico con 10 orificios (Figura 12).

La descarga se controla a través de una válvula conectada a un estanque cuyo nivel se mantiene constante.

El principal problema detectado en este equipo es la influencia de las condiciones de borde. Esto se reduce colectando el sedimento en una sección al centro del canal aguas abajo del punto que se monitorea.

El centro de geomorfología de Caen, en Francia, implementó un simulador combinado de flujo superficial y caída de lluvia (Govers et al., 1987, recopilado por Morgan RPC, 2005) para posibilitar el estudio de la erosión de surcos. El canal tiene 20.4 metros de largo, 1.4 m de ancho y 0.7 metros de profundidad.

La base del canal de caída de lluvia se implementó mediante tubos capilares montados a 1.7 metros sobre el canal.

Morgan (2005) menciona también el Laboratorio de Erosión de Suelos de la Universidad de Toronto de Canadá que construyó un canal en base a 10 módulos flexibles, cada uno de 2.45 metros de largo, 0.85 metros de ancho y 0.31 metros de profundidad. Estos módulos pueden ser combinados de manera de obtener distintos perfiles para simular la topografía de una ladera. El simulador de caída de lluvia se obtiene mediante 9 chorros tipo cono ubicados a 8 metros del canal.

El instituto Nacional de Recursos de Suelo, de la Universidad de Cranfield de Inglaterra, implementó un canal de 6.0 metros de largo por 2.0 metros de ancho en base a 3 módulos que permiten obtener una pendiente convexa, cóncava o convexo-cóncava. El simulador de caída de lluvia se obtiene mediante 9 chorros tipo cono (Morgan, 2005).

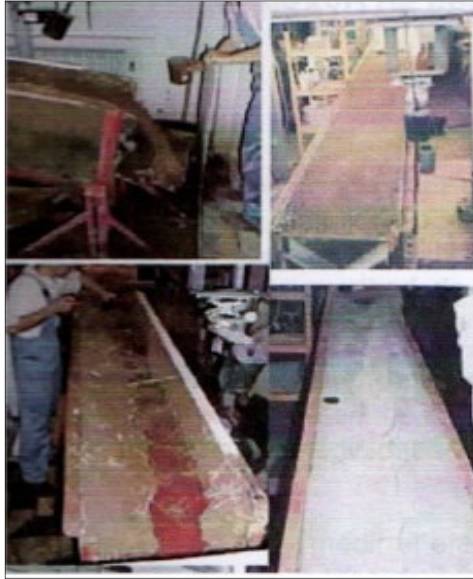


Figura 12: Vista General Canal Simulador de Flujo Superficial (Morgan, 2005)

2.4.4. Estudio de Erosión Mediante Ensayo Pinhole

Este ensayo (Sherard et al, 1976, recopilado por Garay, Alva, 1999), consiste en un hueco de 1.0 mm de diámetro que es perforado en el suelo a ser ensayado, y a través del agujero se pasa agua bajo diferentes cargas y duraciones variables. El suelo es tamizado a través del tamiz de 2.36 mm y compactado aproximadamente en el límite plástico a una proporción de densidad del 95% (las condiciones a simular en un terraplén de presa con una fisura o agujero en el suelo). En la Figura 13 se presenta el ensayo de pinhole.

El ensayo de Pinhole fue desarrollado para una medida directa de la erosionabilidad de los suelos de grano fino compactados y consiste en hacer fluir agua a través de un pequeño agujero en un espécimen de suelo donde el flujo de agua a través del Pinhole simula el flujo del agua a través de una grieta u otra estructura. Un agujero del 1 mm de diámetro es introducido o taladrado a través de un espécimen de suelo cilíndrico de 25 mm de largo por 35 mm de diámetro. Agua destilada es percolada a través del Pinhole bajo una carga de 50, 180 y 380 mm de agua y la velocidad con el efluente y la turbidez quedan registradas. Las cargas de 50, 180 y 380 mm resultan en flujos con velocidades de rangos aproximadamente de 30 a 160 cm/s y con gradientes hidráulicos en rangos aproximadamente desde 2 a 15. El ensayo en pocos años se ha convertido en un ensayo físico ampliamente usado. Es importante que el ensayo sea hecho sobre suelo con contenido de humedad natural, porque secándolo podría afectar los resultados. Si el material contiene partículas gruesas de arena o grava, éstas deben ser eliminadas tamizando la muestra a través del tamiz de 2 mm (Nº 10). El contenido de humedad natural debe ser determinado y el contenido de agua deseado para la

compactación debe alcanzarse agregando la cantidad de agua requerida (o gradualmente secándolo al aire, si está demasiado mojado). Toda el agua añadida debe ser agua destilada.

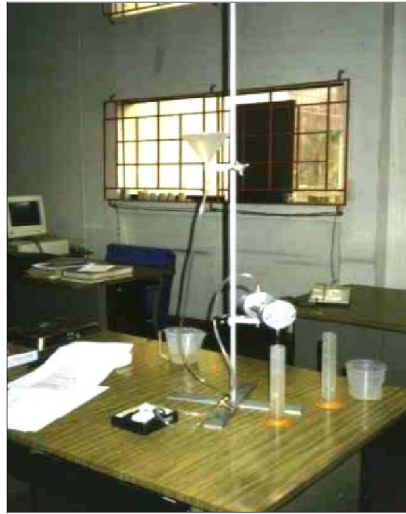


Figura 13: Ensayo de Pinhole (Garay, Alva, 1999)

La nomenclatura empleada para clasificar un suelo dispersivo de acuerdo a la Norma del ensayo Pinhole (ASTM D4647-93) es la siguiente:

- Dispersivo (D1, D2)
- Dispersivo leve a moderado (ND4, ND3) y
- No dispersivo (ND2, ND1)

En la Figura 14 se muestra un espécimen de suelo después de un ensayo de Pinhole.

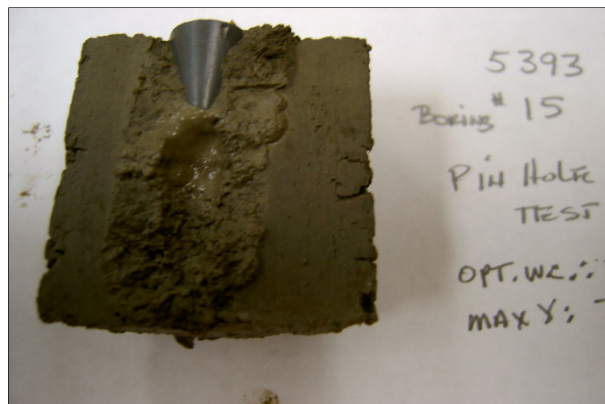


Figura 14: Muestra ensayada mediante Pinhole (Garay, Alva, 1999)

CAPÍTULO 3. EQUIPO PARA ENSAYO DE EROSIÓN SUPERFICIAL

3.1. INTRODUCCIÓN

El equipo de erosión superficial, ha sido desarrollado para evaluar la susceptibilidad de los suelos a los efectos del escurrimiento superficial. Este equipo posee la capacidad de modificar y controlar las características del escurrimiento pues, como se ha planteado, en gran medida las condiciones del flujo son las que determinan la severidad de la erosión. En ese aspecto el equipo toma en cuenta las condiciones de descarga y pendiente del canal.

Por otra parte el equipo tiene la capacidad de medir de forma certera y sencilla los efectos del agente erosivo, en este caso el agua, sobre el material a estudiar. Para ello el equipo consta de una instrumentación simple para poder hacer mediciones fehacientes del cambio de volumen de la muestra de suelo ensayada, en lapsos cortos de tiempo.

De la bibliografía se desprenden dos formas de medir el efecto de la erosión, una de éstas es la medición de la masa erosionada y la otra es la tasa de erosión de una probeta cuyo nivel respecto del flujo se mantiene constante por la vía de un pistón.

La primera metodología tiene la desventaja de poder tomar solo una medición por ensaye, es decir no se puede apreciar el comportamiento del suelo en el tiempo. Esto es una limitación importante en cuanto algunos aspectos del fenómeno estudiado tienden a aparecer con el tiempo, como es el caso de la aparición de una costra protectora en el suelo.

Por esta razón se optó por medir el volumen de suelo erosionado en toda la superficie de la probeta a lo largo del tiempo. Esta medición se realiza monitoreando la cota de 27 puntos de la cara de la probeta expuesta al flujo de agua, en una superficie total de 10x10 cm. Este tamaño conjuga la suficiente lejanía de los efectos del borde del canal, pero es lo suficientemente grande para observar mecanismos de erosión superficial como aparición de surcos. Con esta metodología que permite lecturas rápidas, se obtienen las siguientes ventajas:

- Estudiar la tasa de erosión a lo largo del tiempo
- Estudiar los fenómenos de concentración de flujo en la escala de la probeta
- Caracterizar patrones de erosión de los diversos suelos como remoción de agregados o de partículas pequeñas.

- Hacer observaciones cualitativas respecto del comportamiento de las probetas.

3.2. EQUIPO ORIGINAL (Verdugo, 2007)

3.2.1. Características del Equipo

El equipo para ensayo de erosión superficial consiste en un canal de acrílico de 2.0 metros de largo por 0.4 metros de ancho, de inclinación variable en cuya base se encuentra un orificio de sección cuadrada de 10 x 10 cm. A través de ese orificio se ubica una probeta cúbica de suelo mediante una caja de acrílico, quedando la superficie superior de la probeta coplanar con la base del canal y por ende sometida al flujo (Figura 15). Una vista general del canal se observa en la Figura 16. La base del canal tiene una rugosidad del orden de la rugosidad de los suelos lograda a través de la instalación de una película de papel lija tamaño 180 (ver Figura 17). La caja diseñada para la probeta permite la colocación de probetas talladas y remoldeadas.

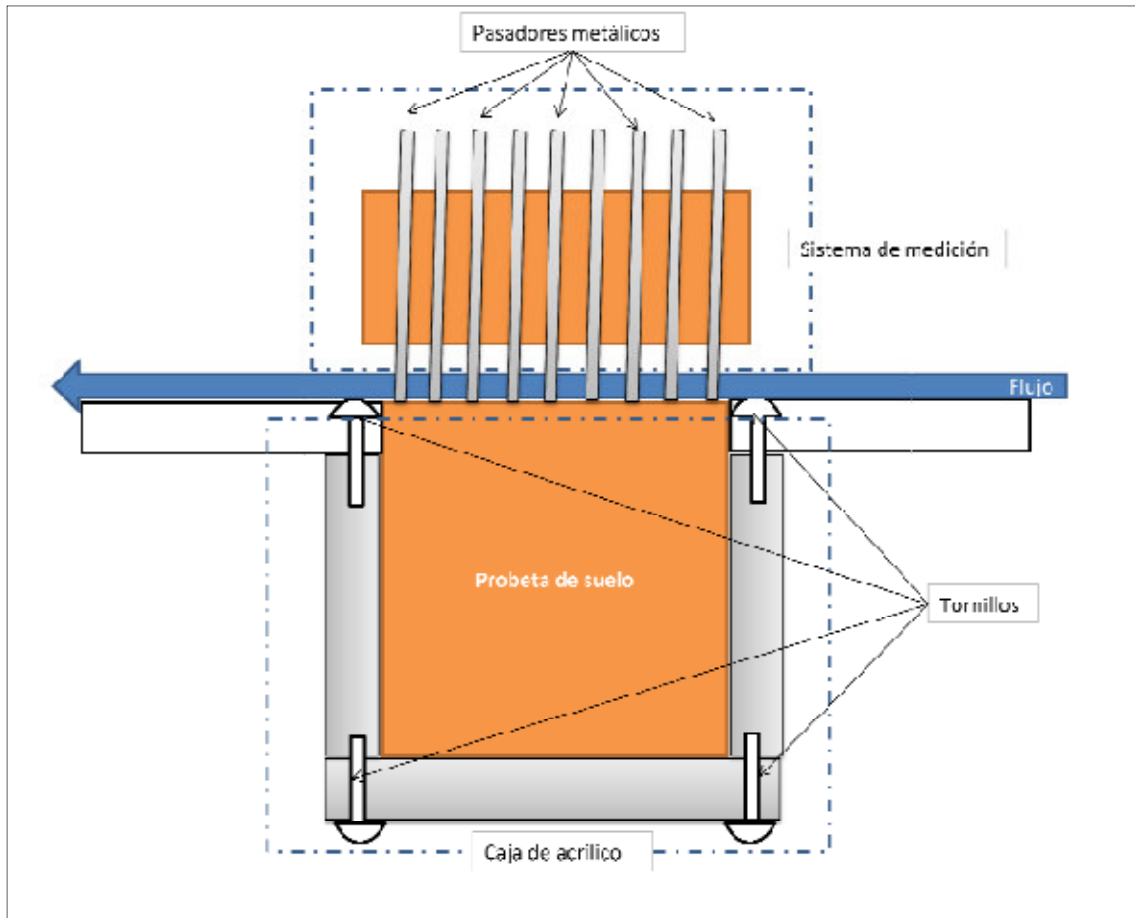


Figura 15: Esquema de fijación de la caja de acrílico y sistema de medición (Verdugo, 2007)

El canal es alimentado por un flujo de agua mediante una bomba controlada por un motor (ver Figura 18) energizado a través de un variador de frecuencias (ver Figura 19) lo cual permite controlar el caudal ingresado. La bomba tiene un caudal máximo que supera los 60 lt/min. Esta bomba recircula el agua alimentándose de un estanque a la salida del canal y bombeando hacia el canal por un sistema de tuberías que finaliza en un tubo de PVC de 32 mm perforado ubicado en la anchura del canal. En total son 12 perforaciones de 3.5 mm separadas cada 3.0 cm. (Ver Figura 20). Todos los detalles técnicos del equipo se encuentran en el Anexo 1.

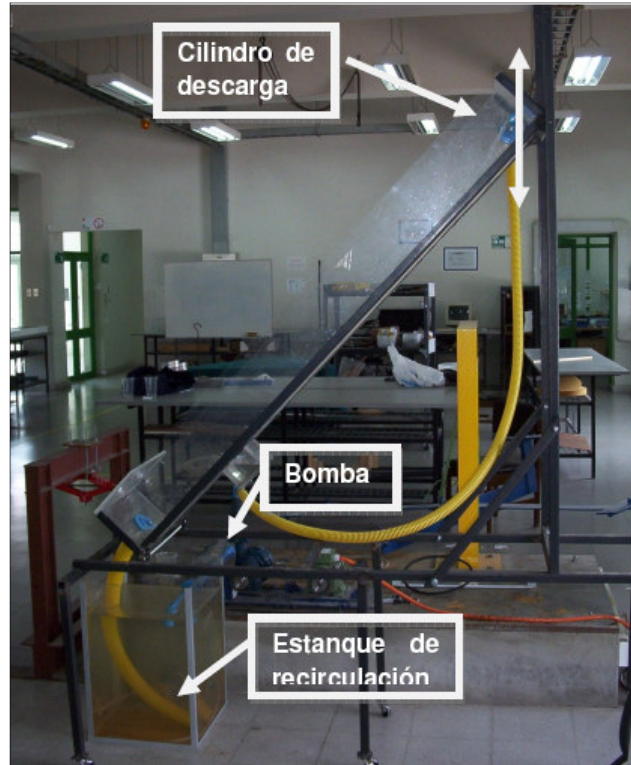


Figura 16: Vista General del Equipo (Verdugo, 2007)



Figura 17: Vista Frontal del Equipo (Verdugo, 2007)

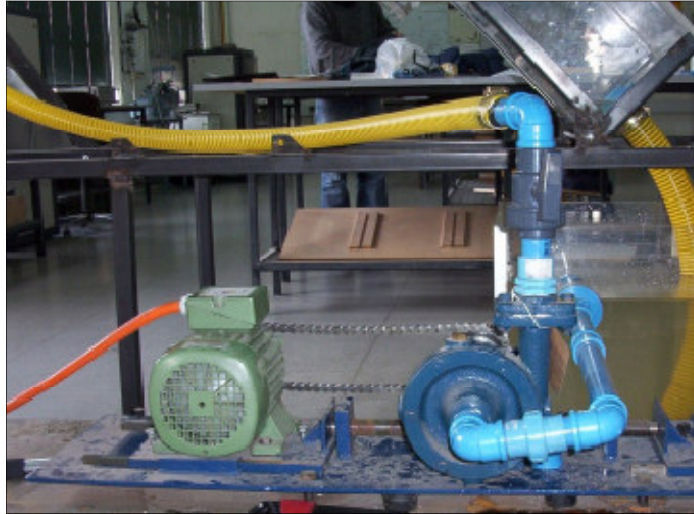


Figura 18: Bomba activada por el motor eléctrico (Verdugo, 2007)



Figura 19: Variador de Frecuencias (Verdugo, 2007)

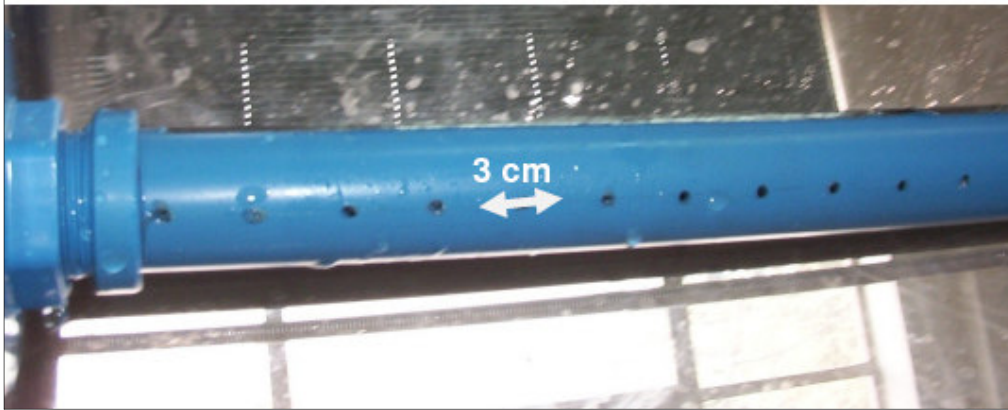


Figura 20: Cilindro de Descarga al Canal (Verdugo, 2007)

El variador de frecuencias se calibró de modo de controlar el caudal de salida de la bomba obteniéndose la curva presentada en la Figura 21.

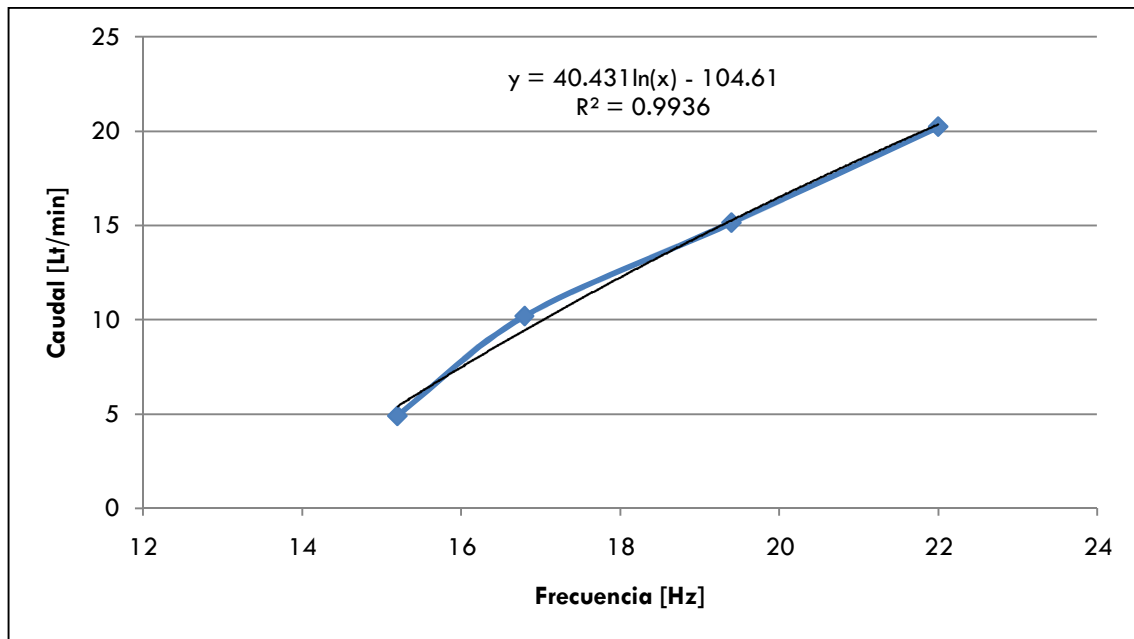


Figura 21: Calibración del Variador de Frecuencias (Verdugo, 2007)

El canal descarga hacia el fondo del estanque mediante una manguera flexible de modo de obtener líneas de flujos de abajo hacia arriba al interior del estanque. A media altura de dicho estanque se ubica un filtro compuesto por una lámina de acrílico perforada en un área en la cual se adosó un geotextil. El objetivo de este filtro es evitar dañar el sistema a través de la recirculación de partículas gruesas. El ciclo hidráulico del equipo se esquematiza en la Figura 22.

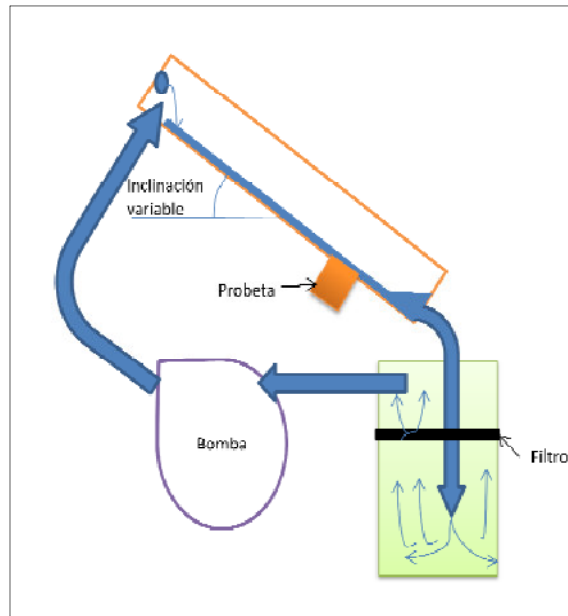


Figura 22: Ciclo Hidráulico del Equipo (Verdugo, 2007)

3.2.2. Instrumentación y Medición

La instrumentación del equipo está enfocada a la correcta medición del volumen erosionado. Por volumen no se entiende solamente la magnitud, sino la modificación de la morfología de la probeta. Para esto se implementó un sistema que permite monitorear la cota de 27 puntos de la probeta ubicados en 3 perfiles longitudinales. De este modo se puede obtener el relieve superficial de la probeta a través del tiempo.

El sistema consiste en 3 módulos removibles que se ubican a una altura fija de 2.0 cm sobre la probeta. Los módulos corresponden a los 3 perfiles estudiados. Cada uno de estos módulos consta de 9 orificios por los cuales se ubican unos pasadores metálicos. En cada medición los pasadores metálicos se bajan hasta tocar la probeta. Este sistema se ilustra en la Figura 23.



Figura 23: Módulos Removibles sobre la Probeta (Verdugo, 2007)

La medición se realiza sacando los módulos y registrando las lecturas en papel milimetrado. Para cada perfil se registran los datos de las diferentes lecturas en un mismo lugar de modo de apreciar, a simple vista, la evolución de los perfiles en el tiempo (ver Figura 24). Se ha estimado en 2 minutos el tiempo mínimo que requiere el operador para hacer la medición de los 3 perfiles. Cabe mencionar que las lecturas que se registran corresponden a la longitud del pasador que queda expuesta por sobre el módulo y no a la altura real de la probeta. La erosión se mide, por tanto, como la diferencia de las lecturas inicial y final en el tiempo determinado.

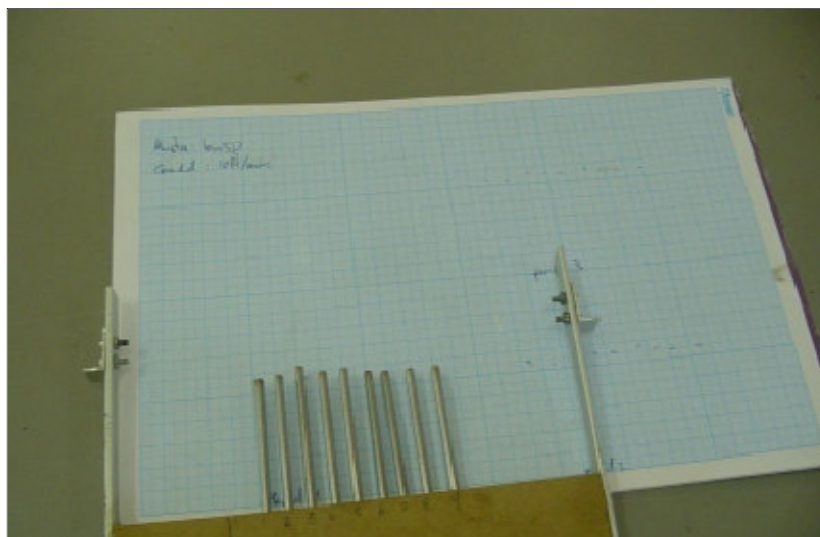


Figura 24: Registro de los Perfiles en Papel Milimetrado (Verdugo, 2007)

3.2.3. Influencia del Equipo

Como todo instrumento, el equipo para ensayo de la erosión superficial tiene cierta influencia en las magnitudes estudiadas.

Influencia del canal

El fenómeno de la erosión superficial en taludes de suelo tiene características de flujo variable e imposible de simular en forma absoluta en laboratorio. La principal influencia del canal es la de confinar el flujo en un ancho determinado con los consecuentes efectos en los bordes del canal.

Para reducir esta influencia es que la probeta se ubica al centro del canal, a 15 cm de sus paredes. Los patrones de flujo indican que es posible estimar que la sección central es representativa de un escurrimiento homogéneo.

Condiciones de borde de la probeta

Los principales problemas del equipo son los que están relacionados con los bordes de la probeta. En efecto, el equipo busca generar un flujo absolutamente superficial, pero a menudo el flujo tiene a buscar su camino por los bordes de la probeta generando un desgaste mayor en las orillas.

Además se hace muy difícil que no exista un pequeño espacio entre el orificio del canal y la probeta. Este espacio, aunque milimétrico, genera un cambio en el régimen de flujo, sometiendo a esfuerzos no contemplados en el extremo aguas arriba de la probeta (ver Figura 25). Cabe mencionar que estos esfuerzos también pueden darse en el caso de probetas mal talladas o protuberantes respecto al canal.

Para aminorar el efecto descrito se ha optado por sellar mediante vaselina el espacio entre el orificio y la probeta. De este modo se logra que el flujo tenga una continuidad al enfrentar la probeta.

Además el área monitoreada no considera los bordes de las probetas para evitar que los efectos mencionados tengan mayor importancia en los resultados. De la probeta de 10 x 10 cm se monitorea un área de 8.0 x 7.5 cm. Así por ejemplo no se consideran los mayores desgastes de las esquinas de la probeta que se deben a concentración de esfuerzos y a un tallado naturalmente inestable. En suma, las precauciones tomadas permiten considerar que este efecto es poco relevante en los ensayos, pues afectará una fracción pequeña del área monitoreada.

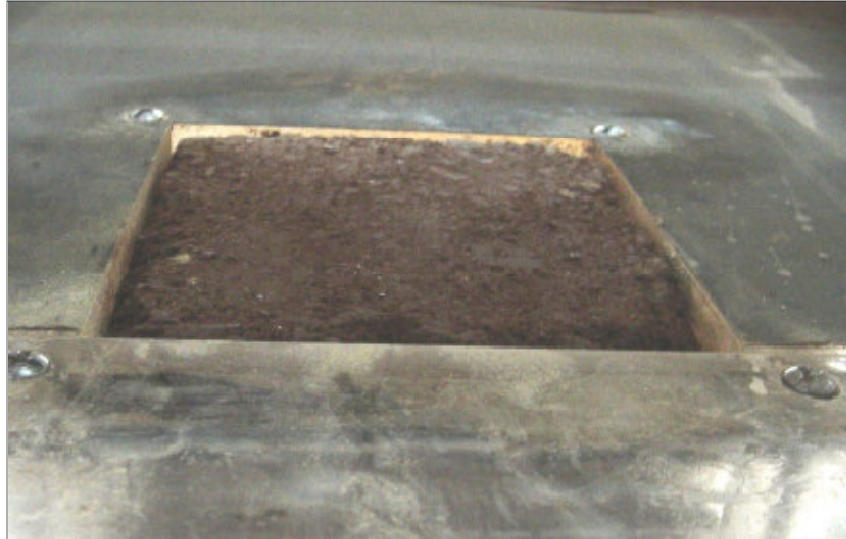


Figura 25: Vista de la Probeta antes del Ensayo (Verdugo, 2007)

Influencia de la rugosidad

Otro de los factores del equipo es el de su rugosidad, que desde un punto de vista hidráulico, tiene una proporcionalidad inversa sobre la velocidad media del flujo. En vista de ellos el equipo fue dotado de una rugosidad de granos del tamaño de una arena fina mediante una película de papel lija tamaño 180. Este tamaño tiene por consecuencia que la probeta enfrenta el flujo a una velocidad determinada independientemente de su propia rugosidad. En terreno, frente a un mismo caudal, 2 taludes de geometría similar pero de suelos diferentes, enfrentarían, teóricamente, velocidades distintas debido a sus rugosidades.

Además, al enfrentar la rugosidad del suelo el flujo desarrolla su capa límite. La capa límite es “una capa de fluido muy delgada que está en contacto con una superficie sólida, dentro de la cual no se pueden despreciar los efectos viscosos. Capa de fluido cuya velocidad es afectada por la fuerza cortante en la frontera” (Villagrán). El espesor de esa capa es función de la distribución de velocidades en el flujo. Al cambiar la rugosidad, esta distribución de velocidad es alterada. Villagrán demuestra que el esfuerzo de corte de un flujo sobre una superficie depende de la manera como varía el espesor de su capa límite. De ahí que el cambio de rugosidad entre la carpeta rugosa y el suelo altera las tensiones sobre la probeta.

Sin embargo la alta velocidad del flujo y el tamaño reducido de la probeta, implican que la capa límite difícilmente se alcanza a desarrollar por lo que el efecto de dicho cambio de velocidad no es demasiado elevado. Además, el tamaño del grano de papel lija (180), se encuentra al tacto de un orden similar al de los suelos, más rugoso que las arcillas y más liso que las arenas gruesas.

Influencia de la Medición

Como se ha mencionado, la medición se realiza a través de unos pasadores que entran en contacto directo con el suelo. Esto conlleva necesariamente efectos sobre el suelo. Una operación descuidada realizada con los pasadores puede incluso afectar la estructura superficial del suelo, compactarlo localmente o derechamente disgregarlo.

El efecto que esto puede tener es de gran relevancia, pues una modificación de la morfología de la probeta acarrea concentraciones de flujo que localizan la erosión.

Por esto, las mediciones deben ser realizadas con sumo cuidado de modo de evitar cualquier alteración de la probeta.

3.3. MODIFICACIONES REALIZADAS AL EQUIPO

Para mejorar el comportamiento hidráulico del canal, se le realizaron diversas modificaciones al equipo desarrollado por Verdugo (2007), que se indican a continuación:

Cambio del papel lija por arena fina

Debido a que el papel lija presentaba discontinuidades a lo largo del canal, se cambió por una arena fina normalizada. Los cambios inducidos al canal se fundamentan en lo siguiente:

- Al no existir pliegos que sean de las dimensiones del canal, éstos estaban cortados y pegados sobre el acrílico de la base del equipo de erosión. Las discontinuidades que se presentaban en los pliegos producían un cambio en el flujo y concentraciones a lo largo de las líneas de división.
- En las separaciones de los pliegos de la lija, existían protuberancias (que se producen por la superposición de los papeles lija), o bien partes del canal con el acrílico al desnudo.

Se logró adherir una capa de arena de aproximadamente un 0.5 mm de espesor (ver Figura 26) a lo largo de todo el canal, que asegurara una rugosidad continua para todo el trayecto del flujo desde su salida hasta su encuentro con la probeta.



Figura 26: Capa de Arena sobre el Canal

La arena utilizada fue escogida de tal forma que no existiera un cambio de rugosidad violento entre el canal y la probeta. Para esto se utilizó una arena fina con la granulometría indicada a continuación:

Tabla 2: Distribución Granulométrica Arena del Canal

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa
8	2.36	0	0.00	100.00
10	2	0.43	0.14	99.86
30	0.6	137.75	45.92	53.94
40	0.425	92.34	30.78	23.16
50	0.3	63.43	21.14	2.02
100	0.15	6.05	2.02	0.00

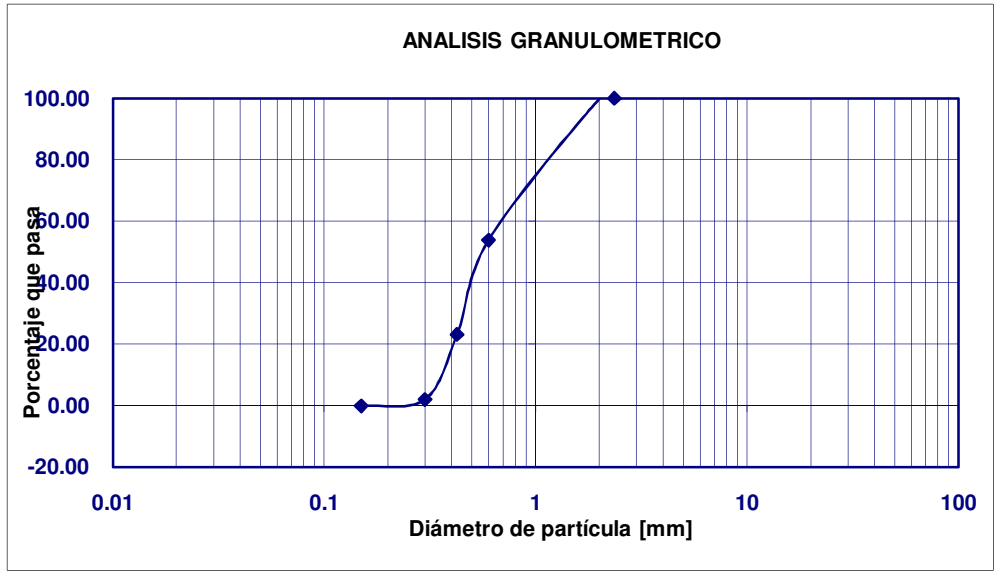


Figura 27: Distribución Granulométrica del Canal.

Sistema de Uniformidad de Flujo

La descarga del agua al canal, se realizaba mediante un tubo de PVC con 12 perforaciones de 3.5 mm separadas cada 3.0 cm. Esto permitía que el flujo saliera en forma de chorro para, aproximadamente 50 cm antes de llegar a la probeta, formar un flujo uniforme que finalmente erosiona la probeta.

Para lograr que la uniformidad del flujo se produjera antes, se le realizaron 2 modificaciones al canal:

- Se le eliminaron las perforaciones realizadas al tubo de descarga y se cambiaron por un mayor número de orificios, de menor diámetro y a menor distancia, como se muestra en la Figura 28. En total son 31 perforaciones de 2.0 mm cada una, separadas cada 1.0 cm.

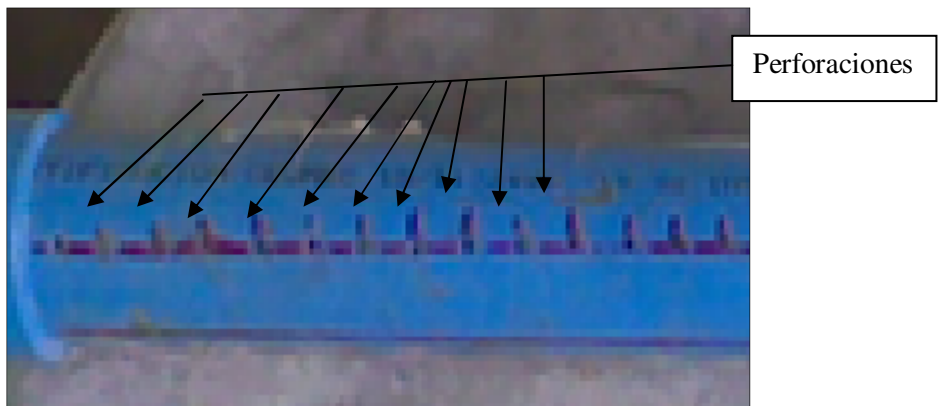


Figura 28: Tubo de Descarga

- Se instaló una esponja a 30 cm bajo la descarga, que distribuyera el flujo inmediatamente aguas abajo de ella. Las dimensiones de la esponja fueron calibradas de tal manera que no existiera acumulación de agua en esta interrupción del flujo. Si tal situación ocurriera, induciría un rebalsamiento por sobre la esponja, teniendo como consecuencia un caudal de llegada a la probeta de suelo controlado más por la altura de agua acumulada aguas arriba de la esponja que por el caudal real de salida del tubo de PVC. Las dimensiones de la esponja fueron 5.0 cm de ancho, 40 cm de ancho (mismo ancho del canal) y 17 cm de alto (ver Figura 29).

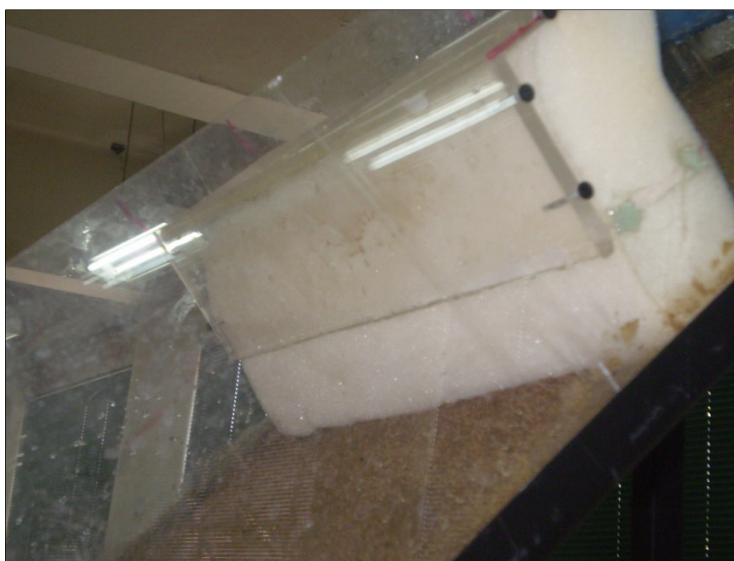


Figura 29: Sistema de Esponja para Flujo Uniforme

La colocación de esta barrera significa una variación en el caudal que llega efectivamente a la probeta. Debido a esto, se estima necesaria una nueva calibración del variador de frecuencias con respecto al caudal que erosiona la muestra de suelo y no sólo al que sale del tubo de descarga.

Se midieron 2 caudales con el sistema de esponja en el canal, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3: Caudal Efectivo sobre la Probeta

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Volumen de Agua [lt]	Caudal [lt/min]	Caudal según Curva [lt/min]	Error Relativo
15.2	39.93	3.476	5.223	5.422	± 0.019
20.0	34.02	9.163	16.161	16.518	± 0.011

Debido a que las diferencias son menores a 0.4 lt/min (diferencia máxima de 4%), se decide utilizar la misma curva de calibración determinada en el canal de erosión sin la inclusión de la esponja.

Sistema de Perno para Elevación de la Muestra

Uno de los principales inconvenientes del canal es que la erosión registrada en las muestras de suelo, producía que el agua cayera sobre ella en forma de cascada (ver Figura 30) y no pasando por la superficie de la probeta, como se pretende como objetivo para esta investigación.

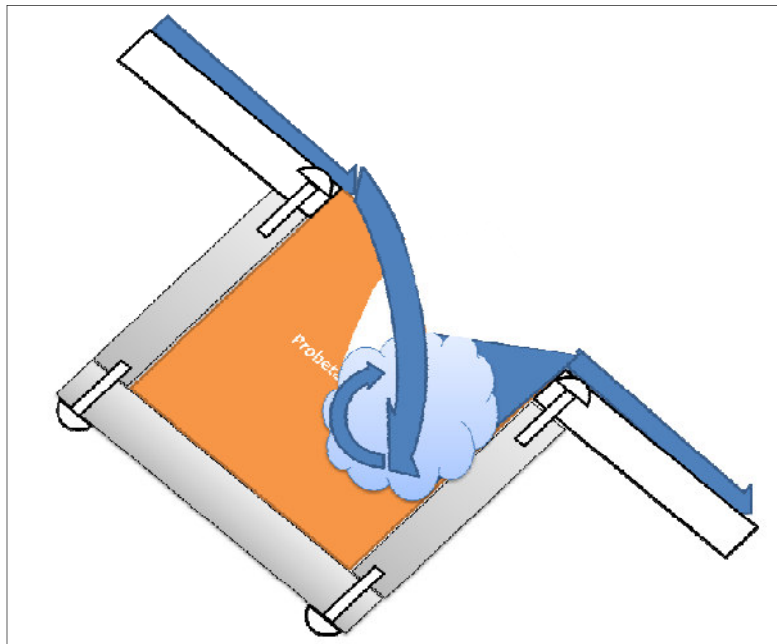


Figura 30: Erosión Controlada por Caída de Agua (Verdugo, 2007)

Para evitar este fenómeno, se ideó un mecanismo de subida de la muestra mediante un perno (ver Figura 31 y 32). Con esto se logra mantener el flujo pasando en todo momento por la superficie de la muestra y no cayendo sobre ella. El inconveniente que presenta este mecanismo es que se debía definir el punto que se desea esté coplanar a la base del canal. Las posibilidades más directas de análisis son las siguientes:

- Que el punto menos erosionado de la muestra quede coplanar al canal. Con esta definición, se tiene que el punto más alto de la probeta está en el plano de la base del canal, dejando otros puntos bajo la línea del flujo, permitiendo que ocurriese el fenómeno de la caída de agua explicado en el párrafo anterior.
- Que el punto más erosionado de la muestra quede coplanar al canal. Esto significa que el punto más bajo de la probeta quede en el plano de la base del canal, dejando otros puntos

sobre la línea de flujo, permitiendo que el agua golpee los sectores sobresalientes de la probeta. Esta situación produce gran desprendimiento de agregados de suelo para caudales superiores a 15 lt/min.

- Elegir un punto intermedio entre los 2 descritos anteriormente y compensar los efectos de golpe del agua sobre la probeta y de caída del agua sobre ella.

Debido al excesivo daño que le produce el agua a las partes de la probeta que están por sobre la línea de flujo, es que se decidió por la primera opción. Las ventajas que se presentan en este caso son que se evita el golpe del flujo recién descrito y que se disminuye el efecto de la caída del agua a medida que la probeta comienza a subir.



Figura 31: Sistema de Perno para Elevación de la Muestra

En la siguiente Figura se muestra un esquema del sistema.

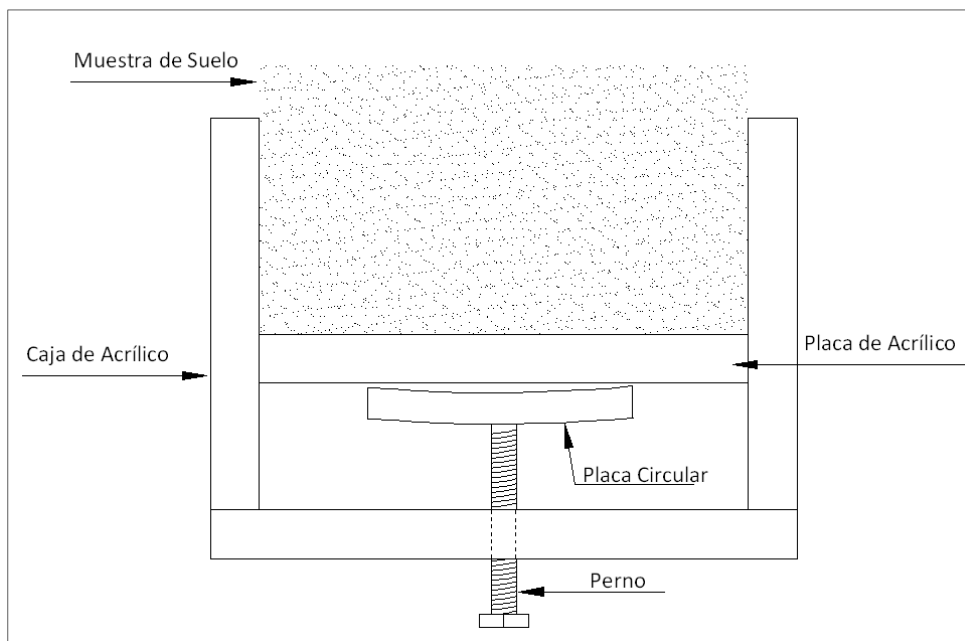


Figura 32: Esquema del Sistema de Perno para Elevación de la Muestra

El sistema de elevación de la muestra se calibró para medir el avance que se producía en la placa de acrílico con una vuelta del perno. En el Anexo 2 se adjunta la calibración realizada en el perno y las características de este, en el que se determinó un avance promedio de 1.34 mm/vuelta.

Debido a que la dimensión del perno era mucho más pequeña que la dimensión de la placa (8.0 mm de diámetro del perno versus 9.7 cm de lado de la placa de acrílico cuadrada), se producía una rotación de la placa en torno al perno. Las razones que se esgrimen para este comportamiento residen, principalmente, en que el perno pudiera no estar exactamente presionando el centro de la placa del acrílico y que el mismo peso de la muestra de suelo no estuviera repartido uniformemente en todo su volumen, apoyándose de forma irregular en la placa de acrílico en donde ésta descansa. Por esto, se decidió colocar una placa circular, adherida al perno mediante un sistema de tuerca y contratuerca, que permitiese a la placa cuadrada de acrílico ser levantada por un área mayor a la del perno y así evitar la rotación descrita.

Medición de la Erosión

La medición de la erosión se realizaba, originalmente, en base a las áreas de los 9 polígonos formados por las 9 filas de pasadores metálicos (véase Figura 33). Para cada medición el área se calcula en función de la altura de los 3 pasadores metálicos.

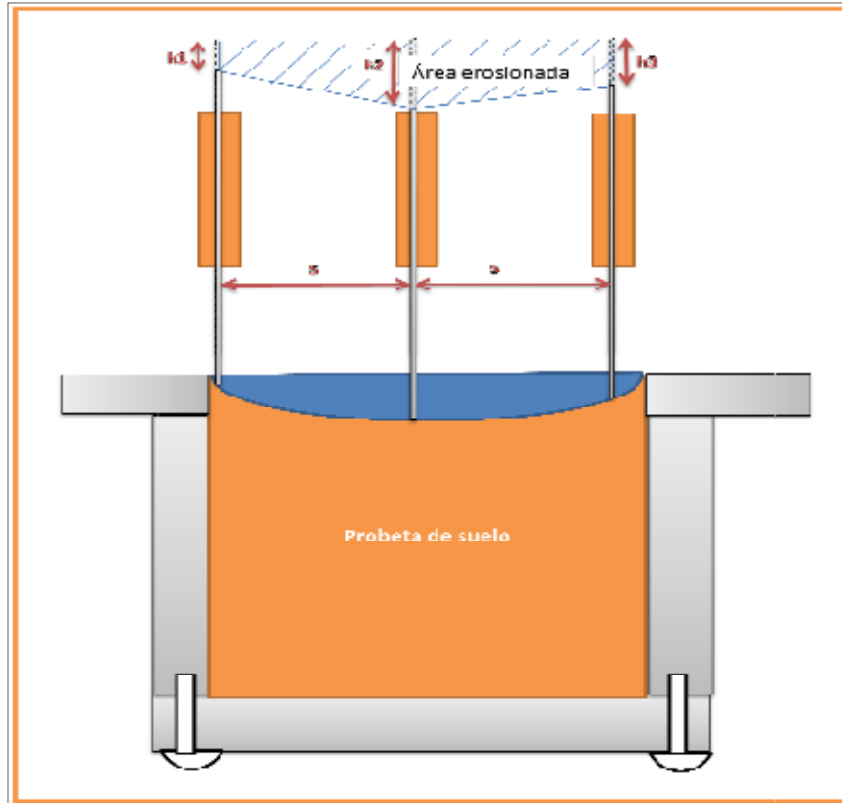


Figura 33: Estimación de Área Erosionada en un Corte Transversal (Verdugo, 2007)

Así el área erosionada en cada corte transversal se calcula como:

$$A_{ei} = S \left(\frac{h1 + h2}{2} + \frac{h2 + h3}{2} \right)$$

, donde S es igual a 3.5 cm en este equipo. Los términos h1, h2 y h3 son la diferencia de cota, en cm, entre la lectura en t_0 y t_1 ($t_0 < t_1$).

Luego el volumen erosionado en cada medición se calcula según la siguiente expresión:

$$V_t = L \frac{\sum_{i=1}^9 A_{ei}}{9}$$

, donde L es equivalente a 8.0 cm (distancia entre la medición en el extremo aguas arriba y la medición en el extremo aguas abajo) y A_{ei} se calcula según la expresión entregada anteriormente (en unidades de área, cm^2).

En este caso, la medición se realizará suponiendo que cada punto tiene una influencia igual en el área de control de la probeta. Esto se traduce en que los 27 puntos en los cuales se mide la erosión

producida tienen una influencia de 2.22 cm^2 (cada uno) en el área de la probeta en donde se registra la erosión. Este cálculo está basado en lo siguiente: debido a las condiciones de borde impuestas, el área que abarcan los pasadores metálicos se reduce a $8.0 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm}$ (como se indica en el acápite 3.2.3) resultando un área total de 60.0 cm^2 . Debido a que son 27 puntos los que miden la erosión producida, cada punto tiene una influencia de $60/27 = 2.22 \text{ cm}^2$. Ésta área de influencia multiplicada por la diferencia de cotas medidas por los pasadores en 2 distintos tiempos, medirá el volumen erosionado a medida que transcurre el ensayo.

3.4. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO

3.4.1. Características del flujo uniforme

Las modificaciones descritas en el acápite anterior tienen por objetivo desarrollar un flujo uniforme en el canal de erosión.

“El flujo uniforme (ver Figura 34) posee las siguientes características:

1. La profundidad, el perímetro mojado, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes.
2. La línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos” (Marcos Contreras, 1999).

Para propósitos prácticos, el requerimiento de una velocidad constante puede interpretarse libremente como el requerimiento de que el flujo posea una velocidad media constante. Sin embargo, en rigor, esto significaría que el flujo posee una velocidad constante en cada punto de la sección del canal dentro del tramo del flujo uniforme. En otras palabras, la distribución de velocidades a través de la sección del canal no se altera dentro del tramo. Este patrón estable de la distribución de velocidades puede obtenerse cuando la llamada “capa límite” se encuentra desarrollada por completo.

Se considera que el flujo uniforme es sólo permanente, debido a que el flujo uniforme no permanente prácticamente no existe. En corrientes naturales, aún el flujo uniforme permanente es raro, debido a que en ríos y corrientes en estado natural casi nunca se experimenta una condición estricta de flujo uniforme. A pesar de esta desviación de la realidad, a menudo se supone una condición de flujo uniforme para el cálculo de flujo en corrientes naturales. Los resultados

obtenidos a partir de esta suposición son aproximados y generales, pero ofrecen una solución relativamente simple y satisfactoria para muchos problemas prácticos.

Nótese que el flujo uniforme no puede ocurrir a velocidades muy altas, a menudo descritas como *ultra rápidas*. Esto se debe a que, cuando el flujo uniforme alcanza una cierta velocidad alta, se vuelve muy inestable generándose ondas en su superficie. A velocidades más altas el flujo eventualmente atraparé aire y se volverá inestable.

3.4.2. Establecimiento del flujo uniforme

Cuando un flujo ocurre en un canal abierto, el agua encuentra resistencia a medida que fluye aguas abajo. Esta resistencia por lo general es contrarrestada por las componentes de fuerzas gravitacionales que actúan sobre el cuerpo de agua en la dirección del movimiento. Un flujo uniforme se desarrollará si la resistencia se balancea con las fuerzas gravitacionales.

La magnitud de la resistencia, cuando otros factores físicos del canal se mantienen constantes, depende de la velocidad del flujo. Si el agua entra al canal con lentitud, la velocidad y, por consiguiente, la resistencia son pequeñas, y la resistencia es sobrepasada por las fuerzas de gravedad, dando como resultado una aceleración de flujo de aguas abajo.

La velocidad y la resistencia se incrementarán de manera gradual hasta que se alcance un balance entre las fuerzas de resistencia y de gravedad. A partir de este momento, y de ahí en adelante, el flujo se vuelve uniforme.

El tramo de aguas arriba que se requiere para el establecimiento del flujo uniforme se conoce como *zona transitoria*. En esta zona el flujo es acelerado y variado. Si el canal es más corto que la longitud transitoria para las condiciones dadas, no puede obtenerse flujo uniforme. Hacia el extremo de aguas abajo del canal, la resistencia puede ser excedida de nuevo por las fuerzas gravitacionales y el flujo nuevamente se vuelve variable.

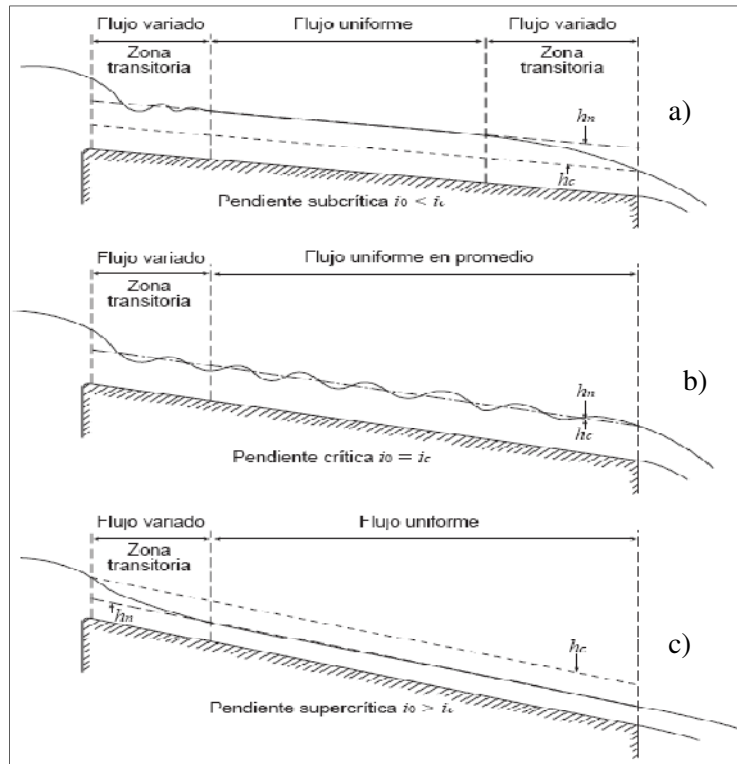


Figura 34: Desarrollo del flujo uniforme con distintas pendientes (Contreras, 1999)

En la pendiente subcrítica de la Figura 34 a), el agua en la zona de transición aparece ondulante. El flujo es uniforme en el tramo medio del canal pero variado en los dos extremos.

En la pendiente crítica la superficie del agua del flujo crítico es inestable. En el tramo intermedio pueden ocurrir ondulaciones, pero en promedio la profundidad es constante y el flujo puede considerarse uniforme (Figura 34 b)).

En la pendiente supercrítica (Figura 34 c)), la superficie de agua en la zona transitoria pasa del nivel subcrítico al nivel supercrítico a través de una caída hidráulica gradual. Después de la zona de transición el flujo se aproxima al uniforme.

La profundidad del flujo uniforme se conoce como *altura normal*. En todas las figuras la línea de trazos largos representa la línea de la altura normal h_n , y la línea de trazos cortos representa la línea de altura crítica h_c .

La longitud de la zona de transición depende del caudal y de las condiciones físicas del canal, como la condición de entrada, la forma, la pendiente y la rugosidad. Desde un punto de vista hidrodinámico, la longitud de la zona de transición no debería ser menor que la longitud requerida para el desarrollo completo de la capa límite bajo las condiciones dadas.

3.4.3. Tensión de corte del flujo de agua en flujo uniforme

En flujo uniforme, constante, la fuerza que realiza el agua debido a la aceleración de la gravedad es contrarrestada por la rugosidad del lecho fluvial. La resistencia media por unidad de área o, de la misma forma, la fuerza tangencial que realiza el flujo por unidad de área, denominada tensión media de corte τ , se calcula como:

$$\tau = \gamma R_h J$$

donde:

- τ = tensión media de corte (o tensión tractiva) que ejerce el flujo, en [fuerza/longitud²]
- γ = peso específico del fluido, en [fuerza/longitud³]
- R_h = radio hidráulico, en [longitud]
- J = Pendiente del canal.

Con la formulación anterior, es posible determinar el esfuerzo de corte que ejerce el flujo de agua sobre la superficie del suelo y determinar una posible relación entre este parámetro y la resistencia al corte del suelo.

3.4.4. Flujo uniforme en el ensayo de erosión

Para comprobar el efectivo desarrollo del flujo uniforme en el ensayo de erosión, se hicieron medidas de las alturas de flujo en 2 perfiles transversales: el primero de ellos a 50 cm aguas abajo de la esponja y el segundo a 1.0 m aguas abajo de la esponja (encuentro con la muestra) para un caudal de 10.18 litros/minuto (ver Figura 35). En cada perfil transversal se midió con una regla con una graduación mínima de 0.5 mm en 3 puntos, obteniéndose los siguientes resultados:

Perfil 1 (50 cm aguas abajo de la esponja):

Altura 1: 1.25 mm

Altura 2: 1.25 mm

Altura 3: 1.0 mm

Perfil 2 (100 cm aguas abajo de la esponja):

Altura 1: 1.0 mm

Altura 2: 1.0 mm

Altura 3: 1.0 mm

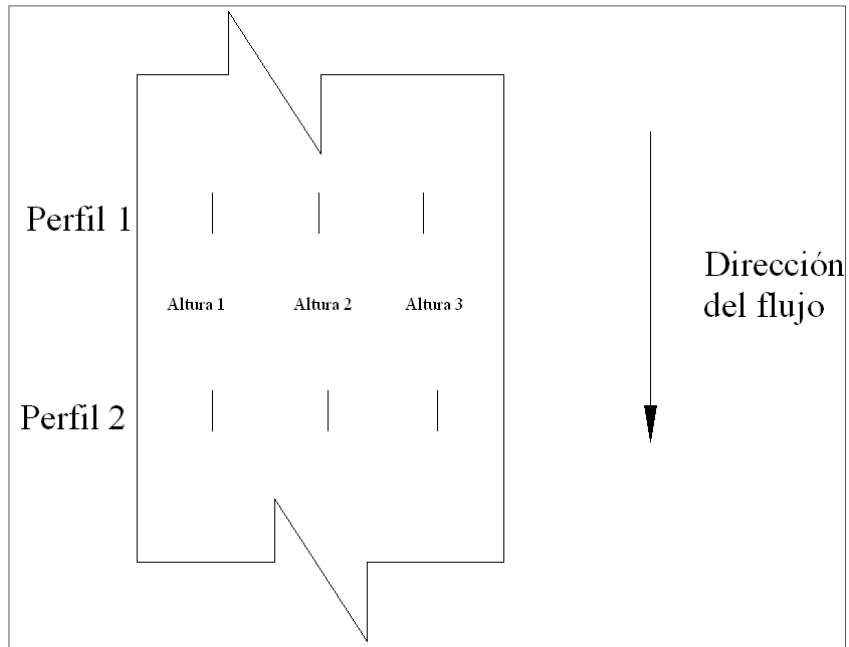


Figura 35: Medición de alturas de agua en cada perfil

Teniendo en consideración el error asociado a la medición de las alturas de agua en cada uno de los perfiles indicados (error de operación y así como de la graduación mínima de la regla utilizada, 0.5 mm), los valores obtenidos indican que las modificaciones realizadas al equipo surtieron efecto en mantener una altura de flujo prácticamente igual en los perfiles analizados.

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS SUELOS A ENSAYAR

4.1. INTRODUCCIÓN

Para asegurar una distribución heterogénea de las muestras de suelo fino a ensayar, se procuró obtenerlas de diversas locaciones dentro del territorio nacional, para poseer una base de datos amplia tanto en el aspecto de ubicación geográfica como en los grados de erosión presentados (los cuales están descritos en los siguientes acápite). Con la información recopilada en terreno, se obtuvieron los antecedentes geológicos del suelo, descripciones visuales y muestras para ser ensayadas en laboratorio.

Se definió un número de muestras teniendo en consideración la extensión de tiempo del que se dispone para realizar la presente investigación (que restringe el número máximo de muestras a analizar), así como un número mínimo que permitiera tener una clara tendencia de las curvas que se pretende construir. Por esta razón, se seleccionaron 8 distintos suelos (4 arcillas y 4 limos) que asegurara el estudio de un amplio rango de datos tanto de erosión como de propiedades de los suelos.

La denominación de las muestras se refiere principalmente a la ubicación de donde fueron obtenidas, de alguna característica visual en particular o en el orden como fueron extraídas. Los nombres de cada muestra son los siguientes:

- Sector 1 = Muestra Limosa, VIII – IX Región
- Sector 2 = Muestra Limosa, VIII – IX Región
- Sector 3 = Muestra Limosa, VIII – IX Región
- Sector 4 = Muestra Limosa, VIII – IX Región
- Puente Alto = Muestra Arcillosa, Puente Alto, RM
- San Felipe = Muestra Arcillosa, San Felipe, V Región
- Muestra Roja = Muestra Arcillosa, Camino La Pólvara, V Región
- Muestra Amarilla = Muestra Arcillosa, Camino La Pólvara, V Región.

4.2. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS

La siguiente tabla muestra la ubicación geográfica de todas las muestras, además de una nomenclatura que será utilizada en gráficos y textos, según sea necesario:

Tabla 4: Ubicación de las Muestras de Suelo a Analizar

Nombre de la Muestra	Nomenclatura	Ubicación	Longitud	Latitud	Tipo de Suelo
Sector 1	L1	Sector Costero. Límite entre VIII y IX Región.	73° 29' 59.1'' W	38° 27' 34.8'' S	Limo
Sector 2	L2	Sector Costero. Límite entre VIII y IX Región.	73° 23' 43.3'' W	38° 41' 9.4'' S	Limo
Sector 3	L3	Sector Costero. Límite entre VIII y IX Región.	73° 29' 46.5'' W	38° 27' 57.6'' S	Limo
Sector 4	L4	Sector Costero. Límite entre VIII y IX Región.	73° 28' 25.6'' W	38° 31' 34.8'' S	Limo
Puente Alto	APA	Comuna de Puente Alto, RM	70° 32' 38.65'' W	33° 36' 32.1'' S	Arcilla
San Felipe	ASF	Sector Cordillerano, San Felipe, V Región	70° 43' 19.3'' W	32° 45' 27.56'' S	Arcilla
Muestra Roja	AR	Camino La Pólvora, V Región. Km 7.292	--	--	Arcilla
Muestra Amarilla	AM	Camino La Pólvora, V Región. Km 5.854	--	--	Arcilla

Las siguientes figuras muestran la ubicación de las muestras dentro del territorio nacional (Google Earth®):

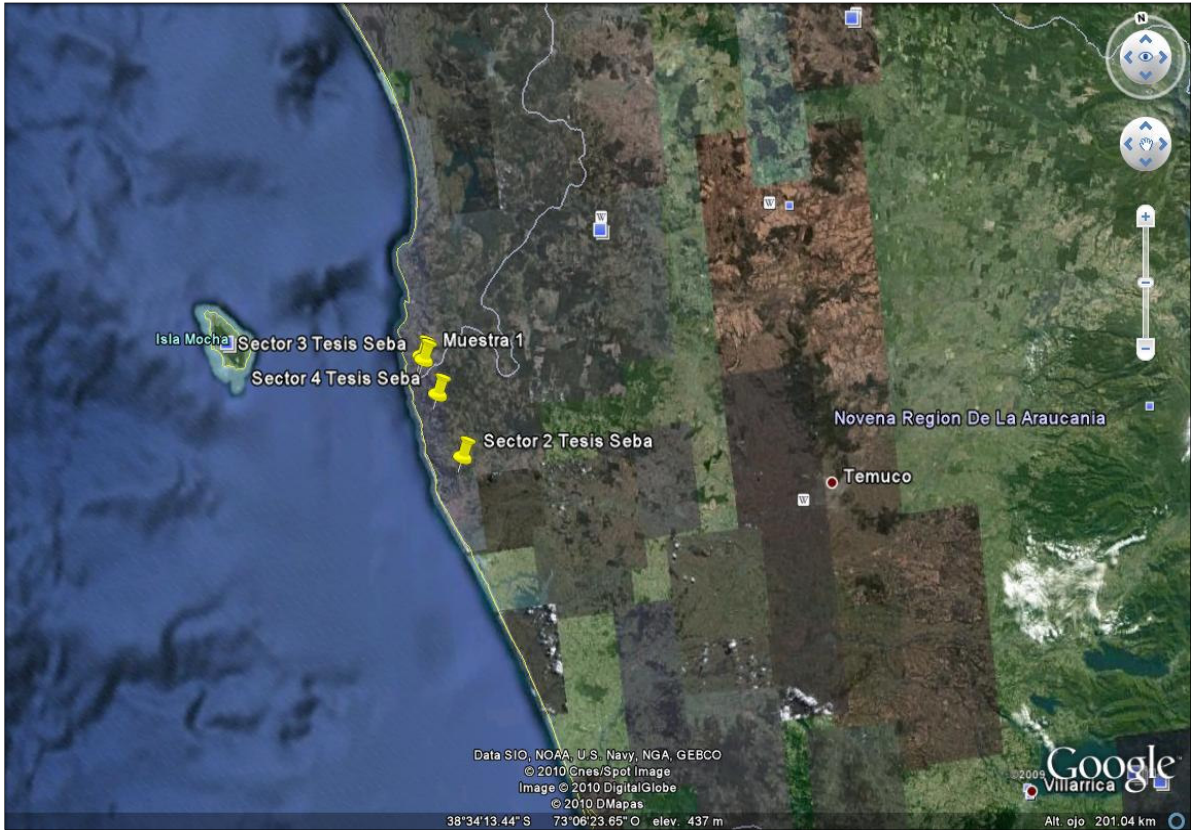


Figura 36: Ubicación Muestras Limosas

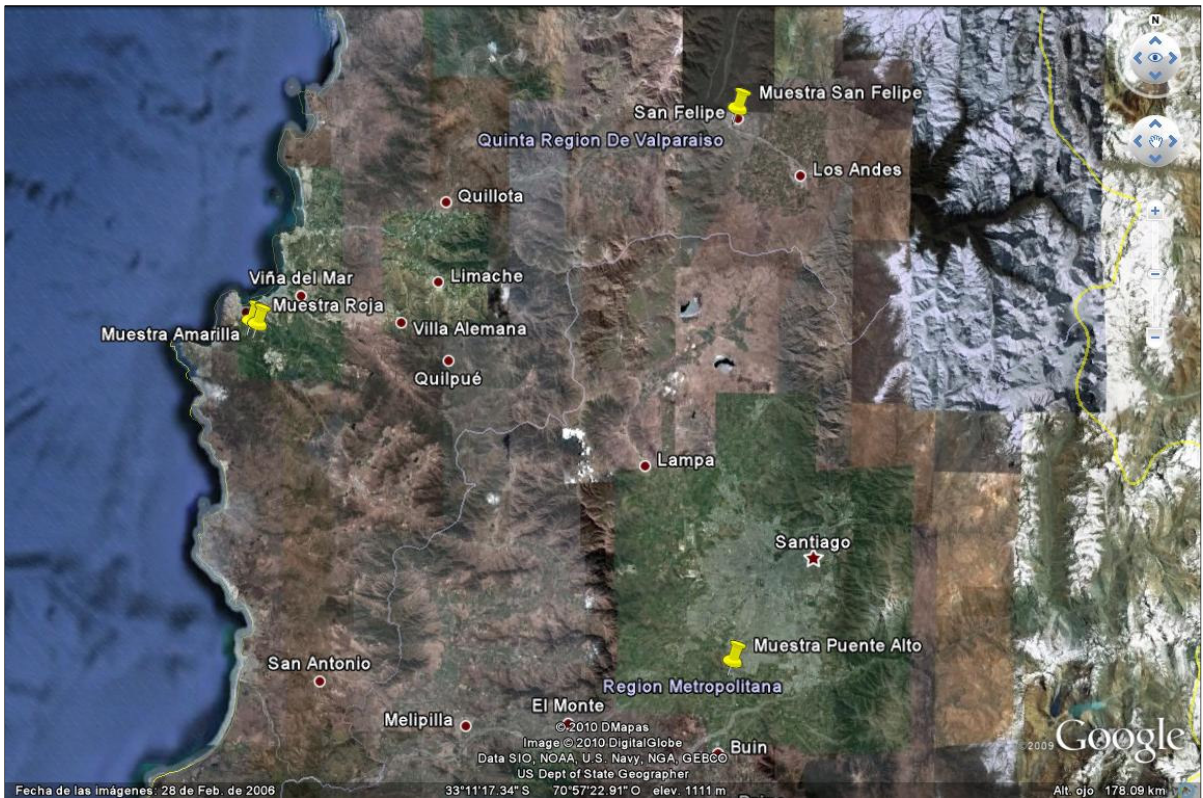


Figura 37: Ubicación Muestras Arcillosas

Todas las muestras limosas obtenidas se encuentran en el sector del camino Tirúa-Tranapunte, en el límite costero de la VIII y IX región. Las muestras arcillosas están distribuidas en el sector tanto de los valles como el sector costero de la V región y la región Metropolitana.

4.3. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS DE LAS MUESTRAS

La geología de los sectores de donde provienen cada una de las muestras ensayadas en este trabajo de título, entregan antecedentes acerca de la formación de los sedimentos y de la propensión de éstos a la erosión.

Algunas de las muestras analizadas están situadas dentro de los continentes como ocurre con las cercanas a un medio fluvial formado por la acumulación de partículas en el lecho y a ambos lados de los ríos, principalmente durante las crecidas, o el medio lacustre originado por el material sedimentado en el fondo de los lagos. Otras, se localizan en zonas costeras y sus aledaños, entre los cuales citamos las playas y los deltas formados por sedimentos del río cuando termina su curso.

Por lo general cerca de los lechos acuáticos se encuentran los materiales más gruesos y de cantos redondeados, mientras que en sectores cercanos a cordones montañosos y en valles inundables se encuentran los materiales finos y de cantos angulosos.

Teniendo en consideración estos antecedentes se incluye la descripción geológica de los sedimentos que se analizarán en el presente trabajo de título:

Geología de la Costa de la VIII y IX región

Son suelos de los órdenes Alfisoles (suelos con buen grado de evolución) e Inceptisoles (suelos de desarrollo incipiente). En el sector costero se ubican preferentemente suelos derivados de terrazas marinas altas y de relieve plano a ligeramente inclinado y de colores pardos rojizos asociados con otros de menor evolución. Estos suelos son de texturas finas y han sufrido una fuerte disección por efecto de la erosión hídrica. En los sectores de relieve abrupto de la Cordillera de Nahuelbuta los suelos son bien desarrollados, con altos contenidos de arcilla y se han originado a partir de micaesquistos (rocas de origen metamórfico).

Geología de San Felipe

Geológicamente el suelo del sitio en estudio corresponde a un depósito fluvial cubierto por un estrato de arcilla de baja plasticidad de espesor variable. Las gravas arenosas han sido depositadas

por el río Aconcagua en un amplio sector del valle, que ha sufrido el levantamiento paulatino que experimenta la placa sudamericana. El estrato de arcilla que cubre la grava se ha originado durante inundaciones en planicies ribereñas y arrastres de finos desde los cerros cercanos.

Geología de Puente Alto

El suelo corresponde a "conos de deyección" en su parte terminal a media. Estos depósitos están constituidos por materiales arrastrados por flujos ocasionales de agua de las quebradas cordilleranas y depositados por acción gravitacional. En la parte terminal dichos conos son materiales limosos o arcillosos con cierto contenido de arena y ocasionalmente presentan una estratificación horizontal debido al mecanismo de depositación.

Geología de Camino La Pólvora

La zona de Valparaíso y sus alrededores posee un relieve de cerros de altura comprendidas entre 200 y 300 m aproximadamente con quebradas profundas en las zonas de desembocadura y con una disposición radial.

Realizando un recorrido desde el interior hacia la costa, se pueden distinguir las siguientes unidades geológicas: primero se encuentra un intrusivo granodiorítico de edad paleozoica superior con algunos cuerpos intrusivos menores; a continuación se desarrolla un gneis granítico y granito néisico de transición. Esta zona constituye la aureola de metamorfismo de contacto producida por la intrusión granítica en las rocas metamórficas. Al sur del estero Marga Marga este gneis de transición tiene un ancho variable entre 1 y 5 km. Finalmente, cercanas a la playa, se encuentran rocas metamórficas de grano medio, que tentativamente se asignan al precámbrico. Estas últimas son principalmente anfibolitas y esquistos.

Las unidades presentes en este sector se encuentran, casi totalmente, cubiertas en su parte superior por roca meteorizada "in situ" en distintos grados, dando origen al suelo conocido localmente como "maicillo". Este suelo es de buena calidad para apoyar fundaciones; sin embargo es muy erosionable con el agua. Otra característica de este suelo residual, es que conserva los planos de fractura (planos de debilidades) que tenía la roca originalmente, por lo que en ocasiones se producen planchoneos de material en taludes de corte cuando dichos planos tienen una orientación que les facilita su deslizamiento. Debido a lo anterior, es posible observar en la V Región taludes estables, con inclinación bastante pronunciada, durante algún tiempo y luego ocurren fallas después de una lluvia generalmente. La experiencia ha demostrado que los taludes estables en maicillo no deben tener una inclinación superior a 45°, no por razones de resistencia del suelo en sí, sino debido a la existencia de los planos de falla antes mencionados, en donde la resistencia es más débil.

4.4. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

En los Anexos 3, 4 y 5 adjuntos, se incluyen los resultados de los ensayos de compresión no confinada (ASTM D2166), límites de plasticidad (NCh 1517/1 Of.79, NCh 1517/2 Of.79) y diámetro medio de partículas mediante la realización de ensayos de granulometría e hidrómetro (ASTM D421-58, ASTM D422-63).

El ensayo de la compresión no confinada se realiza con el fin de obtener la resistencia no drenada al corte del suelo mediante la relación

$$S_u = \frac{q_u}{2}$$

, donde:

S_u = Resistencia al corte no drenada del suelo, [unidades de presión]

q_u = Resistencia a la compresión no confinada del suelo, [unidades de presión].

Este ensayo se realiza tanto en muestras naturales como en muestras remoldeadas. Se introduce el término **sensitividad** (S_t) que se define como “la razón entre la resistencia no perturbada y la resistencia remoldeada de un suelo cohesivo para el mismo contenido de agua” (Bowles, 1996). La siguiente tabla muestra la clasificación de las arcillas según su sensitividad (Bowles, 1996):

Tabla 5: Clasificación de Sensitividad de Suelos Cohesivos

	S_t	Comentarios
No sensitiva	≤ 4	Mayoría de las Arcillas
Sensitiva	$4 < S_t \leq 8$	
Extra Sensitiva	> 8	Usar con precaución

Debido a que la resistencia a la compresión no confinada (y por ende la resistencia al corte no drenada) del suelo cambia con la humedad a la que es ensayada la muestra, se incluyen los resultados de ensayos de un mismo tipo de suelo a diversas humedades. Con esto, se obtiene una curva interpolada que relaciona la humedad de la muestra con la resistencia obtenida.

Con el propósito de relacionar la resistencia no drenada del suelo con la erosión producida en él, se determina un perfil de humedades en las probetas de suelo apenas terminado el ensayo de erosión. Con esto, se puede relacionar el volumen erosionado con la resistencia no drenada al corte, siendo esta última evaluada a la humedad obtenida al término del ensayo de erosión.

Para el caso de las demás variables, el índice de plasticidad corresponde a una diferencia de valores fijos de la humedad y se define como el rango de humedad en donde el suelo se comporta de manera plástica. El diámetro medio de partículas no depende de la humedad de la muestra, si no que del tamaño de las partículas que conforman el suelo.

4.4.1. Descripción Visual

Una primera aproximación al potencial de erosión y a las características de los taludes de los cuales se obtuvieron las muestras que se analizan en este trabajo de título, provienen de la descripción visual realizada in situ de los sectores analizados. Además, al lado de cada denominación de las muestras, se incluye el código indicado en la Tabla 4.

Sector 2, Muestra Limosa Sector Tirúa-Tranapunte (L2):

Limo fino arenoso color grisáceo, humedad media a alta, plasticidad baja, consistencia media, color grisáceo, estructura homogénea. Se nota la presencia de micas. Notable erosión incluso en cárcavas.

Sector 3. Muestra Limosa Sector Tirúa-Tranapunte (L3):

Limo arenoso de color café, plasticidad baja, humedad media, consistencia media, con gravas y gravillas de tamaño máximo 3,5", de cantos subredondeados y subangulosos, leve olor que indicaría la presencia de materia orgánica. Erosión media en un sector y bastante notable en el sector próximo a él.

Sector 4. Muestra Limosa Sector Tirúa-Tranapunte (L4):

Limo fino arcilloso, color café, consistencia media a dura, humedad media, plasticidad baja, estructura homogénea, gravillas aisladas de cantos subredondeados. Erosión baja, pequeños "camino" típicos de flujo laminar.

Sector 1. Muestra Limosa Sector Tirúa-Tranapunte (L1):

Limo arcilloso de color café anaranjado, plasticidad baja, humedad media a alta, consistencia media a dura, estructura homogénea, presencia aislada de raicillas.

Muestra Puente Alto. Muestra Arcillosa Sector Puente Alto (APA):

Arcilla fina color café oscuro, plasticidad baja, humedad media, consistencia media, estructura homogénea. Erosión nula.

Muestra San Felipe. Muestra Arcillosa Sector San Felipe (ASF):

Arcilla algo arenosa de color café oscuro a negro, humedad media, consistencia dura, plasticidad media a alta, estructura algo porosa, gravas de 2" de tamaño máximo, de cantos redondeados y subredondeados, raicillas aisladas.

Muestra Roja. Muestra Arcillosa Sector Camino La Pólvora (AR):

Arcilla arenosa de color rojo anaranjado, consistencia, dura, humedad baja, presenta varias grietas, plasticidad baja, raíces y raicillas presentes. Proceso de erosión casi nulo.

Muestra Amarilla. Muestra Arcillosa Sector Camino La Pólvora (AM):

Arcilla arenosa de color amarillo anaranjado, consistencia, dura, humedad media a baja, plasticidad baja, raíces y raicillas presentes. Signos de comienzo de proceso de erosión.

En el Anexo 6 se incluyen fotografías de los taludes de donde se obtuvieron las muestras.

4.4.2. Límites de Plasticidad

La Tabla 6 muestra los valores de los índices de plasticidad de los suelos analizados:

Tabla 6: Índices de Plasticidad de los Suelos Analizados

				Clasificación
	LL(%)	LP(%)	IP(%)	USCS
SECTOR 2 - Tirúa-Tranapunte	46	30	16	ML
SECTOR 3 - Tirúa-Tranapunte	44	33	12	ML
SECTOR 4 - Tirúa-Tranapunte	38	33	5	ML
MUESTRA1 - Tirúa-Tranapunte	43	31	12	ML
PUENTE ALTO - Puente Alto	24	16	8	CL
SAN FELIPE - San Felipe	49	19	30	CL
MUESTRA ROJA - La Pólvara	33	19	14	CL
MUESTRA AMARILLA - La Pólvara	36	19	17	CL

La clasificación USCS se realizó mediante la carta de plasticidad de Casagrande (Bowles, 1996).

Se nota una cierta tendencia de los suelos arcillosos a tener un rango de humedades en comportamiento plástico (índice de plasticidad) levemente mayor a los suelos limosos. Esto concuerda con lo graficado en la carta de plasticidad de Casagrande.

De la misma forma, existe una leve tendencia de los suelos limosos a tener un límite líquido mayor que los suelos arcillosos. Lo mismo sucede en el caso del límite plástico. Esto explica que en la carta de plasticidad los suelos limosos clasifiquen, efectivamente, como ML, debido a que un alto límite líquido combinado con un alto límite plástico (lo que produce un índice de plasticidad bajo), clasifica a los suelos como limos.

Como se muestra en la tabla anterior, los suelos analizados en el presente trabajo son todos de baja plasticidad. Esta elección no fue al azar. Como se indicó y justificó en el Capítulo 2, la erosionabilidad de los suelos depende de numerosos factores: minerología, PH del suelo, resistencia al corte, diámetro de partículas, etc. Debido a esto, y teniendo en consideración las variables del suelo que acá se analizarán, es que se intenta acotar una de ellas, para concluir acerca de cómo varían las otras propiedades, manteniendo una de éstas con valores relativamente constantes.

De las 3 variables que en este trabajo se analizarán, la plasticidad de los suelos es la más manejable. Por investigaciones anteriores, por antecedentes geológicos y por inspección visual de los suelos, se pueden obtener muestras que estén acotadas en sus límites de Atterberg. Por el contrario, la dificultad que reviste obtener muestras de suelo con resistencias no drenadas o diámetros de partículas dentro de un rango controlado, es mayor. En este caso, se opta por elegir suelos de plasticidad baja, sin que eso afecte la investigación, debido a que el intervalo de humedades que se muestran en la tabla anterior, es lo bastante amplia como para extrapolar los resultados a otras plasticidades acá no consideradas.

4.4.3. Diámetro Medio de Partículas

La siguiente tabla muestra los valores del diámetro medio de partículas obtenido de cada uno de los suelos analizados. Cabe destacar que, debido a que los suelos analizados en este trabajo de título son de granulometría fina, el diámetro medio de partículas se obtuvo mediante la combinación de 2 métodos: granulometría por el método mecánico a través del tamizado, y la granulometría a través de la decantación de los sedimentos por el método del hidrómetro.

Tabla 7: Diámetro Medio de Partículas de los Suelos Analizados

	D50 (mm)
SECTOR 2 - Tirúa-Tranapunte	0.0256
SECTOR 3 - Tirúa-Tranapunte	0.0740
SECTOR 4 - Tirúa-Tranapunte	0.0570
MUESTRA1 - Tirúa-Tranapunte	0.0145
PUENTE ALTO - Puente Alto	0.0275
SAN FELIPE - San Felipe	0.0106
MUESTRA ROJA - La Pólvara	0.0352
MUESTRA AMARILLA - La Pólvara	0.0477

Los diámetros medios de partículas no muestran una clara tendencia que diferencie los suelos arcillosos de los limosos. Las muestras arcillosas de Puente Alto y San Felipe son, en promedio, más finas que las muestras limosas. Sin embargo, esto no se nota en el caso de las muestras arcillosas “Muestra Roja” y “Muestra Amarilla” obtenidas del camino La Pólvara. Esto se basa en el hecho de que presentan gran cantidad de arena y de material grueso que viene de la descomposición de la roca madre, de donde se origina este tipo de suelo (maicillo). El suelo limoso del sector 3, tenía algunas gravillas que ponderaron en aumentar el valor del diámetro medio de partículas.

Los siguientes gráficos muestran la distribución del tamaño de partículas de cada uno de los suelos analizados:

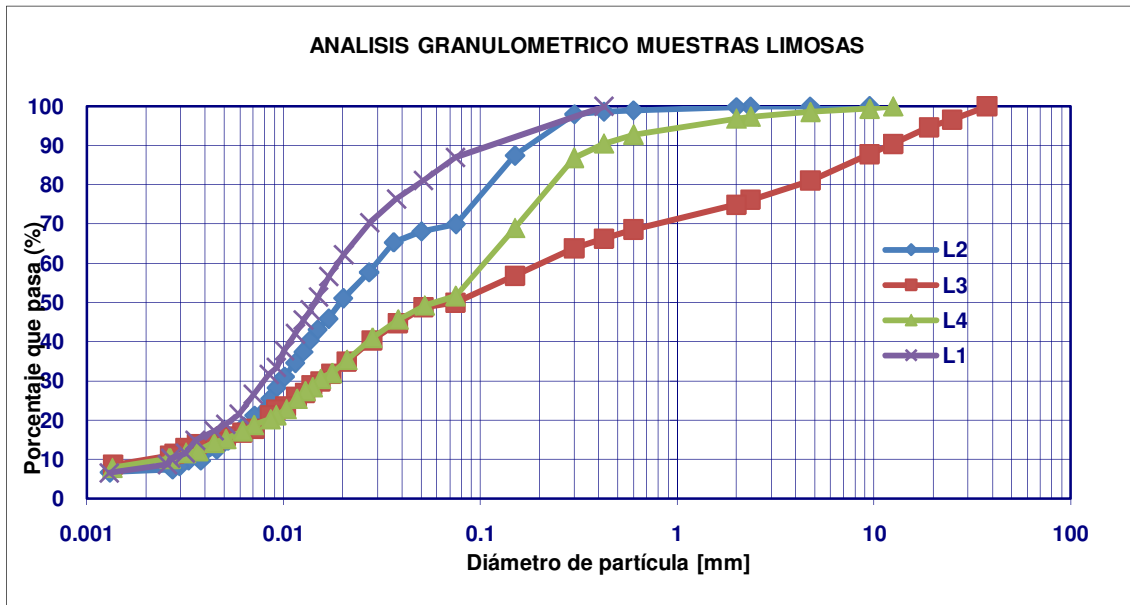


Figura 38: Distribución Granulométrica de las Muestras Limosas

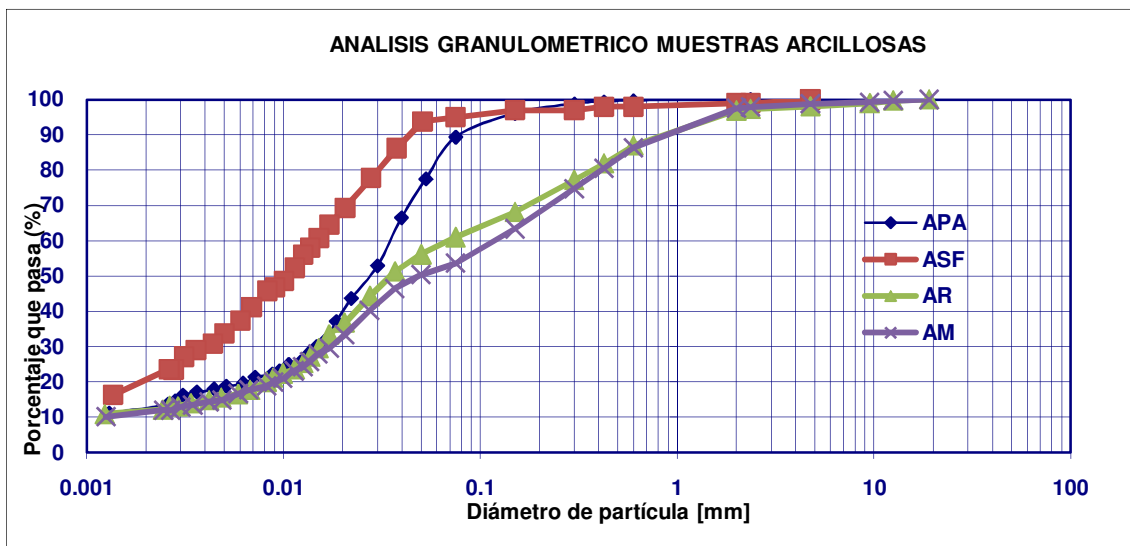


Figura 39: Distribución Granulométrica de las Muestras Arcillosas

En la distribución granulométrica de los suelos limosos, la fracción gruesa (partículas mayores a 0.075 mm) de los suelos L3 y L4 es, aproximadamente, 20% mayor que en los suelos L1 y L2. En el caso de la granulometría fina esta diferencia es menos acentuada (máxima de 10%), incluso, en la parte terminal de la curva, se nota que existen partículas de menor diámetro en las muestras L3 y L4. Sin embargo el peso específico de las partículas gruesas permite que las muestras limosas del Sector 3 y Sector 4 (L3 y L4, respectivamente) posean un diámetro medio de partículas mayor a las otras 2.

Para el caso de las muestras arcillosas, también existe una diferencia entre el tamaño de las partículas gruesas de las muestras Muestra Roja y Muestra Amarilla (AR y AM, respectivamente). En estas 2 muestras, la fracción gruesa es mayor que las muestras de Puente Alto (APA) y San Felipe (ASF) aproximadamente en un 30%. En la granulometría fina, la muestra APA es la que presenta un mayor tamaño de partículas con respecto a las otras muestras arcillosas, sin embargo, al igual que en el caso de las muestras limosas, el peso específico de la fracción gruesa de cada una de ellas, tiene una preponderancia mayor en el caso de determinar el diámetro medio de partículas.

4.4.4. Resistencia al Corte No Drenada (S_u)

Mediante ensayos de resistencia a la compresión no confinada realizados a todas las muestras de suelo, se obtuvieron los valores de la resistencia al corte no drenada que se indica en la siguiente tabla:

Tabla 8: Resistencia al Corte No Drenada

	SU NATURAL (KPa)	SU REMOLDEADA (KPa)	Humedad Natural (%)
SECTOR 2 - Tirúa-Tranapunte	69	40	48.36
SECTOR 3 - Tirúa-Tranapunte	48	66	32.84
SECTOR 4 - Tirúa-Tranapunte	40	51	33.65
SECTOR 4 2.0- Tirúa-Tranapunte	54	70	29.10
MUESTRA1 - Tirúa-Tranapunte	98	37	53.61
PUENTE ALTO - Puente Alto	28	23	23.60
SAN FELIPE - San Felipe	61	68	24.54
MUESTRA ROJA - La Pólvara	37	99	21.37
MUESTRA AMARILLA - La Pólvara	208	94	18.26

Nota: La humedad natural corresponde a un promedio entre la humedad después del ensayo de muestra no perturbada y de la muestra remoldeada.

En la siguiente Figura se grafican los datos incluidos en la Tabla 8.

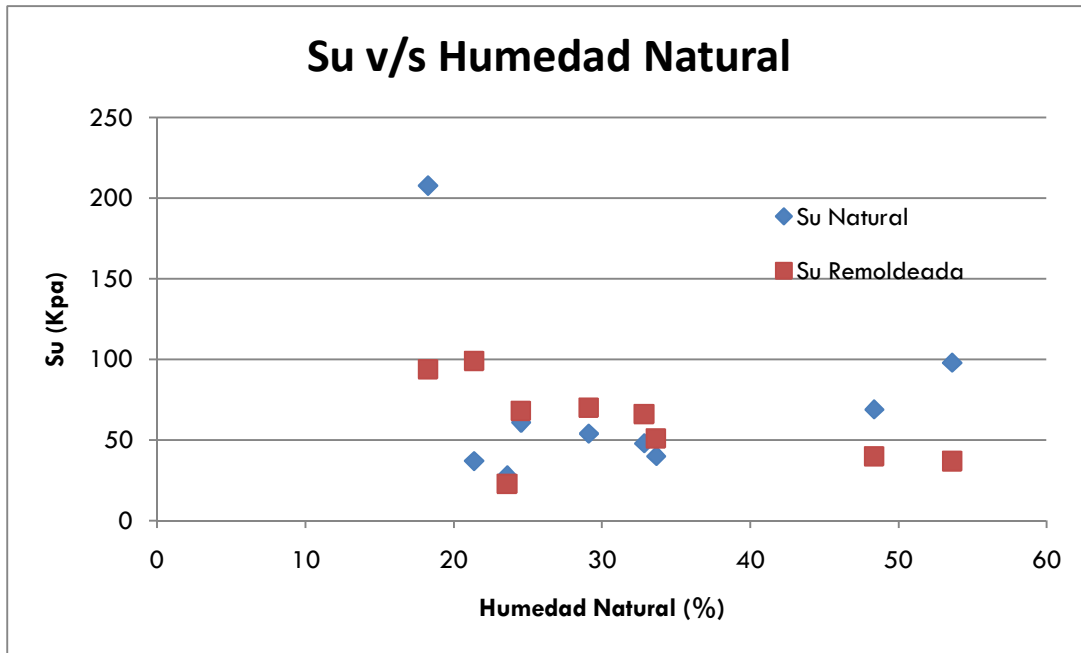


Figura 40: Resistencia al Corte No Drenada Natural y Remoldeada a Humedad Natural

En la muestra suelo obtenida del Sector 3 (L3) se aprecia un aumento de la resistencia del suelo al ser remoldeado con respecto a la resistencia natural (ambas muestras con el mismo porcentaje de humedad). Con los ensayos que se abarcan en la presente investigación, no es posible determinar la razón por la cual existe este aumento de resistencia de esa muestra al ser remoldeada. Sin embargo, la inspección visual y las fotografías tomadas en terreno, entregan una información adicional acerca de la tixotropía presentada en este suelo. En la Figura 41 se muestra el talud y, en especial, el sector de donde se obtuvieron las muestras del Sector 3 para ser analizadas en el laboratorio.



Figura 41: Talud y discontinuidades del Sector 3

En el lugar donde se obtuvo la muestra, se nota claramente la disposición horizontal de las depositaciones que formaron el suelo en este sector. Al realizar el ensayo de compresión no confinada, la falla que presenta al suelo tiene altas probabilidades de producirse en la misma dirección de las discontinuidades que presenta el talud y que, por lo tanto, hereda la muestra cilíndrica utilizada para el ensayo indicado. En el Anexo 3 se incluyen los resultados de las compresiones no confinadas con algunas fotos de las muestras ya ensayadas. En el caso de la muestra ensayada obtenida de L3, la orientación de la grieta de falla no es completamente concluyente con respecto a los horizontes de fallas mostrados en la fotografía anterior.

De la misma forma que en la muestra L3, en la muestra obtenida del sector del Camino La Pólvara (AR) se observa un aumento de en la resistencia después del remoldeado. La causa en este caso está basada en la gran cantidad de grietas que presentaba la muestra al momento de ser ensayada, debido a la baja humedad que presentaba y que habría provocada este fenómeno de fisuración.



Figura 42: Talud y Bloque Sector Muestra Roja, Camino La Pólvara

Como se explica en el acápite 4.4 la resistencia no drenada al corte depende de la humedad a la que se ensaya la muestra. Debido a que, *a priori*, no se conoce la humedad a la cual terminarán las muestras ensayadas a erosión, se debe construir una curva de la variación de la resistencia no drenada con la humedad, que permita relacionar la erosión obtenida con la resistencia no drenada (ambas a la misma humedad). La siguiente tabla muestra los resultados de las compresiones no confinadas realizadas en las muestras de suelo remoldeadas a distintas humedades.

Tabla 9: Resistencias no Drenadas a Distintas Humedades en Muestra Remoldeadas

Sector 2	Su [KPa]	Humedad[%]	Puente Alto	Su [KPa]	Humedad[%]
	40	45.99		28	26.2
	42	23.77		58	20
	34	30		21	32
Sector 3	Su [KPa]	Humedad[%]	San Felipe	Su [KPa]	Humedad[%]
	66	32.56		68	22.5
	143	20		21	28
	15	40		4	36
Sector 4	Su [KPa]	Humedad[%]	Roja	Su [KPa]	Humedad[%]
	51	31.88		99	20.27
	70	27.23		22	26
	109	20		26	32
	25	40			
Muestra 1	Su [KPa]	Humedad[%]	Amarilla	Su [KPa]	Humedad[%]
	17	27		94	20.27
	22	20		32	26
	14	34		21	32

Con estos datos tabulados, se pueden obtener curvas interpoladas de la variación de la resistencia no drenada con la humedad como se muestra en los siguientes gráficos:

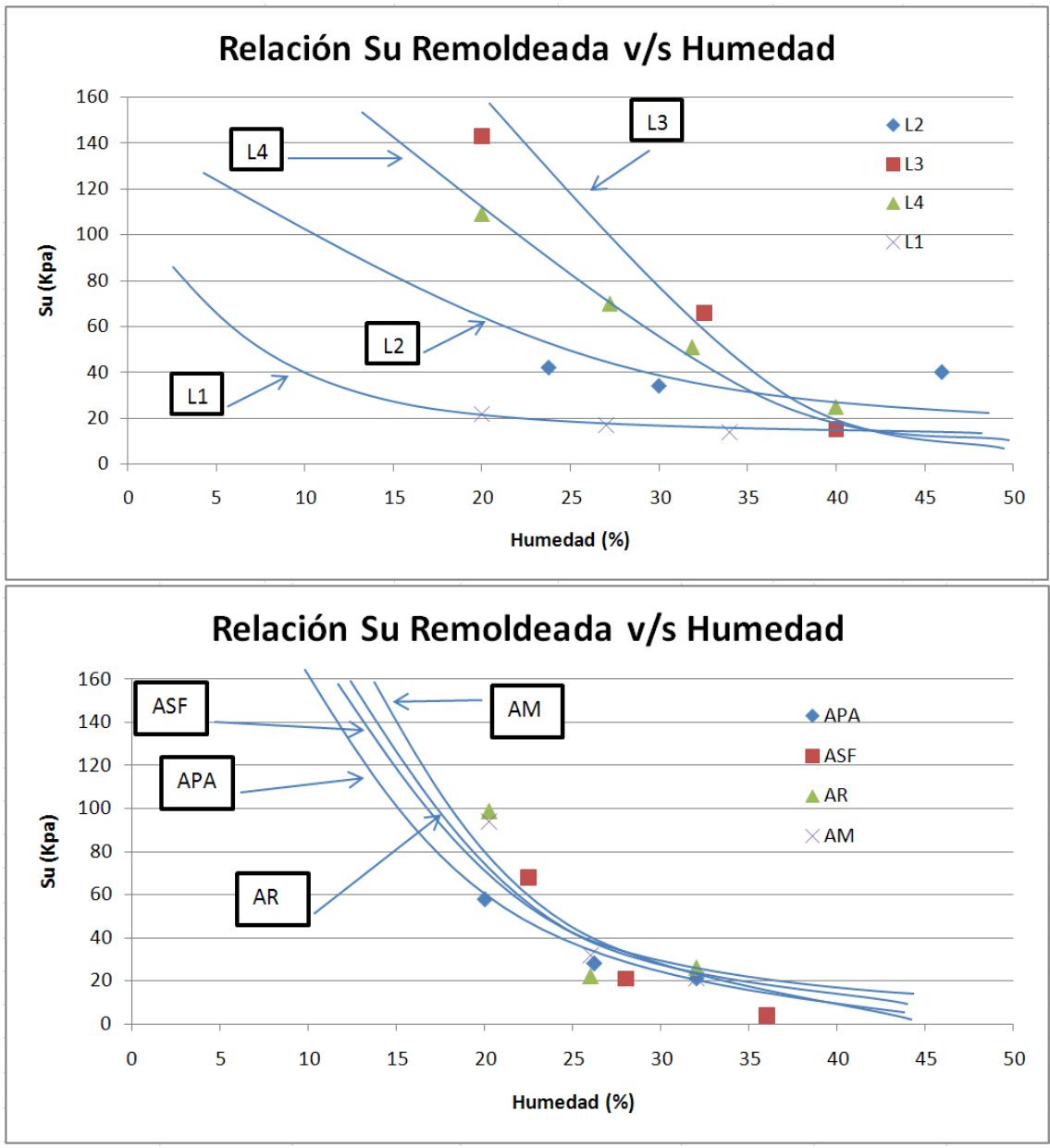


Figura 43: Relación entre S_u y Humedad en Muestras Remoldeadas

En ambos gráficos se comprueba la tendencia indicada anteriormente acerca de la disminución de la resistencia no drenada con el aumento de la humedad. Las curvas que mejor se ajustan a este comportamiento son de tipo cuadráticas, antes que lineales, debido a que las lineales inducirían un punto en que exista una resistencia nula o algunos negativos, que es un comportamiento irreal de los suelos. Sin embargo, la curva cuadrática explica de mejor manera esta tendencia, debido a que infiere una asíntota en el eje X que se traduce en que, al extrapolar las curvas, no existe una resistencia nula a contenidos de humedad muy altos.

Del segundo gráfico (variación de la resistencia no drenada con respecto a la humedad en las muestras arcillosas) se nota que las curvas de interpolación son bastantes cercanas. Del primer gráfico (variación de la resistencia no drenada con respecto a la humedad en las muestras limosas) es notoria la diferencia entre las curvas de interpolación. De este último gráfico y remitiéndonos a la Tabla 8, se concluye que la curva tiene una pendiente menor (curva más plana) en la zona de donde el valor de la humedad es menor al 35%, para las muestras que tienen un contenido de humedad natural mayor y tienen una pendiente mayor (curva más inclinada) para las que tienen un contenido de humedad natural menor. Sin embargo, una normalización de los valores a la humedad natural no da un estrechamiento de las curvas como se nota en la relación de los suelos arcillosos. En la Figura 44 se muestra esta normalización: aunque se omiten las curvas de interpolación, se nota que los valores no se agrupan como en el caso de las muestras arcillosas.

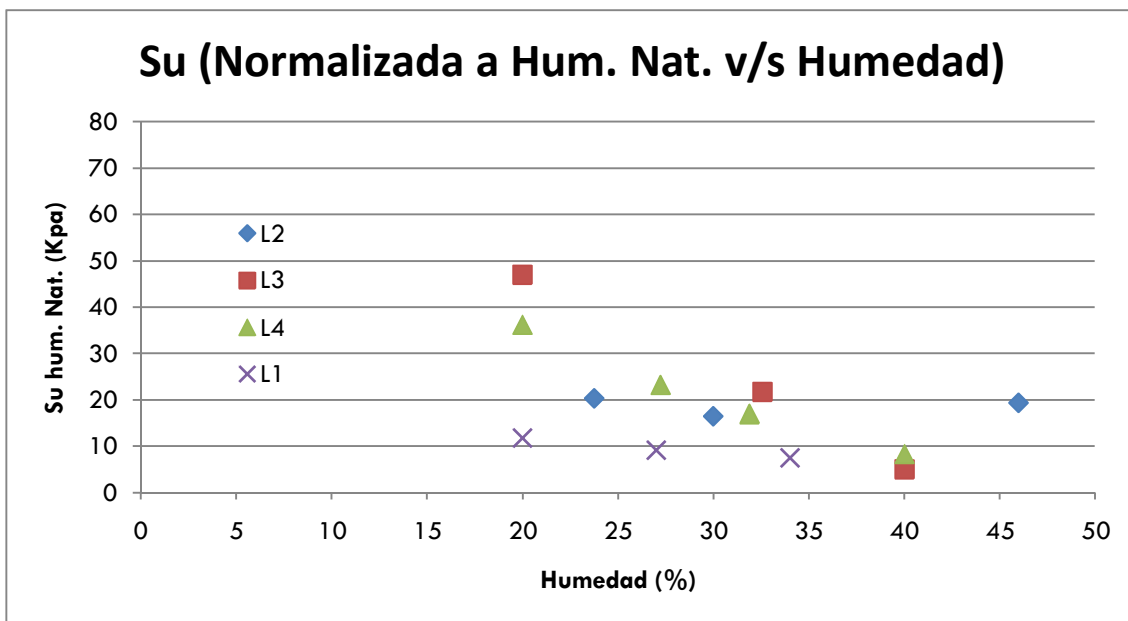


Figura 44: Relación entre S_u (normalizada a hum. nat.) y Humedad en Muestras Remoldeadas

Las relaciones anteriores han sido referidas a ensayos de resistencia a la compresión no confinada realizados en suelos remoldeados. Debido a la falta de muestras inalteradas y de muestras suficientes para el análisis de la resistencia a la compresión no confinada, es que se utiliza la siguiente hipótesis: la sensibilidad del suelo se mantiene igual en todo el rango de humedades incluido en este análisis. En la siguiente tabla se muestran las razones en las que se basa la hipótesis anteriormente descrita. En la primera columna de la tabla, se indica la resistencia al corte no drenada en muestras inalteradas a una humedad distinta a la humedad de terreno. En la segunda columna se indica la humedad a la cual fue realizado dicho ensayo de compresión no confinada. En la tercera columna se muestra la resistencia no drenada remoldeada según la interpolación graficada en la Figura 43 (a la humedad de la 2ª columna). En la 4ª columna se calcula la sensibilidad obtenida a la humedad de la 2ª columna. En la última columna, se muestra el valor de la

sensitividad calculada de los ensayos de compresión no confinada a muestras inalteradas y remoldeadas, cuando la humedad de éstas era la misma que poseían en terreno.

Tabla 10: S_u en Muestras Naturales a Humedades Distintas a la Natural

	S_u natural (KPa)	Humedad (%)	S_u remoldeada según interpolación (KPa)	Sensitividad (S_t)	Sensitividad (S_t) a la humedad natural*
Sector 2 (L2)	45	37.24	26	1.73	1.725
San Felipe (ASF)	18	30.05	19	0.94	0.90
Sector 4 (L4)	40	35.90	38	1.05	**
Sector 4 (L4)	54	30.65	56	0.96	**

Nota: *Sensitividad a la humedad natural se refiere a la razón entre la resistencia a la compresión no confinada en muestra inalterada por sobre la muestra remoldeada obtenida en el ensayo realizado en los especímenes de suelo sin cambios de contenido de agua con respecto a lo obtenido en terreno.

** La sensibilidad a humedad natural no es representativa en este suelo debido a que las humedades de las muestras naturales y remoldeadas difieren entre 3% y 4%.

Como se muestra en la tabla anterior, la sensibilidad cambia, en las muestras ensayadas, un máximo de 0.1 (muestras obtenidas del Sector 4). Debido a esto, la sensibilidad obtenida a la humedad natural de terreno para cada una de las muestras, se considera constante para cualquier humedad de ensayo. Con este antecedente, es posible construir la curva de la variación de la resistencia no drenada respecto a la humedad para muestras inalteradas, teniendo en consideración los datos de los valores de dicha resistencia en las muestras remoldeadas y los valores de la sensibilidad.

Para obtener la sensibilidad correcta en los ensayos donde la humedad de la muestra no perturbada y la muestra remoldeada son distintas, se fija el valor de la resistencia no drenada de la muestra natural y se busca el valor de la resistencia no drenada remoldeada según la Figura 43. La tabla incluida a continuación, muestra los valores de la sensibilidad calculada para cada una de las muestras.

Tabla 11: Sensitividad de las Muestras Analizadas

Sensitividad		Sensitividad	
Sector 2	1.73	Puente Alto	1.28
Sector 3	0.73	San Felipe	1.61
Sector 4	1.01	Muestra Roja	0.37
Muestra 1	2.65	Muestra Amarilla	1.3

Con estos datos se obtienen los valores y las curvas de tendencia de la resistencia no drenada al corte de las muestras naturales como se muestra en la siguiente tabla y los siguientes gráficos:

Tabla 12: Resistencias no Drenadas a Distintas Humedades en Muestras Naturales

Sector 2	Su [KPa]	Humedad[%]	Puente Alto	Su [KPa]	Humedad[%]
	69	45.99		36	26.2
	72	23.77		74	20
	59	30		27	32
Sector 3	Su [KPa]	Humedad[%]	San Felipe	Su [KPa]	Humedad[%]
	48	32.56		109	22.5
	104	20		34	28
	11	40		6	36
Sector 4	Su [KPa]	Humedad[%]	Roja	Su [KPa]	Humedad[%]
	51	31.88		37	20.27
	70	27.23		8	26
	110	20		10	32
	25	40			
Muestra 1	Su [KPa]	Humedad[%]	Amarilla	Su [KPa]	Humedad[%]
	45	27		122	20.27
	58	20		42	26
	37	34		27	32

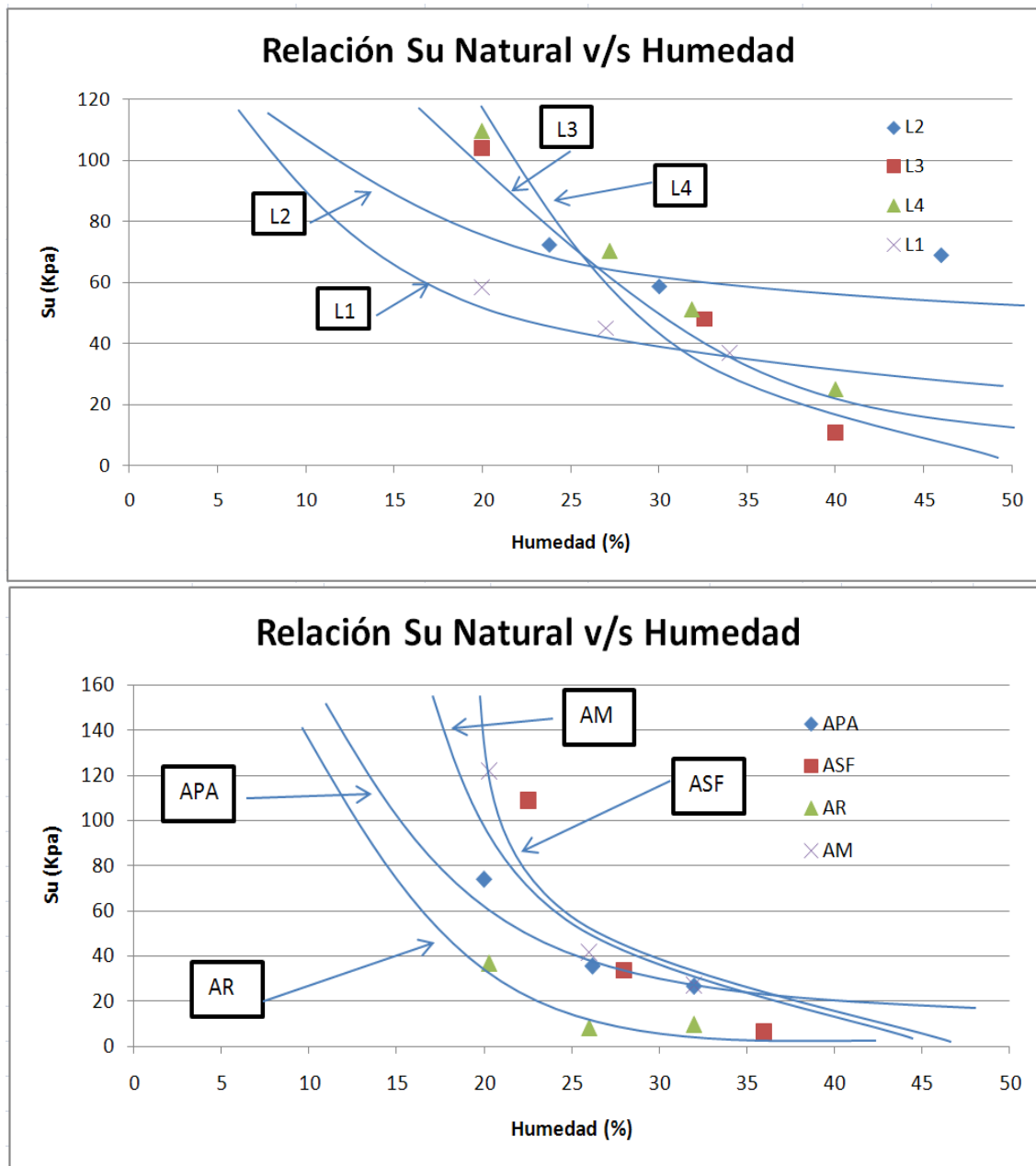


Figura 45: Relación entre S_u y Humedad en Muestras Naturales

Los gráficos siguen la misma tendencia que los desarrollados con el fin de apreciar el cambio de la resistencia no drenada con la humedad en muestras remoldeadas. Esto se condice con el hecho de que para obtener los valores de las muestras naturales, se multiplicó cada resistencia no drenada remoldeada por la sensibilidad correspondiente a cada tipo de suelo (una constante), obteniéndose la resistencia no drenada de las muestras no perturbadas. Debido a esto, las curvas mantienen las mismas pendientes que en el caso remoldeado. Sin embargo, el hecho de que las sensibilidades sean distintas en cada una de las muestras, elimina el ordenamiento por humedad natural que se logra en el caso de los ensayos realizados en probetas de suelo remoldeados (véase Figura 43).

4.5. RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Como se ha indicado anteriormente, las propiedades del suelo que afectan su potencial erosivo son variadas. Aquí se analizan 3 de ellas para ser comparadas y relacionadas con el volumen erosionado obtenido de los ensayos determinados para ello. Debido a que las variables independientes son múltiples, se propone relacionar las propiedades que acá se analizarán entre ellas, para eliminar algunos grados de libertad del sistema.

Cuando las relaciones tienen un coeficiente de correlación (R^2) mayor a 0.4 se incluye la expresión más concordante entre las siguientes: relación lineal, cuadrática, logarítmica, potencial o exponencial.

La Figura 46 muestra la relación entre el índice de plasticidad y las demás variables del suelo.

La relación entre el índice de plasticidad y las demás variables no es lo bastante precisa como para formar algún tipo de ecuación entre ellas. Sin embargo, algunas tendencias se pueden apreciar de ellas:

- En el primer gráfico se nota que el índice de plasticidad aumenta a medida que disminuye el diámetro medio de partículas. Esto es concordante con lo esperado según la clasificación de los suelos dada por la carta de plasticidad de Casagrande. Los suelos arcillosos tienen un índice de plasticidad mayor que los suelos limosos. Además, remitiéndonos al tamaño de partículas, se espera que los suelos arcillosos sean más pequeños que los suelos limosos. Debido a esto, la tendencia obtenida en este gráfico, si bien no es tan clara como para formar una relación que se exprese mediante una ecuación, concuerda con lo esperado.
- El segundo y tercer gráfico muestran la misma tendencia de un aumento de las resistencias no drenadas, tanto remoldeadas como naturales, a medida que aumenta el índice de plasticidad. Esto, al igual que el gráfico anterior, concuerda con el hecho de que el parámetro S_u representa el valor de la cohesión en el caso de ángulo de fricción nulo y es esperable que los suelos más arcillosos, por lo general, presenten una mayor cohesión que los suelos limosos. Cabe destacar que, debido a la naturaleza de sus partículas y al tamaño de éstas, en los suelos arcillosos existen fuerzas interpartículas dadas más por la atracción electroquímica (cohesión) que por la fricción entre ellas. Sin embargo, la tendencia no es tan absoluta como para determinar una expresión que se ajuste a los datos de manera rigurosa.

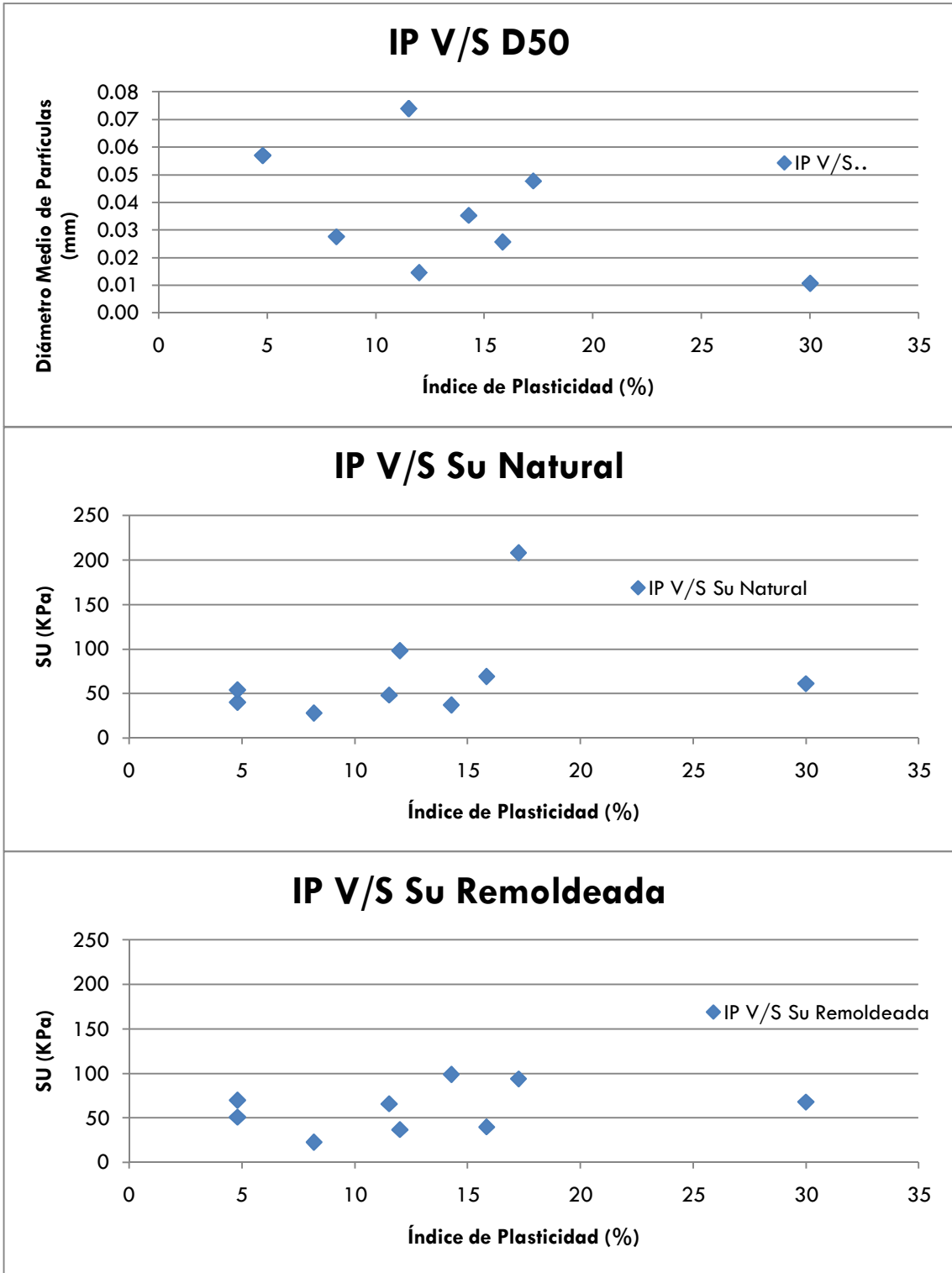


Figura 46: Relación del Índice de Plasticidad (IP) con las Otras Variables del Suelo

Los siguientes gráficos muestran la relación entre el diámetro medio de partículas y la resistencia no drenada del suelo en condiciones naturales y remoldeadas. En este caso, no se nota

una tendencia de los valores que permita determinar un comportamiento claro con respecto a las variables contrastadas. Como se indicó en el párrafo anterior, los suelos arcillosos tienden a presentar una resistencia no drenada mayor que los suelos limosos, lo que se traduciría en que esta propiedad del suelo debiera disminuir a medida que aumenta el diámetro medio de partículas. Como se muestra en la Tabla 7, existen suelos arcillosos que tienen un diámetro medio de partículas mayor que algunos de los suelos limosos, (especialmente los obtenidos del camino La Pólvara), debido a la gran cantidad de arena y partículas de roca meteorizada que presentan. Esto altera los datos de los diámetros medios de partículas y no permite correlacionar esta variable con la resistencia no drenada de buena forma.

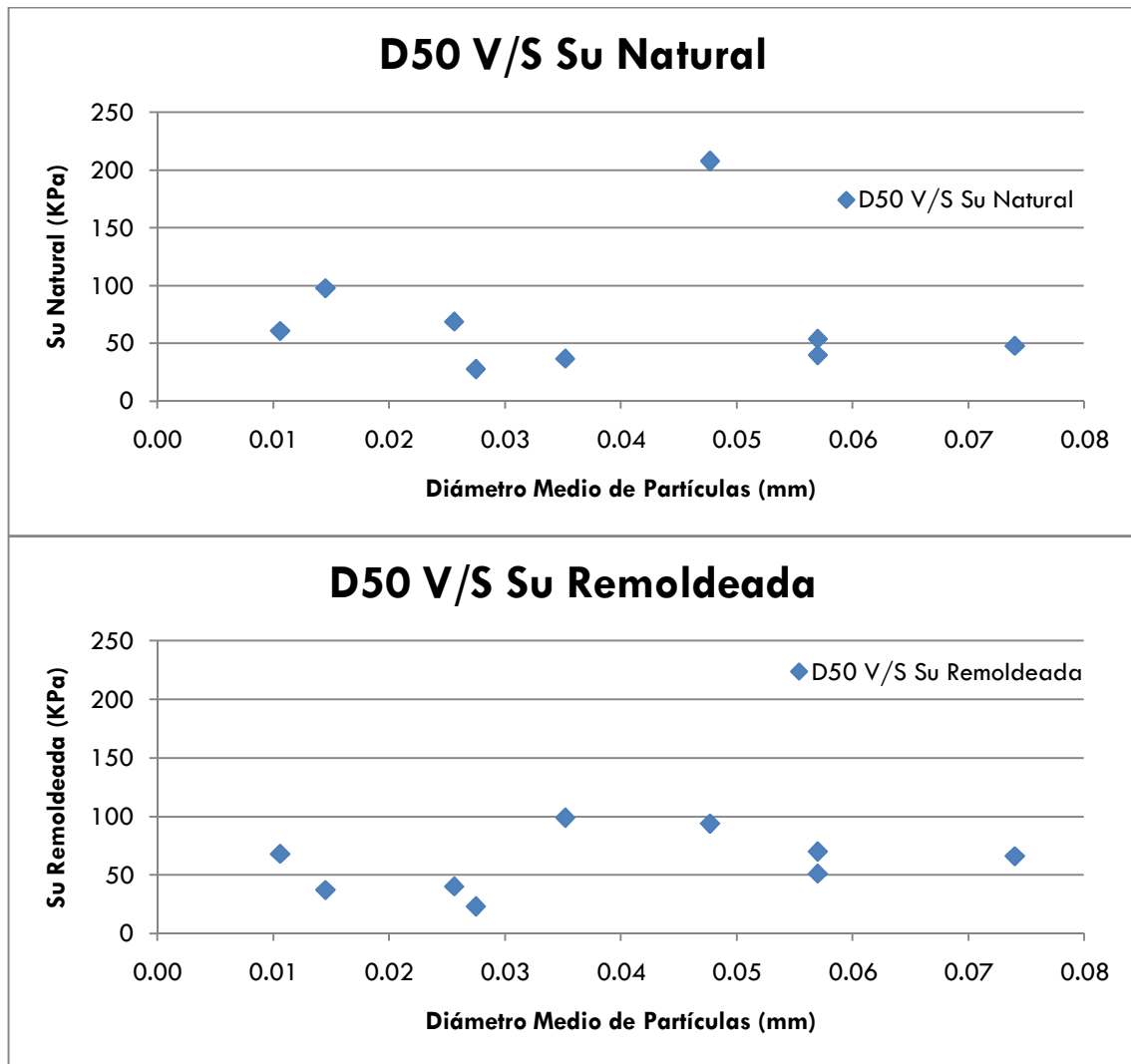


Figura 47: Relación del Diámetro Medio de Partículas (D50) con las Otras Variables del Suelo.

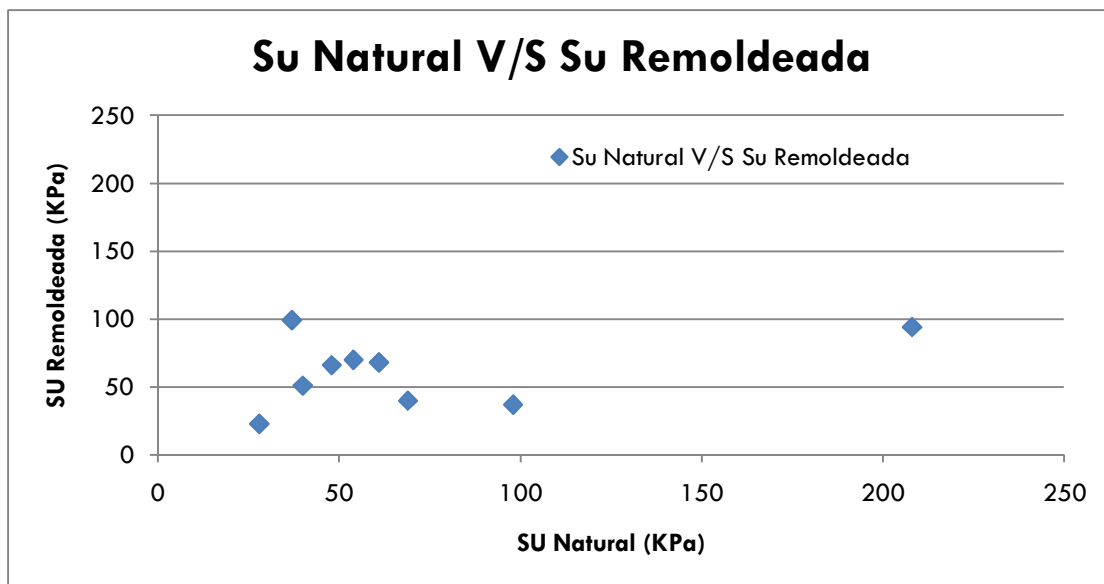


Figura 48: Relación entre Resistencias No Drenadas Naturales y Remoldeadas

El gráfico de la Figura 48 anteriormente tampoco muestra una relación entre ambas variables debido a que las sensibilidades (pendiente de la posible recta que relacionaría las variables) de los suelos son distintas en cada caso.

Como se ha mencionado con anterioridad, las propiedades de los suelos dependen de muchas variables (algunas de las cuales están incluidas en esta investigación y otras que no lo están), por lo que es muy difícil encontrar una correlación exacta o que se pueda expresar en una única fórmula. En este caso, de las 3 variables analizadas, la que tiene más variabilidad en los factores que la afectan, es la resistencia no drenada, debido a que depende de la presión de confinamiento del suelo, del índice de vacíos que presente, de las fisuras y grietas previas, de las discontinuidades que presente la roca madre que formó el suelo, de la humedad de la muestra, etc.

Debido a que los gráficos anteriores no muestran una correlación suficiente como para determinar una expresión que una las variables tomadas en cuenta, se propone incluir otra variable al análisis: la humedad de las muestras. Si bien la cantidad de agua presente en el suelo no es una de las variables consideradas desde un principio, y no será analizada en profundidad en esta investigación, se estima necesario relacionarla con las propiedades del suelo que dependen de ella. Los siguientes gráficos muestran las relaciones obtenidas entre algunas de las propiedades del suelo analizadas a humedades específicas.

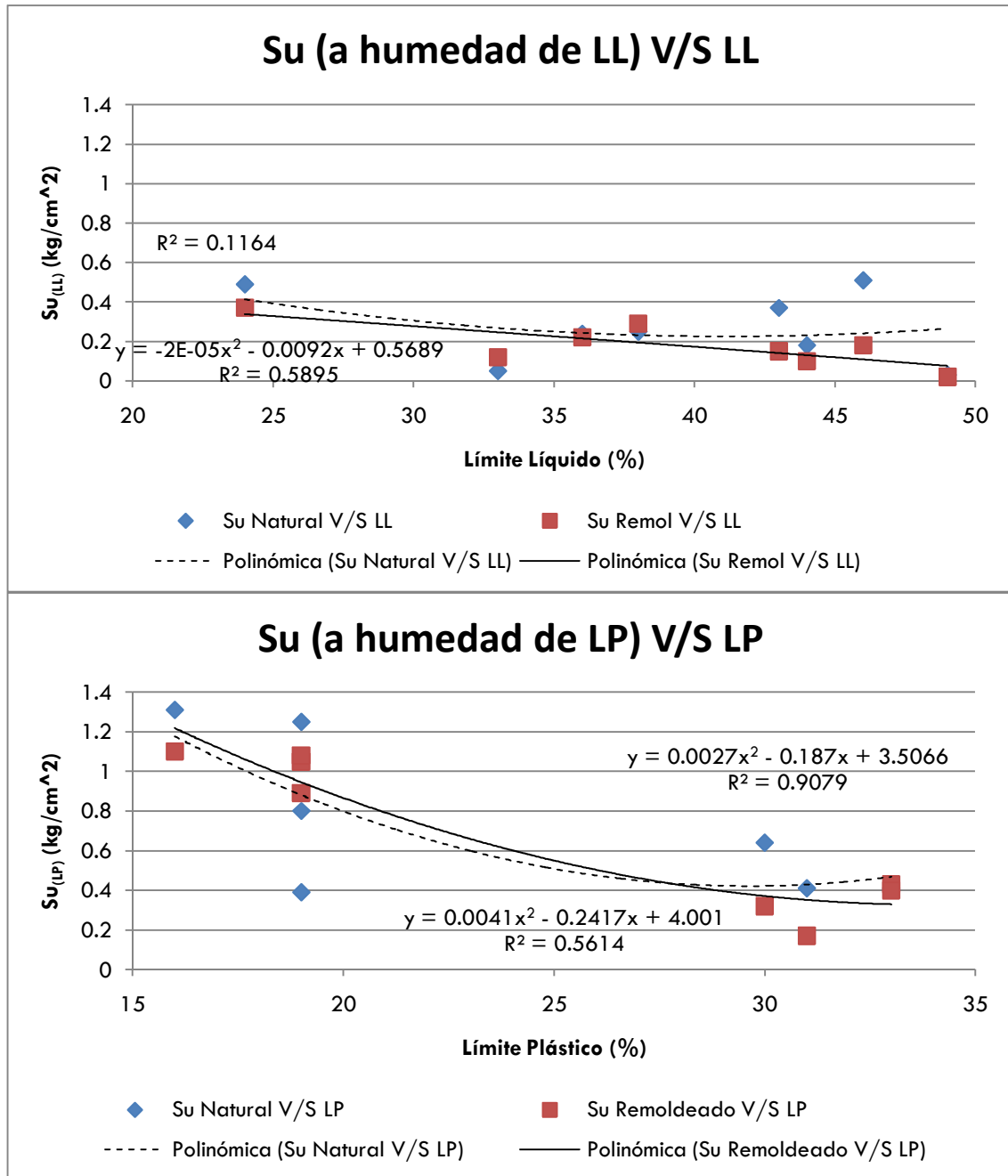


Figura 49: Relación de la Resistencia No Drenada con los Límites de Atterberg

En el primero de los gráficos, se muestra la variación de las resistencias no drenadas del suelo, tanto remoldeadas como naturales, a la humedad del límite líquido versus el límite líquido de las muestras. Se nota que la relación mejora bastante con respecto a las anteriormente desarrolladas. Lo mismo sucede en la relación con el límite plástico y las resistencias no drenadas a esta humedad. Las resistencias no drenadas a las humedades indicadas (humedad del límite líquido o límite plástico) se obtuvieron según los gráficos de las Figuras 43 y 45.

En ambos gráficos se nota mejor correlación en las muestras remoldeadas que en las naturales. Esto se basa en el hecho que los ensayos para obtener los límites de plasticidad son, de hecho, un remoldeo de los suelos, por lo que la correlación debiera ser mayor en este caso.

Los Gráficos de la Figura 50 muestran la relación de los límites de Atterberg con las resistencias no drenadas del suelo a humedad natural de las muestras. Se nota claramente, que las correlaciones son bastante menores que en el caso anterior, debido a que se están comparando 2 variables que dependen de la humedad (los límites de Atterberg representan, de hecho, una humedad), pero a distintos valores de ésta, por lo que la correlación es bastante pobre. En este caso no existe, siquiera, una tendencia de que las muestras remoldeadas o las naturales tengan mejor correlación que la otra. Es más, al contrario de los gráficos anteriores, en el caso del gráfico con respecto al límite líquido el ajuste de los datos es mejor que en el caso del límite plástico.

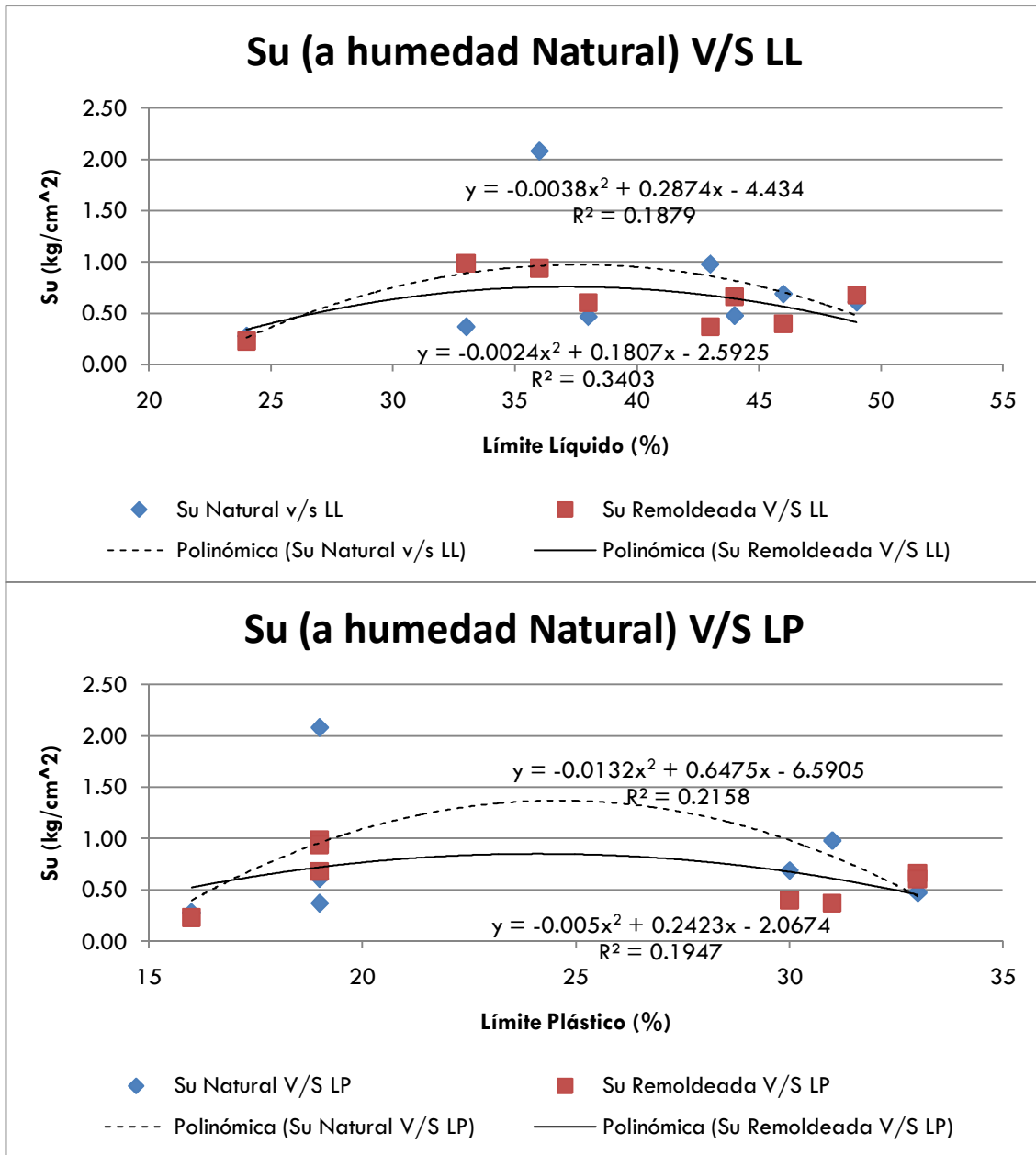


Figura 50: Relación de Resistencia No Drenada a Humedad Natural con los Límites de Atterberg

CAPÍTULO 5. ENSAYO DE EROSIÓN SUPERFICIAL

5.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo presenta las condiciones en las que se realiza el ensayo de erosión superficial, el procedimiento del ensayo, los caudales utilizados, la altura del flujo y procesamiento de los datos.

Se muestra este capítulo a modo de introducción a los resultados obtenidos de los ensayos de erosión superficial incluidos en el capítulo siguiente.

5.2. CONDICIONES Y PARÁMETROS DEL ENSAYO DE EROSIÓN

Los siguientes son los parámetros utilizados en el ensayo de erosión:

Caudal: Se utilizaron 2 caudales de ensayo según la calibración realizada en el variador de frecuencias que se indica en el Capítulo 3. La elección de los caudales, se basó en el hecho de que se produjera una erosión visible con uno de ellos (el menor) y otro que produjera una erosión masiva en las muestras. La calibración de la erosión, se realizó ensayando probetas de prueba de los sectores de San Felipe y Sector 4 que, a priori, podrían ser los menos y más erosionables, respectivamente: San Felipe debido a su alta plasticidad y el Sector 4 debido al tamaño de sus partículas que parecían ser de arena fina (revisión visual) que, según la revisión bibliográfica, serían los suelos más erosionables. Los caudales utilizados fueron los siguientes:

- 17.1 Hz equivalentes a 10.18 litros por minuto
- 24.3 Hz equivalentes a 24.39 litros por minuto

Pendiente: La pendiente utilizada en los ensayos de erosión es de 45°. La razón de la elección se basa, principalmente, en evitar el efecto de transporte de partículas por gravedad más que por el flujo superficial de agua (véase Capítulo 2).

Agua: Agua potable común.

Esponja: La esponja utilizada es una de 10 kg/m³ de densidad. Se optó por la esponja de menor densidad, debido a que esta barrera para el caudal tiene como objetivo principal distribuir el flujo

por todo el ancho del canal, para producir el flujo uniforme descrito en el Capítulo 3. Una esponja de mayor densidad, acumulaba una altura de agua tras ella, produciendo un flujo de dado más por la altura de agua que por el caudal de salida efectivo inducido por el variador de frecuencias en la bomba. Antes de la realización del ensayo, la esponja es saturada (empapada) en agua, para permitir que el flujo pase inmediatamente a través de ella al inicio del ensayo.

5.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para la realización del ensayo de erosión se sigue la siguiente secuencia de pasos:

1. Saturación de la esponja. Colocación de ésta en el lugar del canal provisto para ello.
2. Preparación y tallado de la muestras a la misma humedad de terreno (no se le induce cambio de humedad a la muestra a ensayar).
3. Colocación de la probeta de suelo en el orificio del canal. Se procura que la superficie expuesta al flujo del agua, sea la misma que estaba expuesta en el talud natural.
4. Lectura inicial de datos de la probeta de suelo a ensayar.
5. Fijación de la frecuencia correspondiente al caudal a utilizar en el ensayo.
6. Conexión de la bomba (motor) al variador de frecuencias. Encendido del variador de frecuencias.
7. Giro del sistema de subida de muestra a medida que se va erosionando el espécimen ensayado.
8. Apagado del variador de frecuencias a los 5, 10, 20 y 40 minutos para realizar las correspondientes lecturas de los perfiles de la muestra erosionada. En el caso de algunas de las muestras remodeladas se agregaron lecturas a los 1 y 3 minutos.
9. La medición termina cuando se produce un desplazamiento del espécimen de suelo dentro de la caja de acrílico, ó cuando se produce un desprendimiento excesivo de la masa de suelo dentro de la caja de acrílico, ó cuando se cumplen 40 minutos de ensayo, lo que ocurra primero.
10. Medición de un perfil de humedades final que recopila la cantidad de agua en el suelo en los 3 primeros centímetros de la muestra que estuvieron expuestos al flujo de agua. La humedad final de la muestra se obtiene como el promedio de estas 3 humedades.
11. Análisis de los datos (volumen erosionado, gráficos de volumen versus las variables indicadas)

Además del procedimiento estándar indicado anteriormente, se tomaron lecturas de la altura del flujo de agua en 3 ensayos realizados con el primer caudal y 3 ensayos realizados con el segundo caudal. Esta medición se hizo con una regla con una precisión de medición de 0.5 mm. Para el

primer caudal, se obtuvo una altura de flujo promedio de 1.08 mm (2 mediciones de 1.0 mm y una medición de 1.25 mm); para el segundo caudal, se midió una altura de flujo promedio de 1.58 mm (2 mediciones de 1.5 mm y una medición de 1.75 mm). Teniendo en cuenta estos datos, y remitiéndose al acápite 3.4.3, se pueden obtener los siguientes esfuerzos de corte para cada uno de los caudales analizados:

$$\tau = \gamma R_h J$$

$$\begin{aligned} \text{1er Caudal: } h &= 0.108 \text{ cm, } \gamma = 980 \text{ kg/s}^2\text{cm}^2, R_h = 0.10742 \text{ cm, } J = 1 \\ \tau &= 0.107 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2do Caudal: } h &= 0.158 \text{ cm, } \gamma = 980 \text{ kg/s}^2\text{cm}^2, R_h = 0.15676 \text{ cm, } J = 1 \\ \tau &= 0.157 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

5.4. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El procesamiento de los datos se realiza de varias formas. Primero, los datos son traspasados a una planilla Excel® diseñada especialmente para este fin. En este caso, no es suficiente sólo anotar las diferencias de las cotas de los pasadores metálicos en 2 distintos tiempos, si no que es necesario sumarle, a cada medición, el efecto del giro del tornillo. A continuación se muestra la planilla utilizada para este fin.

Tabla 13: Planilla de Ingreso de Datos de Erosión

		t=0	t=	t=	t=	t=	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1						t=	
	2						t=	
	3						t=	
	4						t=	
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							
Perfil 2	1						ENSAYO N°	
	2						FECHA	
	3						HORA	
	4						DESCRIPCIÓN	
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							
Perfil 3	1						OBS	
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							

En la planilla se pueden almacenar los datos medidos en cada uno de los pasadores metálicos, el tiempo en que se realizó la medición, las vueltas dadas a la tuerca en los tiempos indicados, anotar

los datos básicos del ensayo y alguna observación que sea de interés para el futuro análisis. Todas las mediciones realizadas se incluyen en el Anexo 7.

El segundo paso consiste en confeccionar gráficos mediante el software Surfer® de Golden Software. Este programa está diseñado para el uso en labores de topografía o de modelo de superficies, y sirve para presentar, gráficamente, los datos obtenidos en este trabajo de título. Debido a la cantidad de ensayos de erosión realizados, se incluyen sólo algunos de éstos graficados en el programa Surfer® que sirvieran como patrón de comparación con fotografías tomadas en el momento del ensayo. La elección de los perfiles graficados, se basa en el hecho de mostrar algunos que hayan presentado gran erosión y otros que hayan presentado un volumen erosionado menor.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente capítulo es mostrar los resultados obtenidos en los 32 ensayos de erosión realizados en las muestras de suelo ya mencionadas en la Tabla 4. Se pretende reconocer que: los resultados entregados por el equipo estén de acuerdo a lo esperado, que la metodología de trabajo sea válida, que las modificaciones realizadas al equipo produzcan el mejoramiento necesario para aumentar la precisión en la entrega de datos y que los parámetros controlados en el equipo (pendiente y caudal) hayan estado en rangos tales que permitan reproducir de manera similar la realidad. Se espera, además, obtener resultados que permitan concluir acerca de los objetivos planteados en el presente trabajo de título.

Los datos que se entregan en este capítulo se refieren, primero, a la evolución de la erosión con respecto al tiempo. Luego, se incluyen los valores del volumen erosionado total al finalizar el ensayo de todas las muestras, incluyendo fotografías y perfiles realizados mediante Surfer ® de algunas de las probetas ensayadas.

6.2. ENSAYOS DE EROSIÓN

6.2.1. Muestras Naturales

La siguiente tabla y el siguiente gráfico muestran la evolución de la erosión de las muestras de suelo en condición no perturbada obtenidas con un caudal de 10.18 litros/minuto.

Tabla 14: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm³) en Muestras Naturales, 1er Caudal

Tiempo [min]	5	10	20	40
Muestra				
L2	7.22	29.19	34.08	50.23
L3	3.34	14.22	17.11	20.93
L4	12.80	20.70	25.47	34.78
L1	2.89	7.11	17.37	25.52
APA	18.46	41.93	66.48	73.37
ASF	10.56	12.45	13.45	16.79
AR	37.37	50.15	59.26	76.26
AM	12.71	12.90	13.00	15.26

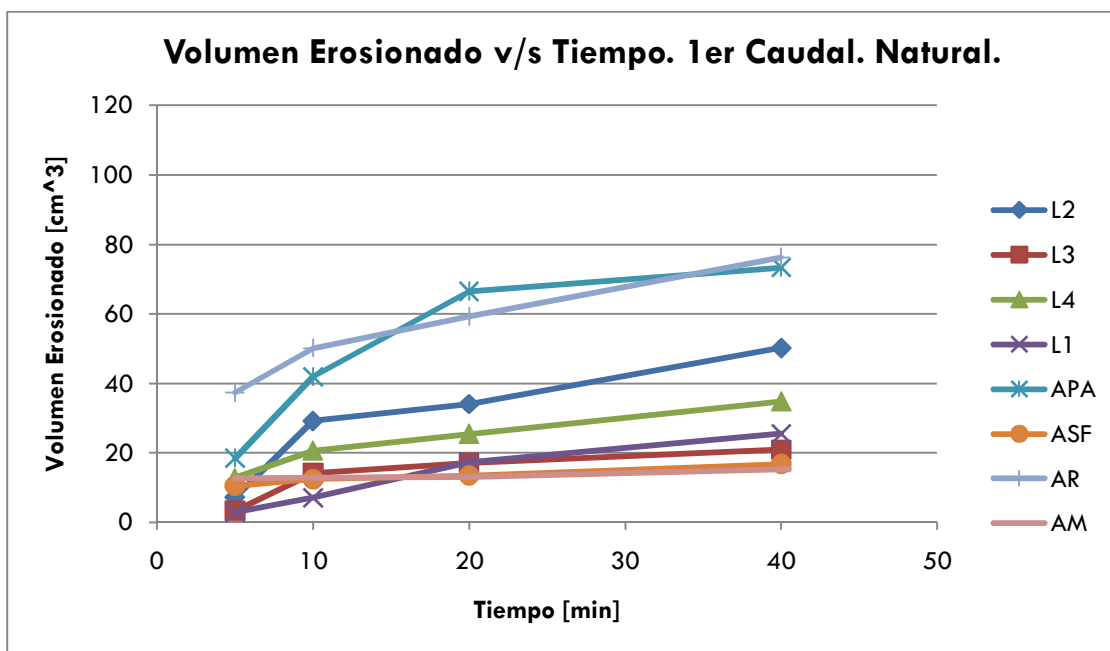


Figura 51: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm³) en Muestras Naturales, 1er Caudal

De la misma forma se pueden mostrar los resultados del volumen erosionado para el segundo caudal de 24.39 litros/minuto.

Tabla 15: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm³) en Muestras Naturales, 2do Caudal

Tiempo [min]	5	10	20	40
Muestra				
L2	14.24	16.35	50.13	63.90
L3	7.41	8.75	13.52	24.45
L4	3.44	5.11	8.00	13.56
L1	6.22	13.15	17.48	27.30
APA	39.27	49.83	60.61	87.65
ASF	8.92	13.25	15.47	24.85
AR	45.30	65.68	74.90	97.92
AM	11.68	18.56	29.01	40.68

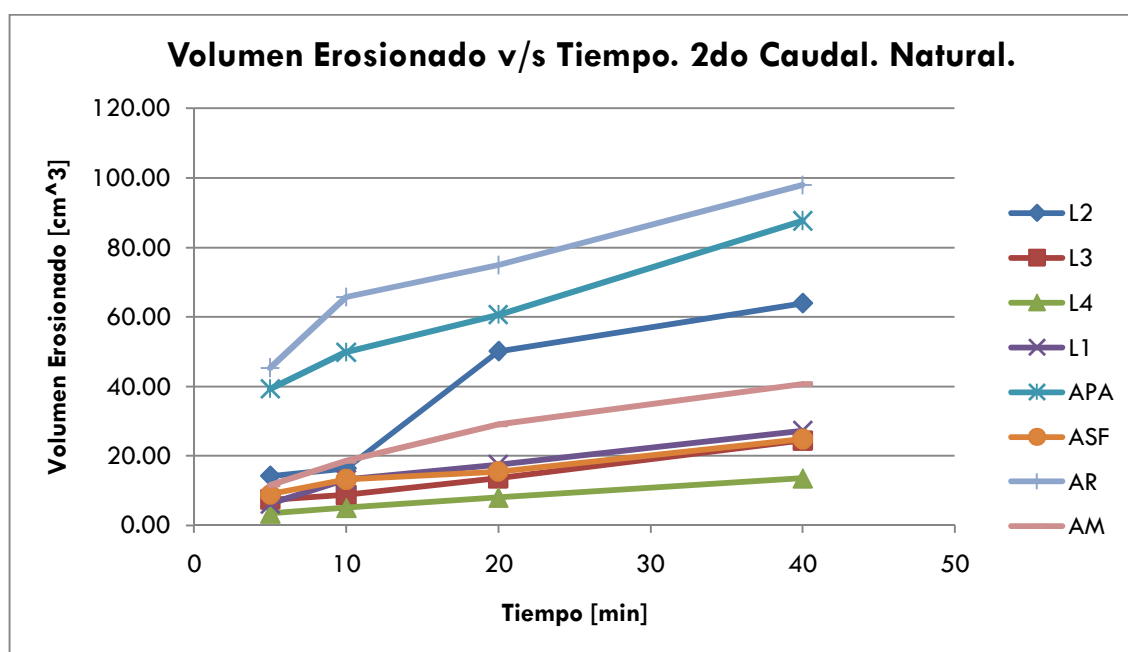


Figura 52: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm³) en Muestras Naturales, 2do Caudal

6.2.2. Muestras Remoldeadas

De la misma forma que para el caso de las muestras naturales, se incluye un gráfico y una tabla que muestra la evolución del volumen erosionado en el tiempo para las muestras remoldeadas. En este caso, la mayor parte de las muestras es erosionada casi totalmente antes de los 40 minutos (que

se tiene como tiempo límite máximo de ensayo), lo que se manifiesta tanto en las Tablas 16 y 17 con la simbología (--) y en los gráficos de las Figuras 53 y 54 con el término de las curvas de progresión de la erosión, antes de los 40 minutos. En el Anexo 7, donde se incluye el detalle de las mediciones de erosión, se explica en cada caso, la razón del término prematuro del ensayo.

Tabla 16: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm^3) en Muestras Remoldeadas, 1er Caudal

Tiempo [min]	5	10	20	40
Muestra				
L2	126.88	439.54	--	--
L3	2.11	5.11	55.27	188.74
L4	94.26	124.48	210.21	--
L1	166.31	447.76	--	--
APA	63.64	185.75	319.41	--
ASF	37.26	47.82	58.60	85.64
AR	96.34	136.56	177.56	210.68
AM	5.78	10.04	14.04	33.94

En la tabla anterior se muestran espacios sin datos de volumen erosionado (--) que indican que los ensayos terminaron antes de la medición correspondiente a ese tiempo.

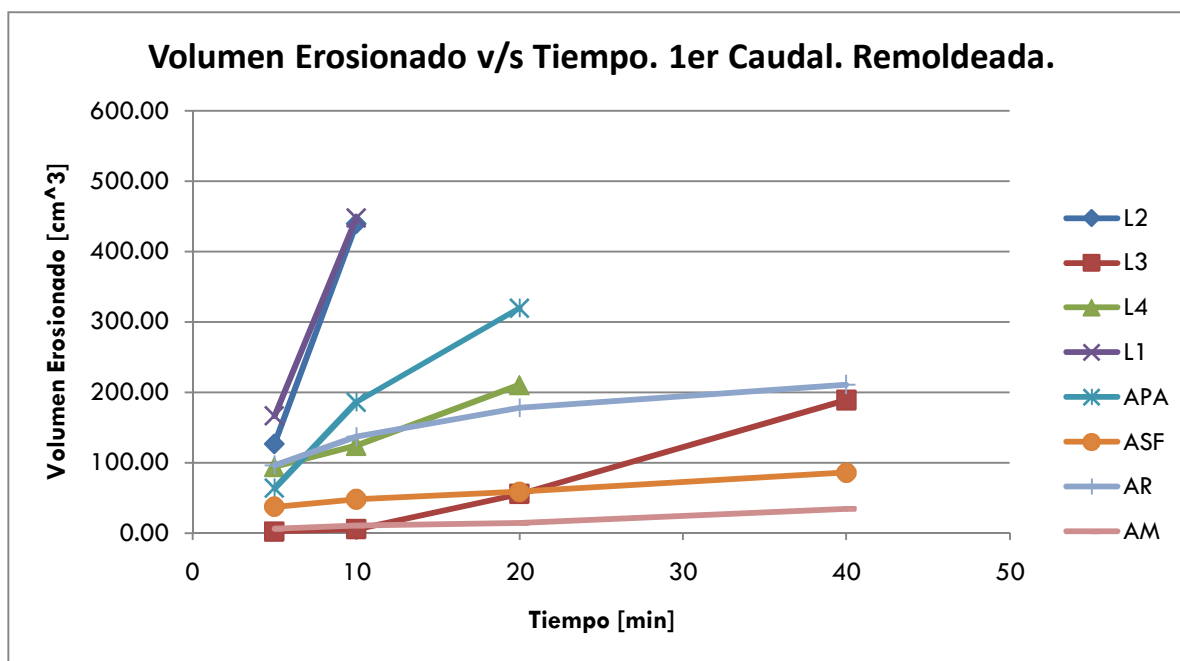


Figura 53: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm^3) en Muestras Remoldeadas, 1er Caudal

Al igual que en las muestras naturales también se incluyen los resultados para un caudal de 24.39 litros/minuto. Sin embargo, debido a que la potencia del caudal produce que algunas muestras tengan una erosión mayor en pocos segundos, se incluyen mediciones a los 1 y 3 minutos. Al igual que en el caso del primer caudal, la Tabla 17 (que incluye el volumen erosionado a través del tiempo en el caso del segundo caudal), se incluye la simbología (--) para indicar en los tiempos donde no se realizó medición de volumen. En este caso, existe esta simbología en tiempos de uno y tres minutos, correspondiendo, en esos casos, a una medición no realizada en dichos tiempos de ensayos, basado en el hecho de que no existía una erosión visible en las muestras como para incluir dichos datos. Al igual que en el caso de la Tabla 16, las mediciones no realizadas para tiempos posteriores, indican que el ensayo terminó previo a dicho tiempo.

Tabla 17: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm³) en Muestras Remoldeadas, 2do Caudal

Tiempo [min]	1	3	5	10	20	40
Muestra						
L2	116.53	406.57	--	--	--	--
L3	--	--	5.04	52.01	253.34	--
L4	--	--	55.60	311.37	--	--
L1	32.04	227.46	559.72	--	--	--
APA	231.42	458.76	--	--	--	--
ASF	--	--	15.93	49.26	94.04	119.48
AR	126.62	479.83	--	--	--	--
AM	--	--	0.04	0.07	7.81	24.70

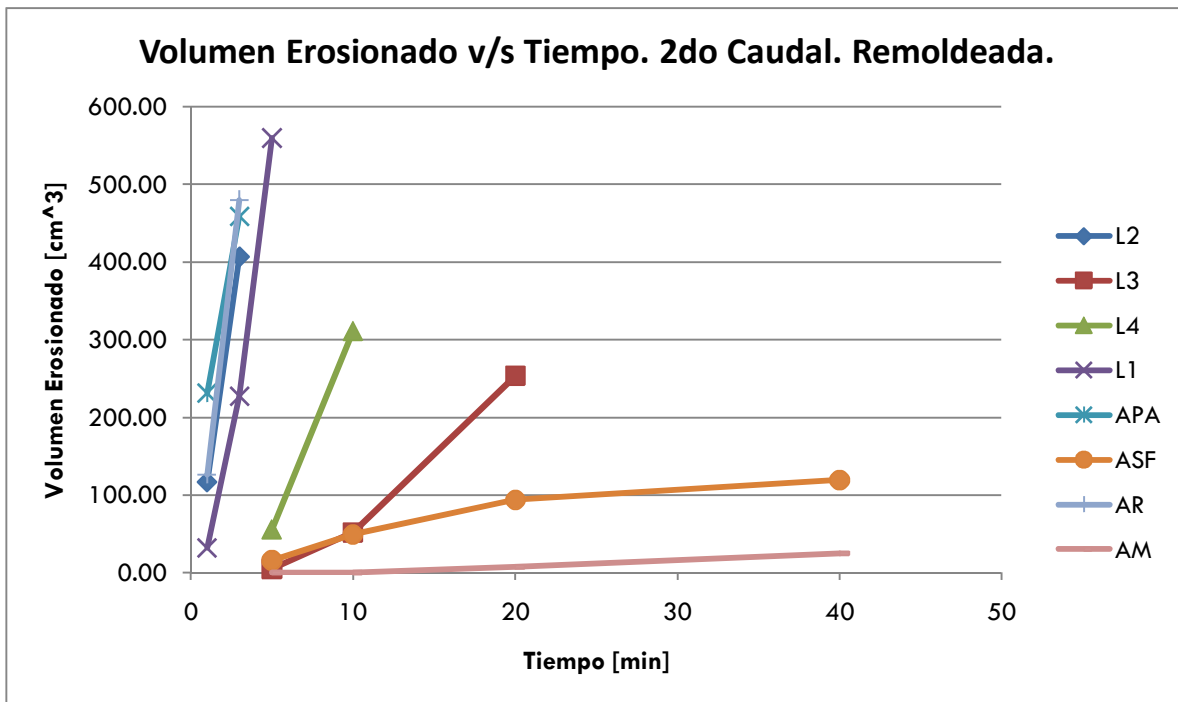


Figura 54: Evolución en el Tiempo del Volumen Erosionado (en cm³) en Muestras Remoldeadas, 2do Caudal

El gráfico de la Figura 54 muestra la evolución en el tiempo del volumen erosionado para el ensayo realizado con el segundo caudal. En este caso, al igual que en el gráfico de la Figura 53, algunas de las curvas no tienen datos hasta los 40 minutos, debido a que el ensayo terminó antes de dicho tiempo, según las causas expuestas en el Anexo 7.

De las muestras naturales, 2 son graficadas en el software Surfer ® para compararlas con las fotografías tomadas en el momento de los ensayos. Estas son: la muestra del Sector 4 (que es una de las muestras que presenta una baja erosión) y la muestra Roja del Camino la Pólvara (AR) que, en el ensayo con el primer caudal, presenta una grieta central producida por el flujo de agua.

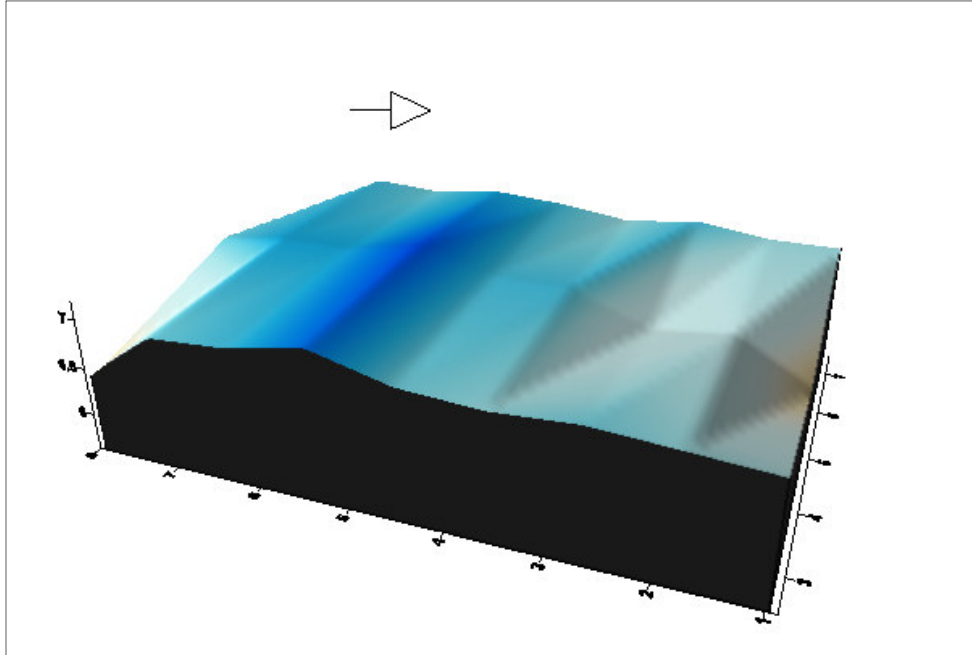


Figura 55: Erosión en Muestra Natural, Sector 4, 1er Caudal

Tanto en la representación gráfica como en la fotografía tomada al momento de finalizar el ensayo, se nota la poca erosión que produjo el caudal de agua en esta muestra. Sólo se muestran pequeñas irregularidades y un gasto levemente mayor en el momento de encuentro entre el flujo de agua y la muestra (flecha indica la dirección del flujo de agua; ambas, fotografía y representación gráfica tienen la misma orientación).

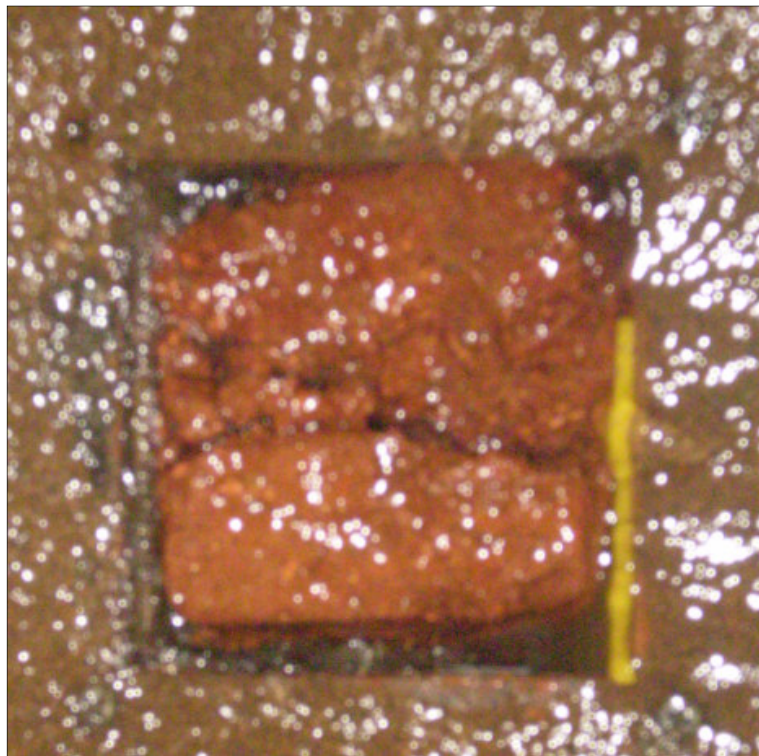
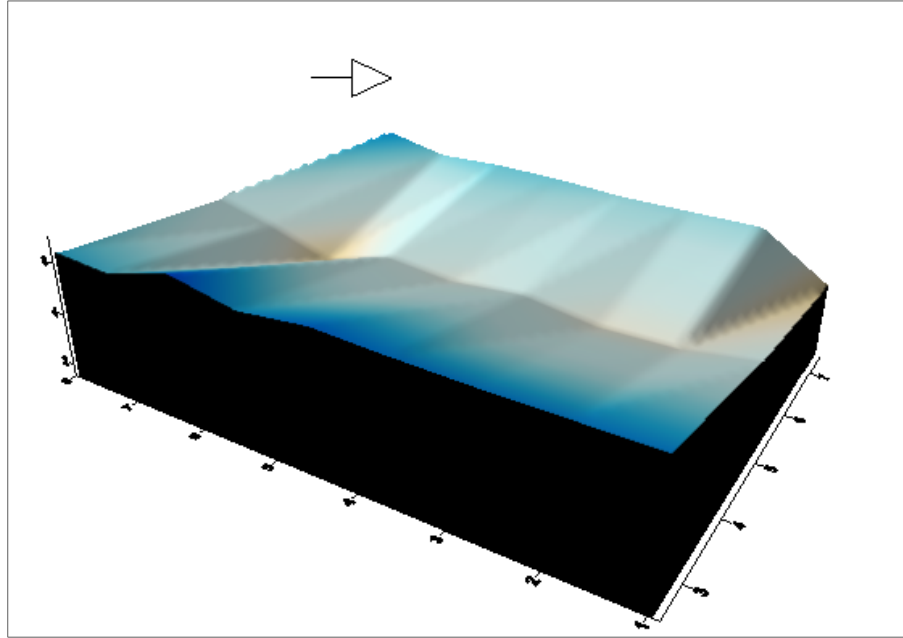


Figura 56: Erosión en Muestra Roja (AR), Natural, 1er Caudal

Al igual que en la Figura anterior, tanto en la representación gráfica como la fotografía tomada en el ensayo, se muestra la grieta central que formó el flujo de agua sobre la muestra. Además, se denota un desgaste mayor en el borde superior de ambas imágenes que en el borde inferior. También, el perfil de encuentro con el flujo se nota más erosionado que el perfil de salida de éste desde la muestra. Esto concuerda plenamente con lo indicado en el Capítulo 3 del presente

documento, en cuanto se espera un desgaste mayor en los bordes de la muestra, debido a las condiciones que el canal presenta.

Para el caso de las muestras remoldeadas existen algunas que se erosionaron en pocos minutos y otras que duraron, incluso, el tiempo máximo estimado para los ensayos. Debido a que este último comportamiento mencionado no representa una diferencia significativa con respecto al obtenido para el caso de los ensayos de muestras naturales, se prefiere graficar y mostrar en fotografía, una muestra que haya perdido gran parte de su masa en el ensayo de erosión. Tal situación se muestra a continuación:

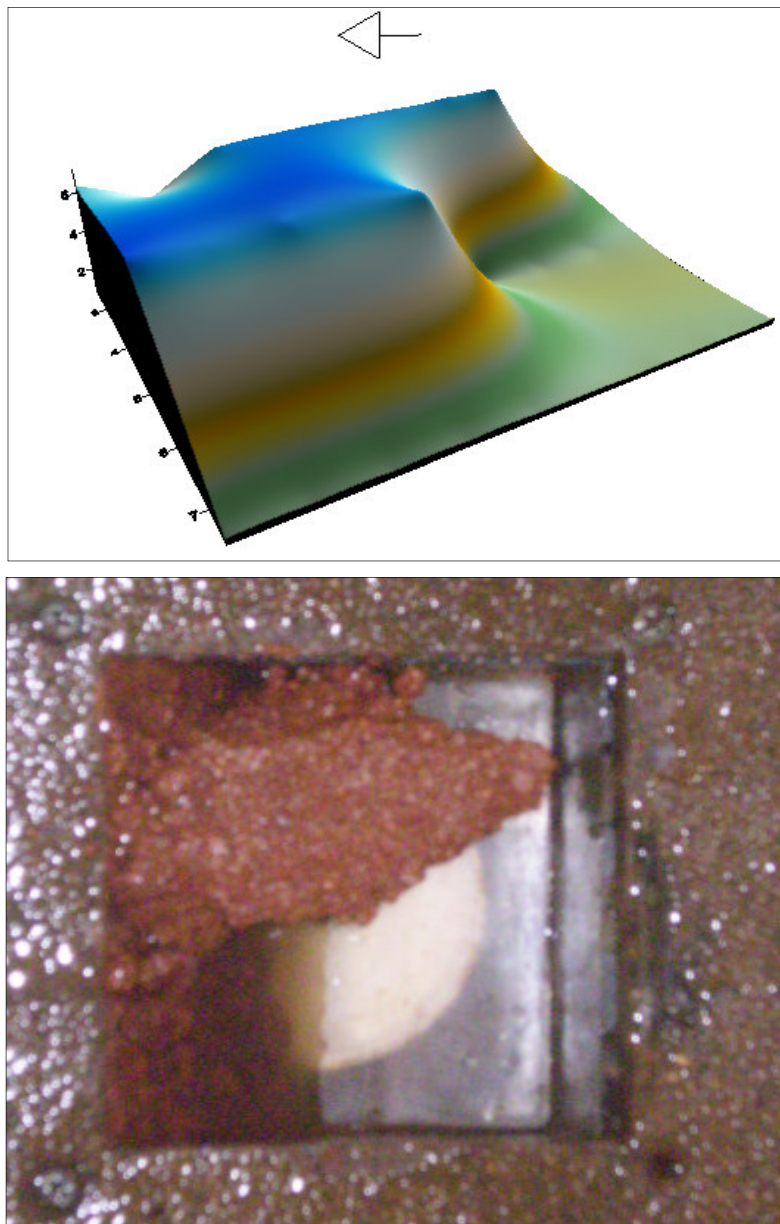


Figura 57: Erosión en Muestra Roja (AR), Remoldeada, 1er Caudal

En la Figura anterior se nota claramente, tanto en la representación mediante Surfer® como en la fotografía, el desgaste que produjo el caudal de agua por sobre la muestra, haciéndola casi desaparecer. Se nota una disminución casi completa de la masa de suelo. Esta situación se consideraba como parámetros para terminar el ensayo antes de los 40 minutos originales. Nuevamente se produce un desgaste mayoritario en el sector de encuentro del flujo de agua con la muestra y en los bordes de ésta.

Además, la Figura anterior muestra el mismo tipo de suelo y el mismo caudal que el indicado en la Figura 56, pero con la salvedad de que la probeta fue remoldeada. Se nota claramente que la estructura original de la probeta natural, le confiere una resistencia a la erosión mayor que en el caso de la probeta remoldeada, donde dicha estructura fue destruida.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se analizan los datos obtenidos y mostrados en el capítulo anterior, teniendo en consideración la revisión bibliográfica presentada en el Capítulo 2, los efectos del equipo de erosión y las propiedades del suelo, indicadas en los Capítulos 3 y 4, respectivamente.

Se presenta una análisis de las modificaciones realizadas al equipo, de la metodología utilizada en los ensayos de erosión, de la influencia de las variables del equipo que afectan los ensayos realizados y de la erosión producida en las muestras de suelo analizadas. Finalmente, se incluyen las inferencias realizadas con respecto a las relaciones entre la erosión y las propiedades del suelo que acá se analizan, y cómo otras propiedades del suelo pueden afectar las formulaciones determinadas.

7.2. MODIFICACIONES REALIZADAS AL EQUIPO

Las modificaciones realizadas el equipo de erosión fueron múltiples (tal como se indica en el acápite 3.3 del presente trabajo de título): el cambio del papel lija por una arena fina uniforme, la inclusión de una esponja y un tubo perforado que permitían uniformizar el flujo de agua y un sistema de tuerca de elevación de la muestra.

Todos estos cambios realizados, tenían como objetivo obtener un flujo de agua uniforme (según lo indicado en el acápite 3.4) y así tener una cuantificación del esfuerzo de corte que inducía el paso del agua por sobre la superficie de la muestra.

La arena fina evitó las concentraciones de flujo que se producían en los pliegues del papel lija y que se existieran protuberancias o partes desnudas del canal que hicieran cambiar la rugosidad por donde se traslada el flujo de agua. Como consecuencia, se logró tener de forma permanente el régimen de flujo uniforme. Además, la elección de arena fina acerca más la rugosidad de las muestras a la del canal, evitando un cambio brusco en la rugosidad que indujera un cambio en el régimen del flujo.

El sistema de esponja más tubo perforado, permitió que la capa límite del fluido se desarrollara completamente en el tramo antes de llegar a la muestra, para asegurar que el flujo entrante fuera,

efectivamente, uno de características uniformes. El caudal de agua ya estaba distribuido en todo el ancho del canal a una distancia aproximada de 1.0 m antes de llegar al encuentro con la probeta.

El sistema de tuerca para la elevación de la muestra, evitó lo que se muestra en la Figura 30. Este es, sin duda, la más importante de las modificaciones realizadas al equipo. Antes de este cambio, se ensayaron algunas probetas de prueba que fueron erosionadas por la caída del agua más que por el paso del flujo por la superficie de esta. Esto alteraba los datos obtenidos de volumen erosionado, debido a que el desgaste no se producía sólo por el factor de la velocidad del flujo (caudal), si no que por una caída en altura que aumentaba, en todos los casos, el volumen erosionado en los especímenes ensayados.

La elección del punto que se escogería como parámetro para mantener coplanar al canal, también induce cambios en el resultado final de los ensayos. Se evitó que la masa de suelo estuviera por sobre la línea del canal, y por lo tanto del flujo, para evitar desprendimientos de volúmenes debido al golpe del agua en la muestra. Si bien, al tener como patrón al punto menos erosionado coplanar al canal, se induce una caída de agua por sobre la muestra, esta es bastante menor en comparación con la obtenida en el equipo original y no produce, por inspección visual, una alteración mayor de los resultados finales.

Todas estas modificaciones permitieron, primero, que el flujo fuera efectivamente uniforme en el momento de encuentro con la muestra. Además, de la inspección visual correspondiente, las mediciones realizadas en los 2 perfiles transversales (véase acápite 3.4.4), muestran que el flujo uniforme se estableció en el equipo de erosión. Producto de esto, se determinó el esfuerzo de corte que produce el agua sobre el espécimen ensayado. Además de mantener una rugosidad constante y evitar la concentración de líneas de flujo, se establece una distribución del caudal a lo ancho del canal, prácticamente inmediata desde la salida del tubo perforado.

Una nueva modificación que se le podría realizar al equipo para mejorar su comportamiento, se basa principalmente en el perfil de encuentro del flujo de agua con la muestra de suelo. Al existir una concentración de la erosión en este perfil, se permite que el agua pase hacia la base de la caja de acrílico, produciendo un fenómeno de erosión al fondo de la probeta de suelo. Si bien, en el equipo original se recomienda un sello en este espacio mediante la aplicación de silicona, no se considera correcto este procedimiento, debido a la irregularidad (protuberancias) que se produce al colocar el producto. La aplicación de este sello, induce, además, una variación de rugosidad que traería un cambio en el flujo justo en el momento de encuentro del agua con el suelo. Se propone la implementación de una placa de un material rígido a la cual se le adhiera arena de la misma forma que al canal y que sea movable. A medida que la erosión se concentre en el primer perfil de la muestra, mover la placa para que el flujo no pase por debajo de la superficie del suelo y no produzca erosión interna en vez de superficial.

El sistema de esponja, de la misma forma, requiere cierta mejora para tener un mejor comportamiento en los ensayos. Debido a que la esponja actuaba como barrera natural del flujo, se debió acomodar un espesor específico de esta que cumpliera con las siguientes condiciones: primero, no acumular agua tras ella para evitar que el flujo de salida estuviera dado por la altura de agua más que por la velocidad del flujo; y segundo, ser lo suficientemente robusta para no ceder debido al caudal. Esto se verificó tras varios procesos de prueba y error que retrasaron el inicio de los ensayos. Además, si bien el sistema de recirculación de agua, teóricamente, incluye un geotextil que evita el paso de las partículas más gruesas al sistema, las partículas finas que no era filtradas por este geotextil, y que recirculaban por el sistema, acolmataron en más de una ocasión la esponja, produciendo un estancamiento del caudal aguas arriba de ella. Se propone un nuevo sistema de uniformización del flujo, por ejemplo, un sistema de rebalse que cumple con el mismo objetivo y es más eficiente.

7.3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este ensayo fue diseñada para evaluar los volúmenes erosionados en 8 tipos de suelos distintos, para 2 caudales distintos y muestras en estado inalterado y remoldeado. Esto da una cantidad total de 32 ensayos.

La totalidad de los ensayos demuestra, tanto cuantitativa como cualitativamente, las diferencias entre los distintos tipos de suelos, caudales y estado de las muestras medidas en términos del volumen erosionado.

La metodología sigue la secuencia lógica necesaria para obtener mediciones correctas y acordes a la naturaleza del suelo ensayado. La inclusión de nuevos elementos al equipo de erosión, obligó a aumentar el número de pasos necesarios para realizar los ensayos, pero que no revistieron mayor pérdida de tiempo después de ser calibrados.

La metodología utilizada se considera la correcta, debido a que se pudo apreciar la erosión en todas las muestras ensayadas, en distintos grados y distintas formas. Debido a la posibilidad del equipo de erosión de entregar múltiples caudales y pendientes, es posible variar la magnitud de los volúmenes erosionados apreciados y que permiten reproducir distintas condiciones que sean necesarias estudiar a futuro.

El principal problema de la metodología viene dado por el tallado o remoldeado de las muestras a erosionar. Este proceso requiere de un tiempo y una cantidad de suelo excesiva teniendo en cuenta los alcances de las investigaciones realizadas. Se propone disminuir el tamaño de las muestras o

buscar un método de tallado y remoldeado más eficiente, tanto en el aspecto de volumen de suelo como en el tiempo utilizado.

7.4. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL EQUIPO

Las variables modificables en el equipo de erosión son la pendiente y el caudal. En este caso, debido a la extensión de la presente investigación, se optó por restringir la pendiente a un valor de 45° de inclinación con respecto a la horizontal y a 2 caudales de 10.18 y 24.39 litros/minuto, que corresponde a esfuerzos de corte inducidos por el agua de 0.107 kg/cm² y 0.157 kg/cm², respectivamente. El valor de 45°, se incluyó debido a que se procura producir el transporte de los sedimentos por medio del paso del flujo de agua y no por la fuerza de gravedad, situación que se presentaría para el caso de pendientes mayores. Los caudales se escogieron teniendo en consideración la naturaleza del presente trabajo de título, pretendiendo tener distintas magnitudes de volumen erosionado en todas las muestras. Un análisis hidrológico realizado por Verdugo (2007), indica que caudales habituales presentes en terreno son 5 lt/min y 20 lt/min, por lo que los utilizados en este trabajo de título se mantienen dentro de los rangos habituales. Mediante pruebas realizadas con anterioridad a los ensayos reales, se logró calibrar estos 2 caudales como los necesarios para obtener volúmenes erosionados en un amplio rango de valores

La tendencia general es que a mayor caudal se produce mayor erosión. Sin embargo esta regla no se cumple en 2 casos: en la muestra natural del suelo L4 y en la muestra remoldeada del suelo AM. Según lo mostrado en el Capítulo 6, ambas muestras presentan una humedad menor al terminar el ensayo de erosión en el caso del caudal 2 que cuando termina el ensayo con el caudal 1. Esto les permite tener una resistencia no drenada, en el primer caso, mayor que la obtenida en el ensayo realizado con el caudal 1.

La proporción de los caudales es prácticamente 2.5 veces, sin embargo esto no se replica, en lo absoluto en lo que se refiere a volúmenes erosionados. En el caso de las muestras naturales, la razón entre la erosión producida en los suelos sometidos al primer caudal y los sometidos al segundo caudal es bastante menor. En algunos casos este valor es cercano a 2.5 (como en el caso de la muestra L3), pero no es una tendencia general. Lo mismo ocurre en el caso de las muestras remoldeadas. Teniendo en cuenta el parámetro del tiempo necesario para finalizar el ensayo, se tienen razones de 4 veces más rápido con el segundo caudal que con el primero. En términos generales, todas las muestras reaccionaron de manera similar al cambio de caudal.

Tal como fueron escogidos, los caudales produjeron en todas las muestras erosión a lo menos visible. La diferencia entre estos valores depende, por lo tanto, del umbral de erosión de cada suelo.

Existen suelos (ejemplo ASF y AM, en el caudal 1) en que la erosión viene dada mayormente por una concentración de tensiones en los bordes de la probeta, lo que implica que el volumen que se erosiona en las muestras ensayadas, se concentra en dichos bordes. Si bien existen diferencias en la medición de cotas en los perfiles centrales de la muestra, los mayores desniveles se producen en las orillas. En este caso, se puede estar en presencia de suelos que están en el límite del umbral de erosión debido al corte que les produce el flujo de agua.

7.5. COMPORTAMIENTO DE LAS MUESTRAS ANTE LA EROSIÓN

Las muestras no mostraron grandes diferencias en su comportamiento. Si bien existen muestras que efectivamente se erosionaron menos que otras, no se puede concluir acerca de diferencias sustanciales en la forma de erosión de los especímenes de suelo.

Un punto a destacar, es la concentración del flujo, y por tanto de la erosión, en las muestras arcillosas que presentaban agrietamiento en la superficie. En estas fisuras, se presentaron concentraciones de flujo que formaron surcos en la superficie de la muestra, hasta finalmente desprender terrones de suelo enteros, antes de disgregarlos. Las muestras que presentaban baja humedad natural y que presentaban gran cantidad de grietas (muestra Roja del Camino La Pólvara, AR y muestra Amarilla del Camino La Pólvara, AM) sufrieron este efecto (ver Figura 42).

Remitiéndonos a las Figuras 51 a 54, se nota que en términos generales los suelos más erosionables son los L2 (Sector 2), APA (Puente Alto) y AR (Muestra Roja). De los parámetros analizados en este trabajo de título (humedad natural, humedad post ensayo, resistencia no drenada al corte, diámetro medio de partículas y límites de Atterberg), ninguno justifica la tendencia de estos suelos a ser más erosionables que los demás.

En el caso de las muestras naturales la erosión se muestra en términos del volumen final erosionado; en el caso de las muestras remoldeadas, el volumen erosionado se relaciona con el tiempo de duración del ensayo. Tanto en el caso de las muestras naturales como en las remoldeadas, se puede obtener la pendiente de las curvas, obteniéndose un nuevo parámetro $\Delta V/\Delta t$, como una tasa de erosión en unidades de $[\text{cm}^3/\text{t}]$.

De los mismos gráficos mencionados anteriormente, se puede concluir que, en regla general, existe un orden en las magnitudes de los volúmenes erosionados que se mantiene desde el comienzo hasta el final del ensayo. Por ejemplo, en el caso de la Figura 52 que muestra la relación de los volúmenes erosionados en el tiempo para las muestras naturales sometidas al 2do caudal, el suelo del Sector 4 (L4), a los 5 minutos, fue el menos erosionado y al término del ensayo, a los 40

minutos, siguió siendo el menos erosionado. Lo mismo para el caso de la muestra de Puente Alto (APA): al comienzo del ensayo era la segunda más erosionada y al final del ensayo ocupaba el mismo lugar. Este “orden” en el volumen erosionado se cumple en la mayor parte de los suelos. El suelo que menos cumple este “ordenamiento” es el limoso del Sector 3 (L3). Este comportamiento se basa teniendo en consideración que este suelo tenía una gran proporción de gravilla con respecto a su masa total. En todo el ensayo, existía una tasa relativamente uniforme de erosión en la matriz limosa de la muestra, sin embargo, este desgaste de las partículas más finas, iba dejando al descubierto las partículas más gruesas (gravillas) que, en un tiempo de ensayo aproximado de 10 minutos, se desprendían produciendo un cambio violento en el volumen erosionado (véase Figuras 51 a 54). Además, este mismo desprendimiento producía una alteración en los alrededores de él, lo que erosionaba aún más el sector que quedaba descubierto. Sin embargo, la misma presencia de gravillas le permitió a este suelo ser uno de los menos erosionados, en comparación con los otros según lo indicado en el capítulo de la Revisión Bibliográfica.

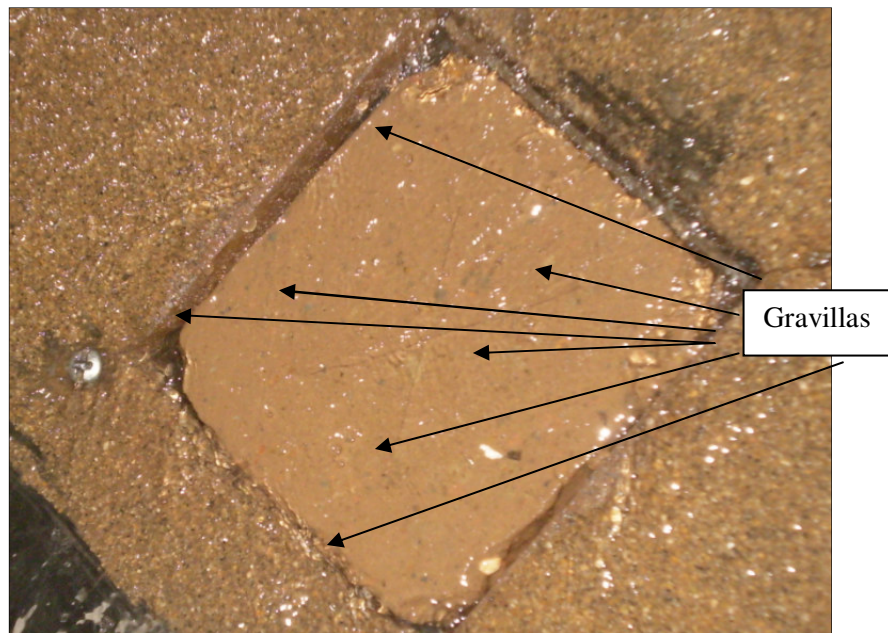


Figura 58: Muestra de Suelo, Sector 3

La tasa de erosión de los suelos ($\Delta V/\Delta t$) es un indicio del comportamiento de estos ante la erosión. En el caso de las muestras naturales, la tasa de erosión de suelos es prácticamente constante en los suelos que sufren baja erosión a lo largo de todo el ensayo. Esto se da tanto en suelos arcillosos como limosos. El desarrollo de la tasa de erosión es, por lo general, decreciente: a medida que aumenta el tiempo de ensayo la curva de volumen erosionado v/s tiempo es cada vez más plana. Como se indica en el acápite 2.1.1, esto puede ser explicado debido a la costra que se forma en el suelo por el efecto del agua o al aumento de resistencia del suelo a medida que se “profundiza” en la muestra o a que no se ha alcanzado el umbral de erosión de las capas inferiores. Por lo general, las muestras presentaban una erosión superficial inmediata, debido a que las partículas que

quedaban sueltas sobre la superficie de la masa de suelo, eran transportadas de forma instantánea por el agua. Esta erosión instantánea, se puede explicar, también, teniendo en cuenta el violento cambio de humedad producido en el suelo, que mermaba su resistencia al corte de manera repentina produciendo la erosión de las primeras capas de suelo.

Como se indica en el Anexo 7, el perfil de humedades de las probetas ensayadas indica que la cantidad de agua en la masa de suelo, es prácticamente constante al finalizar el ensayo de erosión. Es por esto, que al erosionar las capas superficiales, el cambio de humedad de las capas inferiores que quedaban expuestas a la erosión, ya se había producido, evitando una pérdida de resistencia intempestiva que produjera una erosión mayor en la muestra.

El caso de las muestras remoldeadas es distinto. Debido a que en la mayor parte de las muestras no se alcanzó a terminar el ensayo en el tiempo presupuestado, es difícil obtener ciertas conclusiones acerca de este tipo de muestras. Es claro que todas las muestras remoldeadas resistieron menos la erosión que las muestras naturales, incluso, teniendo suelos que tienen sensibilidad menor a 1 (L3). Esto indica que, si bien la resistencia al corte puede ser mayor en algunos casos en las muestras remoldeadas, la estructura del suelo es un parámetro que debe ser tomado en cuenta a la hora del análisis del potencial erosivo de los suelos. Esto conlleva peligrosas consecuencias a los terraplenes que se pudiesen diseñar con este tipo de suelos. Sin embargo, existen suelos que se comportaron de buena manera (entiéndase como que tuvieron poco volumen erosionado) tanto en el caso natural como remoldeado (muestras ASF y AM, en menor medida muestra L3). De las variables analizadas en esta investigación, ninguna explica esta tendencia. Los diámetros de partículas son totalmente opuestos (en el caso de la muestra Amarilla, AM, se presenta uno de los D_{50} más altos y en el caso de la muestra de San Felipe, ASF, el diámetro medio partículas es el menor de todos); las humedades naturales son similares, sin embargo la muestra roja, AR, también tiene una humedad natural similar y tiene una erosión mucho mayor que las otras 2; la humedad al finalizar el ensayo también es similar en estos 3 suelos obteniéndose valores muy distintos de volúmenes erosionados; las resistencias al corte al finalizar el ensayo son similares en ambas muestras pero también en otras que sufrieron gran erosión (ej. muestra AR); los índices de plasticidad son distintos en ambos casos. Debido a esto no es posible concluir, con los parámetros que en esta investigación son analizados, acerca de estas 2 muestras que presentan baja erosión tanto en estado natural como en estado remoldeado.

7.6. RELACIÓN DE LA EROSIÓN CON LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Según lo presentado en la Revisión Bibliográfica del Capítulo 2 y los resultados mostrados en el Capítulo 6, se presentan los siguientes gráficos que relacionan las propiedades del suelo analizadas en este trabajo de título con el volumen erosionado de las muestras.

Tabla 18: Humedad (en %) al Término de los Ensayos de Erosión

Ensayo	N-1C	R-1C	N-2C	R-2C
Muestra				
L2	69.87	75.87	72.54	79.86
L3	48.73	38.68	35.8	35.65
L4	38.16	50.62	35.21	65.19
L1	65.25	64.29	65.31	64.63
APA	45.82	33.83	32.85	29.85
ASF	29.24	31.28	29.23	36.39
AR	38.68	31.27	26.87	29.09
AM	31.67	32.4	37.85	31.25

Nota: N-1C: Muestra Natural, 1er Caudal
 R-1C: Muestra Remoldeada, 1er Caudal
 N-2C: Muestra Natural, 2do Caudal
 R-2C: Muestra Remoldeada, 2do Caudal.

Para el caso de la relación entre el volumen erosionado y la resistencia no drenada al corte, se incluye, primero, la tabla de las humedades obtenidas al finalizar el ensayo (Anexo 7), teniendo en consideración que el valor de esta resistencia varía con la humedad del ensayo (como se muestra en las Figuras 43 y 45). La Tabla 18 muestra los valores de la humedad al término de los ensayos de erosión. La Tabla 19 muestra los valores de las resistencias no drenadas S_u deducidas según los gráficos de las Figuras 43 y 45, para las humedades recién indicadas.

Tabla 19: S_u (en KPa) al Término de los Ensayos de Erosión

Ensayo	N-1C	R-1C	N-2C	R-2C
Muestra				
L2	36	8	36	6
L3	13	4	33	42
L4	28	13	39	9
L1	20	5	20	10
APA	15	17	24	23
ASF	26	20	27	4
AR	4	18	15	20
AM	35	18	19	19

Con estos datos se pueden construir los siguientes gráficos:

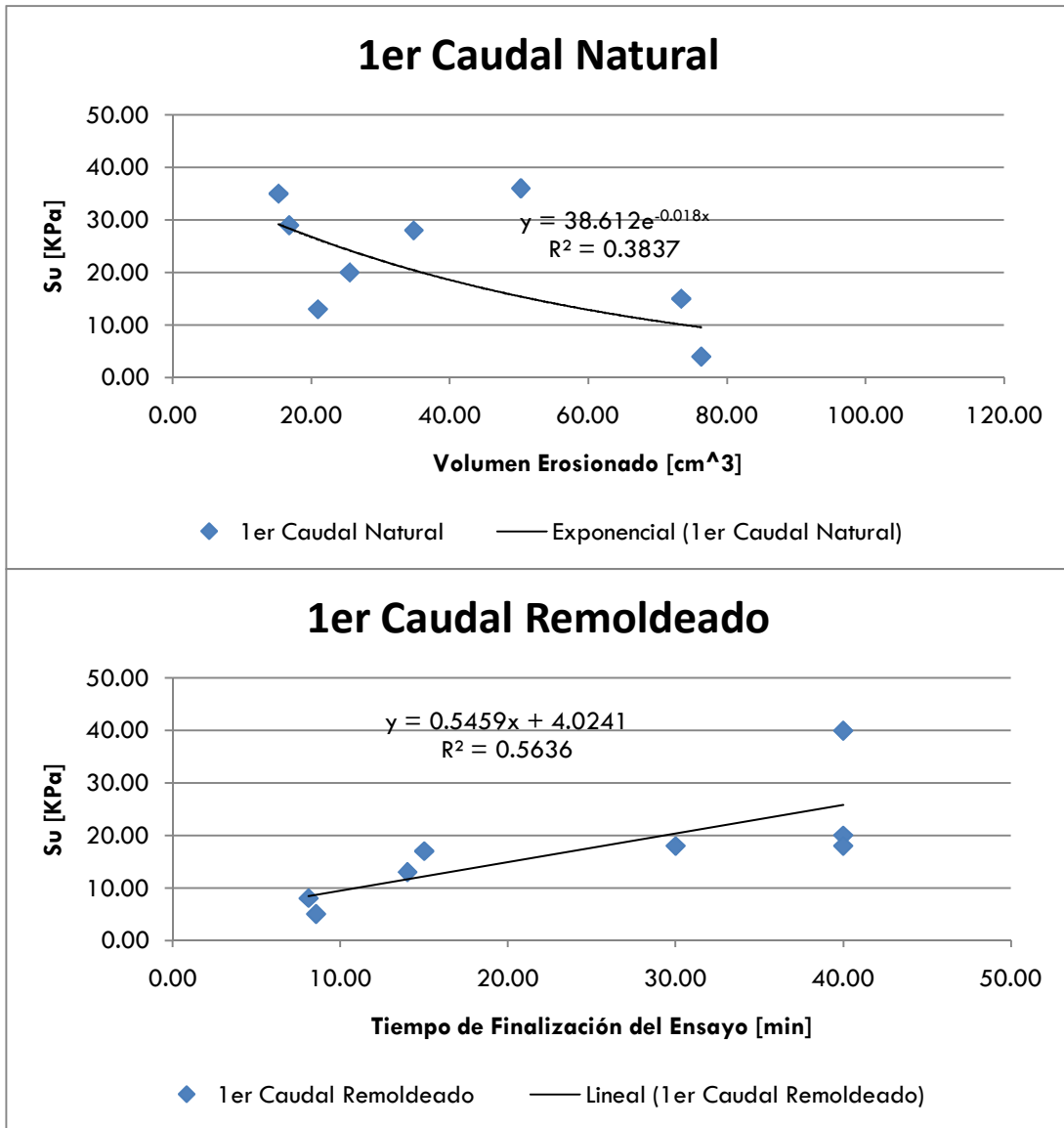


Figura 59: Relación entre la Erosión y la Resistencia No Drenada al Corte, 1er Caudal

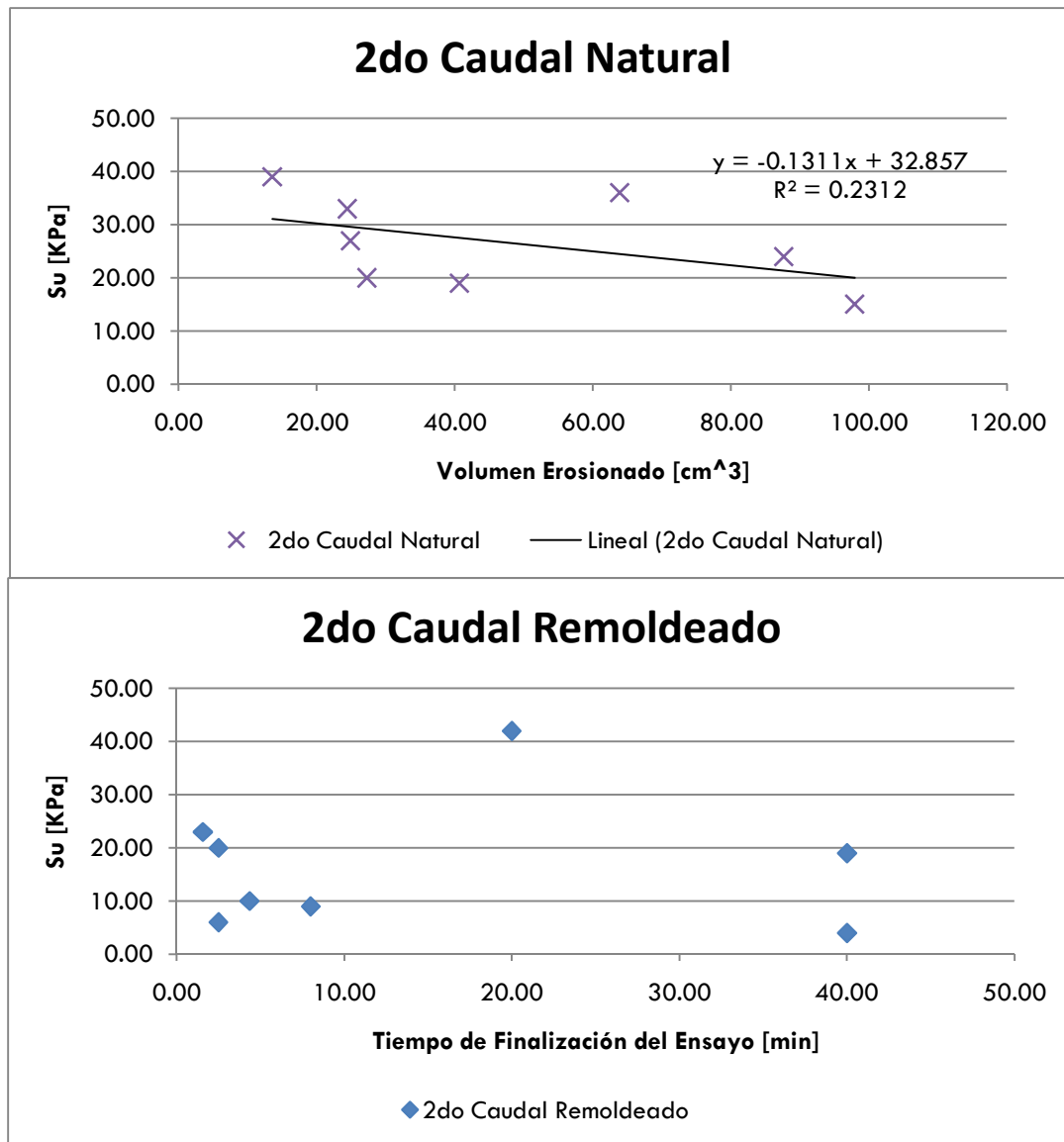


Figura 60: Relación entre la Erosión y la Resistencia No Drenada al Corte, 2do Caudal

En los gráficos mostrados, se incluye la relación obtenida entre el volumen erosionado (al finalizar el ensayo) y la resistencia no drenada al corte. Tal como se mencionó, los ensayos en muestras remoldeadas, por lo general, terminaron antes de los 40 minutos (basándose en las causas detalladas en el Anexo 7). Debido a esto, el volumen erosionado al finalizar el ensayo no puede ser utilizado como parámetro, porque dichos ensayos terminaban por diversas causas que alteran la medición del mencionado volumen de suelo.

En el caso de las muestras naturales, la tendencia indica que a medida que aumenta la resistencia al corte disminuye el volumen erosionado de la muestra. Esto concuerda con el hecho de que el agua produce un esfuerzo de corte (esfuerzo de corte tractor) sobre las probetas, por lo que si la resistencia al corte del suelo aumenta, es más difícil que el esfuerzo tractor produzca un desgaste

en la muestra ensayada. Todas las resistencias no drenadas están evaluadas de acuerdo a la humedad obtenida al término del ensayo de erosión. Como se indicó anteriormente, las relaciones obtenidas para cada uno de los casos corresponden a la que mejor se ajustara a los datos obtenidos (entre una relación lineal, polinomial, exponencial, logarítmica o potencial), teniendo en consideración la tendencia esperada y los datos obtenidos de la revisión bibliográfica.

En los gráficos de las Figuras 59 y 60 de las situaciones “muestra natural, 1er caudal” y “muestra natural, 2do caudal” se obtuvieron relaciones del tipo exponencial y lineal que fueron las que mejor se ajustaron a los datos obtenidos de los ensayos de erosión. Sin embargo, el bajo valor de los factores de correlación obtenidos (0.37 y 0.23, respectivamente), indica que esta propiedad del suelo no es relevante para el análisis de la erosión superficial de suelos.

Para el caso de la “muestra remoldeada, 1er caudal” se propone una relación lineal entre el tiempo de erosión de la probeta completa (o término de ensayo) y la resistencia no drenada. La relación lineal es mejor en este caso, con un factor de correlación de 0.56. Sin embargo, esto supone tiempos infinitos para taludes reales (extrapolando a volúmenes muy grandes) por lo que no es muy aplicable a la realidad. Para el caso de la “muestra remoldeada, 2do caudal”, se optó no proponer relación alguna, debido a que todas las mencionadas mostraban factores de correlación cercanos a cero. En este caso, la dispersión de los datos viene dada principalmente por la velocidad en que algunas de las muestras fallaron completamente, lo que impide siquiera que el suelo desarrolle algún tipo de comportamiento en tan corto lapso de tiempo.

Con el fin de mejorar las relaciones entre la resistencia no drenada de los suelos y la erosión producida en ellos, se propone el siguiente factor:

$$q_e = \text{Tasa de erosión, en [cm/min]},$$

obtenida como la pendiente de la recta que mejor se ajusta a la evolución del volumen erosionado en el tiempo graficada en las Figuras 51 a 54. La siguiente tabla muestra las tasas de erosión de cada uno de los suelos para cada caudal en muestras naturales y remoldeadas.

Tabla 20: Tasa de Erosión, en [cm³/min], de los Suelos

Situación* Muestra	1C-N	1C-R	2C-N	2C-R
L2	1.05	62.53	1.5	145.02
L3	0.41	5.57	0.5	17.07
L4	0.58	7.85	0.29	51.16
L1	0.64	56.29	0.56	131.92
APA	1.42	16.53	1.34	113.67
ASF	0.17	1.34	0.43	2.79
AR	1.03	3.03	1.36	176.6
AM	0.07	0.8	0.8	0.74

*1C-N: 1er caudal, muestra natural, 1C-R: 1er caudal, muestra remoldeada, 2C-N: 2do caudal, muestra natural, 2C-R: 2do caudal, muestra remoldeada.

Se puede incluir el término adimensional:

$$q_e^* = \frac{q_e}{\frac{b u^3}{R g}}$$

donde:

- q_e^* = tasa de erosión modificada
- q_e = tasa de erosión, en [cm³/min]
- b = ancho de control de la muestra, en [cm]
- u = velocidad media del flujo, en [cm/min]
- R = $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$, con ρ_s = densidad específica del suelo [gr/cm³]
 ρ = densidad específica del agua [gr/cm³]
- g = aceleración de gravedad, en [cm/min²]

Los valores utilizados para la formulación anterior son los siguientes:

- b = 7.5 cm (ancho de control de la muestra)
 - u_1 = 2356 cm/min (velocidad del primer caudal)
 - u_2 = 3859 cm/min (velocidad del segundo caudal)
- (las velocidad fueron obtenidas según la fórmula $u = Q/A$, donde Q es el caudal y A es el área del flujo, teniendo en consideración los datos calculados en el Capítulo 5)
- R = debido a la poca variación de las gravedades específicas de los suelos, se consideró un valor de $R = 1.65$ ($\rho_s = 2.65$)
 - g = 3.528×10^6 cm/min².

Con los datos indicados anteriormente, los valores de q_e^* se encuentran del orden de 10^{-5} . Por esto, todos los valores obtenidos se multiplicaron por 10000 para evitar la inclusión de tantos decimales que no afectan, en nada, las relaciones buscadas. Se introduce el término:

$$q_e^{**} = 10000q_e^*$$

cuyos valores se tabulan a continuación:

Tabla 21: Tasa de Erosión Modificada

Situación Muestra	1C-N	1C-R	2C-N	2C-R
L2	0.60	35.67	0.19	18.83
L3	0.23	3.18	0.06	2.22
L4	0.33	4.48	0.04	6.64
L1	0.37	32.11	0.07	17.13
APA	0.81	9.43	0.17	14.76
ASF	0.10	0.76	0.06	0.36
AR	0.59	1.73	0.18	22.93
AM	0.04	0.46	0.10	0.10

En la Tabla 20 se aprecia que la tasa de erosión aumenta tanto cuando aumenta el caudal como cuando se cambia de muestras naturales a muestras remoldeadas. Esto sigue la tendencia esperada, teniendo en consideración que a mayor caudal se produce mayor erosión (mayor esfuerzo de corte inducido por el flujo de agua) y la destrucción de la estructura del suelo, disminuye la resistencia a la erosión de éste.

En la Tabla 21, estas tendencias se pierden debido a que se incluyen los valores de la velocidad del flujo en el denominador de la formulación, lo que elimina el efecto que produce la proporcionalidad de la tasa de erosión de la Tabla 20.

Con los valores de esta tasa de erosión modificada, se puede proponer una relación entre la resistencia no drenada de los suelos al finalizar los ensayos y dicha tasa de erosión, como se muestra a continuación:

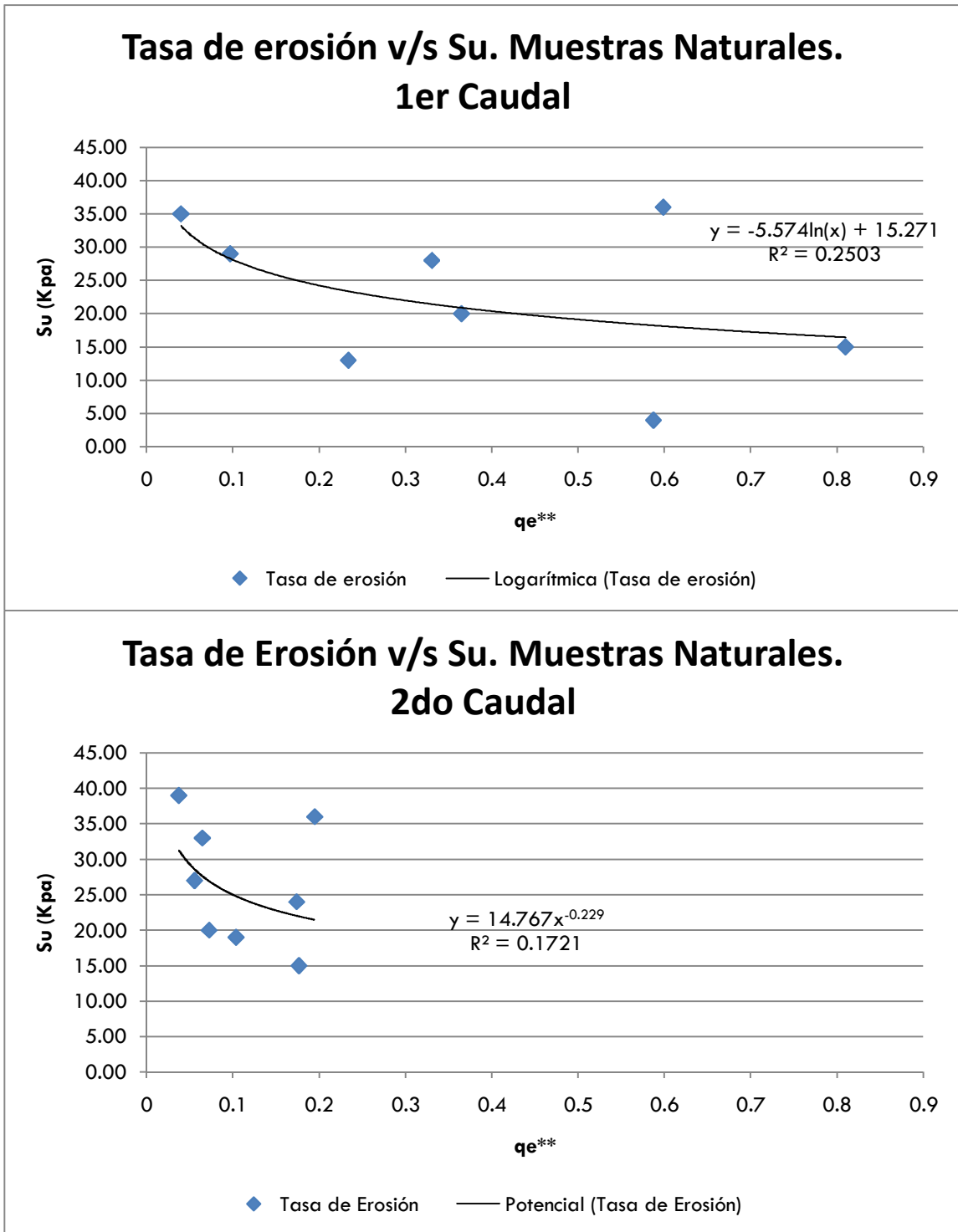


Figura 61: Relación entre el la Tasa de Erosión Modificada y Su. Muestras Naturales

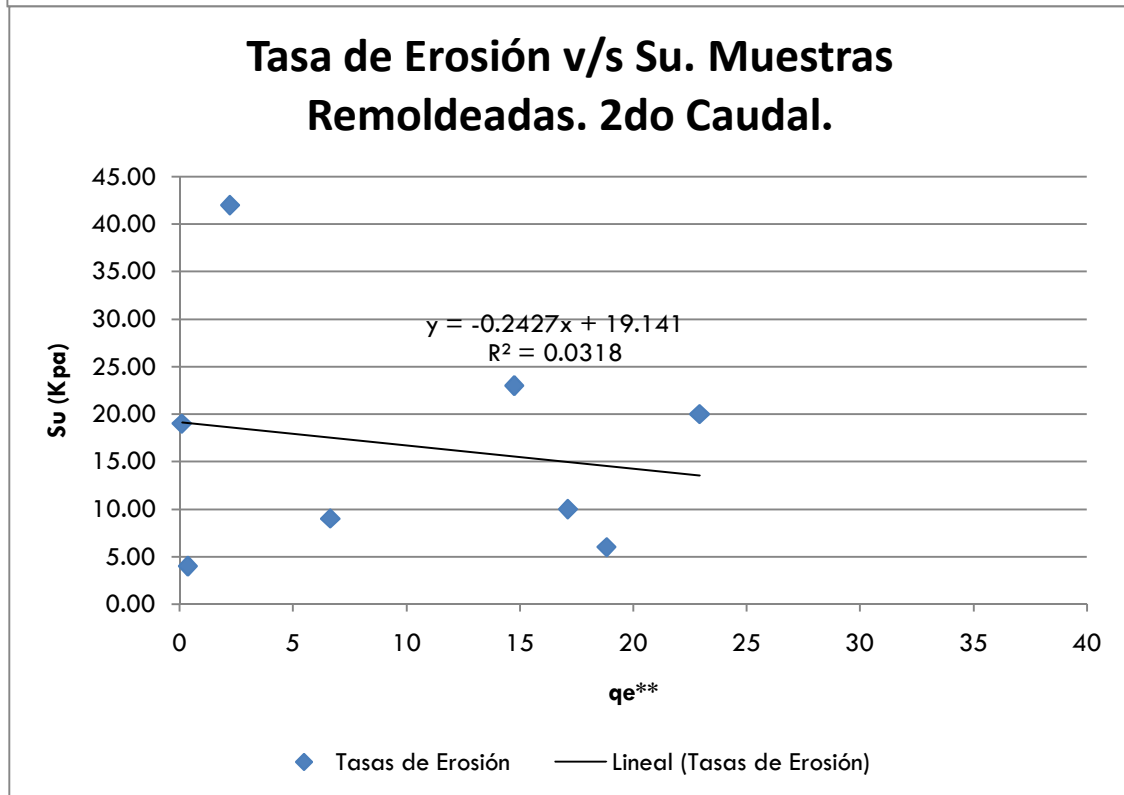
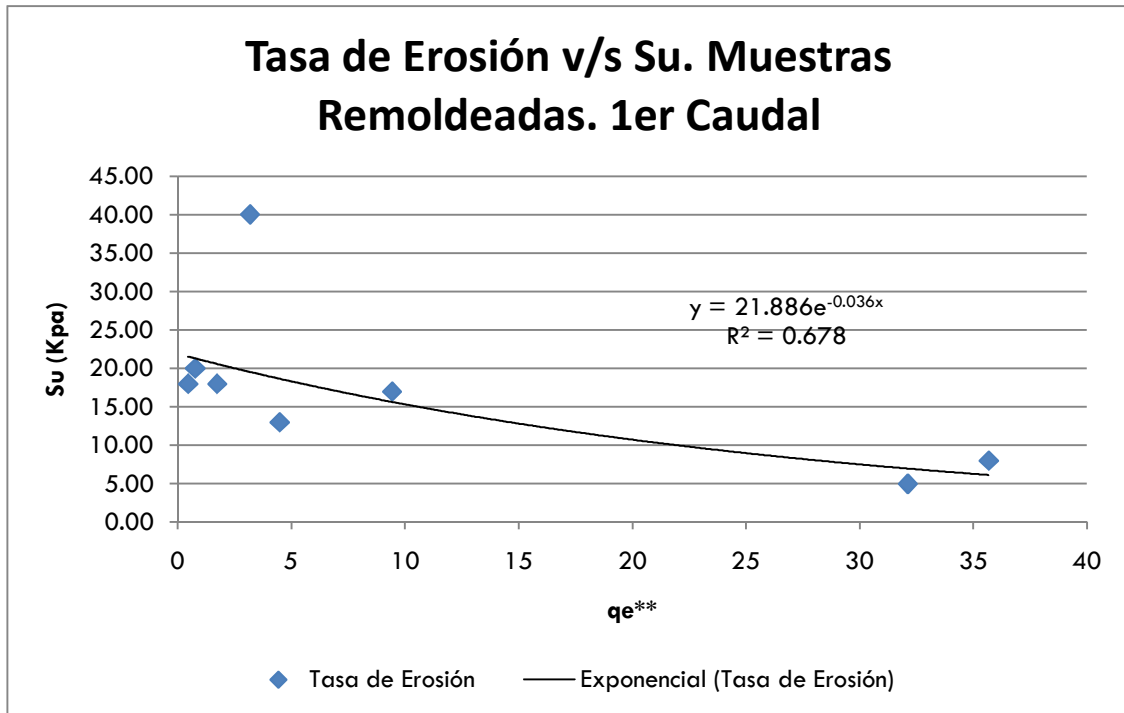


Figura 62: Relación entre el la Tasa de Erosión Modificada y S_u . Muestras Remoldeadas

Los gráficos de la Figura 61 muestran una relación inversa entre la tasa de erosión y la resistencia no drenada de los suelos. Esto sigue la tendencia esperada, basado en el hecho de que a

mayor resistencia del suelo, menos erosionable es éste. Sin embargo, las relaciones no mejoran de manera significativa con respecto a las obtenidas en los gráficos de las Figuras 59 y 60.

Además de la relación entre la resistencia no drenada al corte, se entregan las formulaciones propuestas para el caso de la relación con los límites de plasticidad tal como se muestra en los siguientes gráficos:

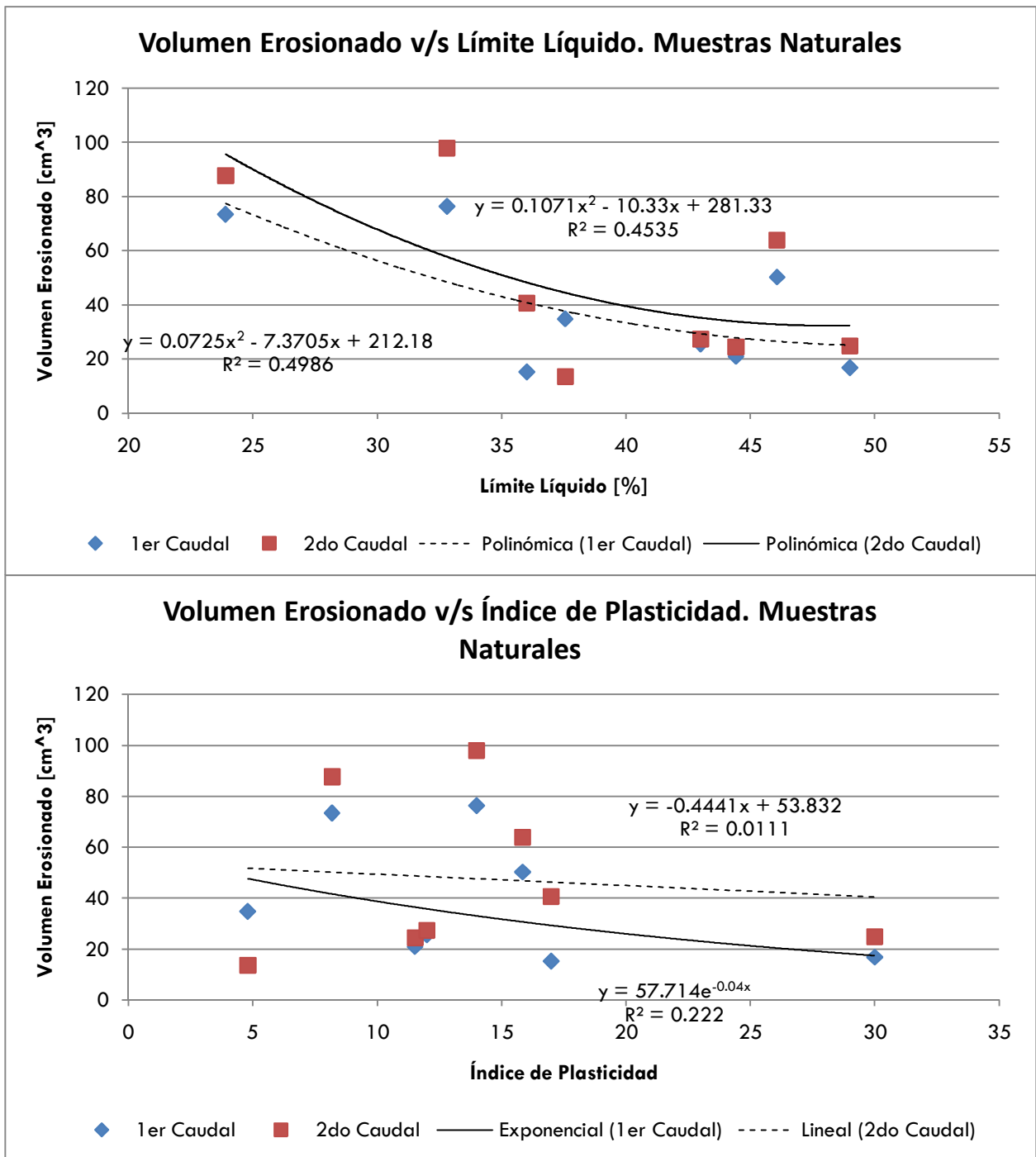


Figura 63: Relación entre el Volumen Erosionado y los Límites de Atterberg. Muestras Naturales

Se muestra como los volúmenes erosionados disminuyen a medida que aumenta el límite líquido. En el caso del índice de plasticidad no se aprecia una tendencia clara con respecto a la relación de este parámetro con el volumen erosionado. Sin embargo, las curvas que mejor se ajustan indican que a medida que aumenta el índice de plasticidad, disminuye el volumen erosionado.

Basado en el hecho de que a medida que los límites líquidos y los índices de plasticidad aumentan a medida que los suelos son más finos, esta tendencia es la esperada en este caso. Al ser los suelos más finos (mayor límite líquido e índice de plasticidad) las fuerzas electroquímicas que unen las partículas son mayores, lo que obliga al agua a inducir un mayor esfuerzo de corte para poder movilizar las partículas y erosionarlas. Por lo general, un valor alto de estos parámetros supone suelos de tipo arcilloso, más que limosos, sabiendo que los primeros tienen una resistencia superior a la erosión que los segundos.

Para el caso del límite líquido, las relaciones polinómicas de grado 2 son las que mejor se ajustan a la tendencia indicada por los datos, entregando factores de correlación entre 0.45 y 0.50. Si bien estos factores son mayores que los obtenidos para el caso de la relación del volumen erosionado con la resistencia no drenada al corte, aún son insuficientes para concluir que los límites de plasticidad son una propiedad determinante en la resistencia a la erosión superficial de los suelos.

En el caso del índice de plasticidad, se cumple la misma tendencia anterior, es decir, que a medida que se aumenta éste índice disminuye el volumen total erosionado. Sin embargo, las correlaciones son bastante menores que las obtenidas en el caso del límite líquido. Las curvas mejor ajustadas en este caso (lineal y exponencial) tienen parámetros de correlación de 0.22 para el caso de la curva exponencial del primer caudal y cercano a cero para el caso de la formulación lineal del segundo caudal. Cabe destacar, que el índice de plasticidad representa un rango de humedades en donde el suelo se comporta de manera plástica, por lo que no indica una cantidad de agua en específico en la masa de suelo. El límite líquido, en cambio, representa la humedad que limita las fases plásticas y líquidas del suelo.

Remitiéndonos a la tabla de los límites de Atterberg de las muestras de suelo y las humedades obtenidas al terminar los ensayos de erosión, se concluye que estos valores son bastante cercanos, lo que podría explicar la mejor correlación con el límite líquido.

Para el caso de las muestras remoldeadas, se realizó el mismo ejercicio que cuando se desarrolló la relación con S_u . El tiempo de finalización del ensayo fue el parámetro elegido para la relación como se muestra en los Gráficos de la Figura 64. Las correlaciones obtenidas, siguen la misma lógica inferida para las muestras naturales: a medida que aumenta el valor del índice de plasticidad y del límite líquido el tiempo de ensayo es mayor, lo que implica una mayor resistencia a la erosión.

Para el caso del límite líquido, los factores de correlación son bastante pobres: 0.27 y 0.03. Las curvas que mejor se adaptaron a los datos entregados fueron una lineal para el caso del 1er caudal y una potencial en el caso del 2do.

Para el caso del índice de plasticidad, las curvas que mejor se adaptaron a los datos entregados por los ensayos de erosión son: para el primer caudal, una logarítmica ($R^2 = 0.21$) y para el segundo caudal, una lineal ($R^2 = 0.48$).

Teniendo en consideración los índices de correlación obtenidos con los límites de plasticidad, se concluye que este parámetro tampoco es uno de los más importantes al evaluar la erosión superficial debido a un flujo en suelos finos.

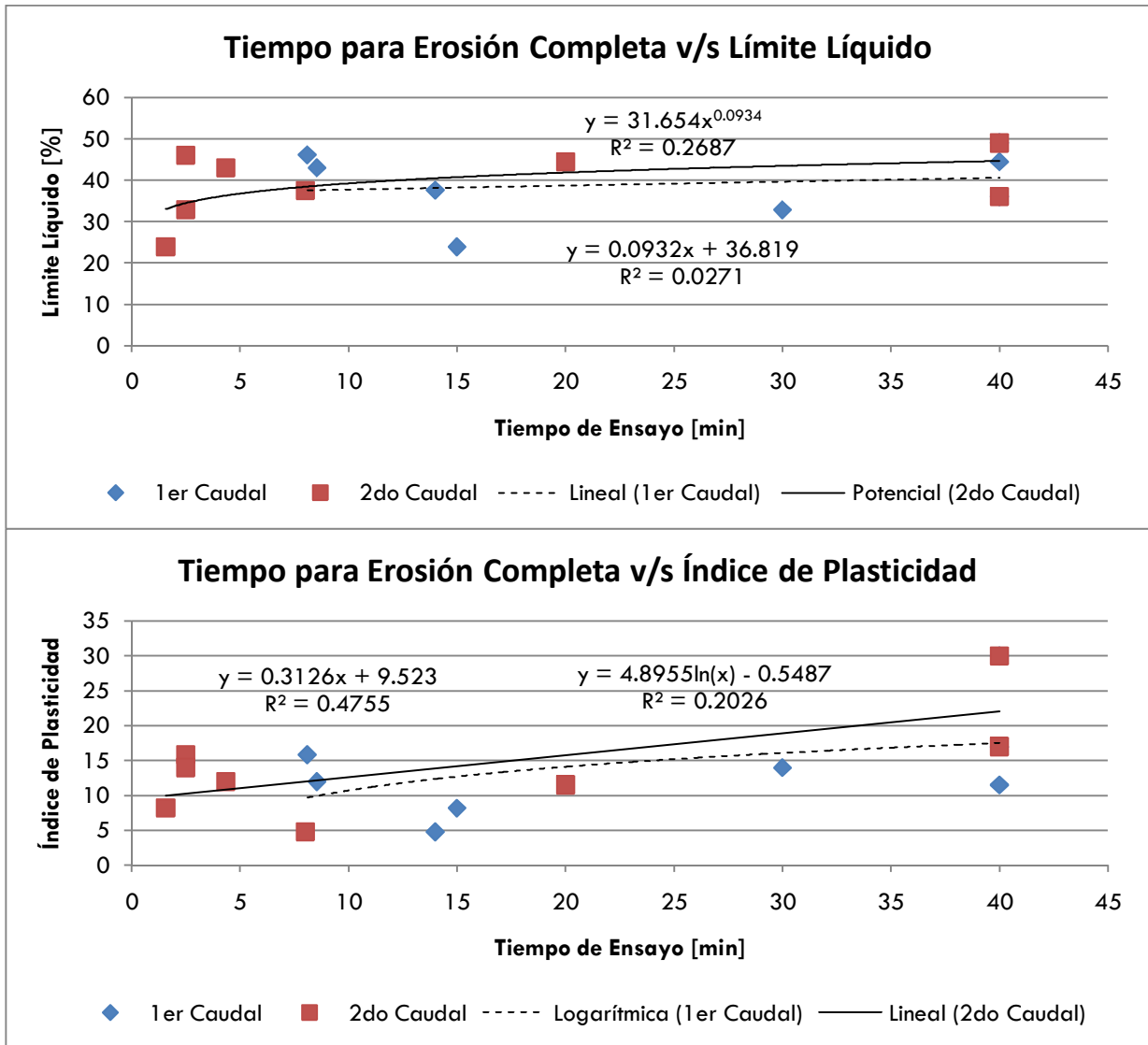


Figura 64: Relación entre el Tiempo de Ensayo y los Límites de Atterberg. Muestras Remoldeadas

La misma lógica aplicada hasta el momento se utiliza para el caso de la relación entre la erosión y el diámetro medio de partículas como se muestra a continuación.

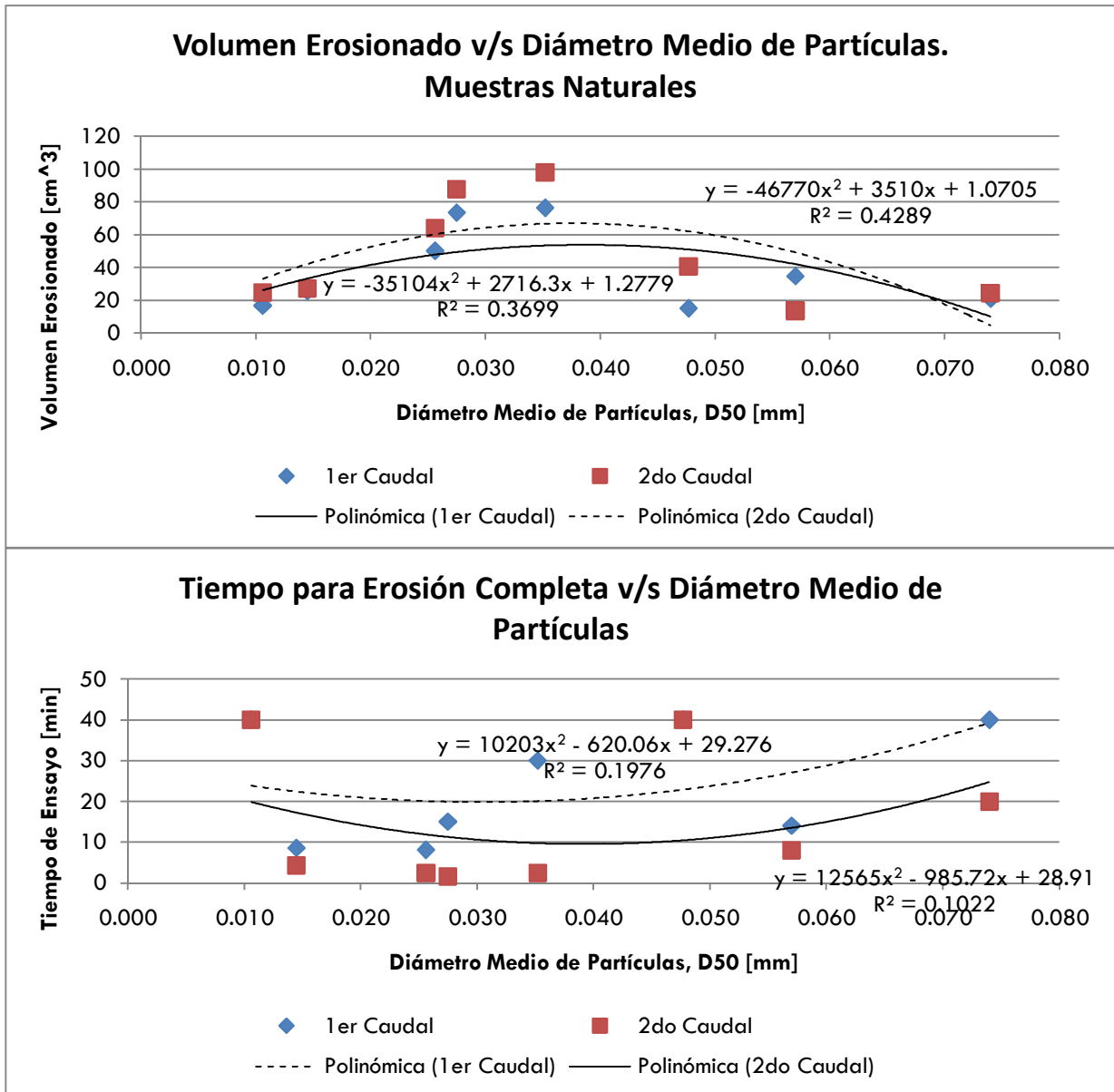


Figura 65: Relación entre la Erosión (Volumen Erosionado o Tiempo de Ensayo) y el Diámetro Medio de Partículas

En el caso del diámetro medio de partículas, en ambos ensayos realizados en muestras naturales, se propone una relación de tipo polinomial de grado 2 que es la que mejor se ajusta a los datos entregados. El hecho de que la mayor cantidad de volumen erosionado se encuentre cerca de los diámetros 0.04 y 0.05 mm se basa en el argumento de que las arenas finas y limos no plásticos tienen diámetros de entre 0.04 y 0.1 mm. Como se indica en la revisión bibliográfica, las partículas de arenas finas y de limos no plásticos no tienen diámetros lo suficientemente pequeños como para producir una unión electroquímica potente entre ellas, y lo suficientemente grandes como para evitar la erosión por el peso de las partículas o la fricción entre ellas. Es por ello que las relaciones polinomiales de grado 2 se aplican según lo concordante con la revisión bibliográfica.

Para el caso de las muestras remoldeadas, se aplica el mismo principio: las muestras que menos duran son las que tienen diámetros medios entre 0.04 y 0.05 mm. Sin embargo, en este caso las correlaciones son más bajas.

Al igual que las relaciones con los límites de plasticidad y la resistencia no drenada, los resultados obtenidos para los diámetros medios de partículas indican que este factor no es de los más importantes a la hora de analizar la resistencia a la erosión superficial de los suelos finos.

Analizando los gráficos, no se puede concluir acerca de qué caudal entrega mejor correlación, debido a que existen variables en donde el primer caudal entrega mejores correlaciones que el segundo y viceversa. Esto implica que el caudal, si bien es un factor del ensayo que cambia la magnitud del volumen erosionado, no es un factor que debiera afectar mayormente las formulaciones obtenidas entre las variables, si no que estos cambios deben venir por otros factores provenientes del ensayo, de las características de la muestra u otros parámetros (entre ellos del suelo) que acá no se maneja.

Las correlaciones entre caudales siempre indican que el segundo caudal es más dañino que el primero para el efecto de erosión de muestras. Esto se mide en términos de que el segundo caudal erosiona más volumen (en términos del volumen total erosionado) de suelo o acorta el tiempo de duración de los ensayos para el caso de las muestras remoldeadas. A priori es lo esperado, basado en el esfuerzo de corte calculado para ambos caudales (acápite 3.4.3). Al tener un esfuerzo de corte mayor, se produce mayor erosión en las muestras.

Las variables que muestran mejores correlaciones son el límite líquido de las muestras naturales y el diámetro medio de partículas de las muestras naturales. Sin embargo, con factores de correlaciones menores a 0.5 se puede asegurar que estos parámetros, si bien son importantes, no son los más determinantes al momento de escoger un suelo más o menos resistente a la erosión.

Las bajas correlaciones encontradas en general en las muestras de suelo remoldeadas, se deben al hecho de que se miden por el tiempo de término del ensayo y no por el parámetro del volumen erosionado. Esto implica que, por ejemplo, existan suelos que resistieron los 40 minutos del ensayo, pero que debido a que tienen parámetros muy distintos, hayan producido una dispersión que afectan los datos finales. Para mejorar este problema, se puede aumentar el tiempo de ensayo o graficar en distintos intervalos de tiempo.

A continuación, se presenta una serie de gráficos que muestran las relaciones de los volúmenes erosionados en distintos tiempos en muestras remoldeadas con las variables del suelo. Se omite el análisis de la relación con la resistencia no drenada del suelo, debido a que no se posee el dato de la

humedad que tiene el suelo en los intervalos de tiempo analizados y no se cree correcta una interpolación de un parámetro que afecta en demasía la resistencia del suelo.

Se procedió de la siguiente forma: para el primer caudal se graficó los volúmenes erosionados a los 5, 20 y 40 minutos. Estos tiempos fueron elegidos debido a que se producían la mayor parte de los cambios en las erosiones de los suelos. En los 5 minutos, se graficaban todos los volúmenes erosionados de los suelos y en el próximo intervalo de tiempo se graficaban todos los volúmenes erosionados menos los de los ensayos que habían terminado en el intervalo anterior. Por ejemplo, en el caso de los datos a los 20 minutos, se graficaban sólo aquellos suelos que sobrepasaban los 5 minutos. Por esta razón, existen muchas muestras de suelo que no tienen datos a los 20 o 40 minutos, debido a que el ensayo terminó previo a la medición que se debía realizar en dichos tiempos de ensayo.

Para graficar en el caso del caudal 2, se procedió de la misma manera incluyendo el dato de los 10 minutos debido a que existen muchos ensayos que se terminaron entre los 5 y 10 minutos. Para obtener la curva que más se ajusta en cada uno de los casos, se tomaron todas las interpolaciones indicadas con anterioridad en cada uno de los tiempos graficados y se deja la que mejor correlación tiene. Esto, además de entregar una relación entre el volumen erosionado y la propiedad analizada, puede indicar en qué tiempo las propiedades se ajustan más a la erosión producida.

Para el caso del primer caudal las curvas de tendencia siguen la misma lógica explicada con anterioridad. Se tiene 2 interpolaciones polinómicas de grado 2 y una logarítmica, alcanzando correlaciones de hasta 0.66. Esto demuestra que las correlaciones mejoran bastante con respecto a las indicadas anteriormente en las muestras remoldeadas, teniendo, en este caso como parámetro, el volumen erosionado y no el tiempo de finalización de los ensayos.

En el primer caudal, los 10 minutos parecen ser el tiempo en donde las propiedades del suelo se ajustan mejor a la erosión producida. Remitiéndose a los Gráficos de las Figuras 51 a 54, donde se muestra la variación del volumen erosionado con el tiempo, se nota que en los primero 5 minutos existe una dispersión grande de datos debido a que muchas muestras fallan por erosión en forma casi inmediata y que las tasas de erosión son muy altas en algunas de las muestras. Esto altera los datos y los dispersa demasiado para lograr buenas correlaciones. Hacia los 10 minutos, las muestras más débiles se erosionan por completo y las demás mantienen su desarrollo de erosión de manera más o menos constante, lo que produce una “estabilización” de la erosión en el tiempo. Debido a esto, a los 20 minutos sólo se toman los valores de los suelos que alcanzaron ese tiempo, y que se erosionaron siguiendo un comportamiento acorde a sus propiedades. A los 40 minutos muchas muestras ya no están, por lo que al tener menos datos, la dispersión es mucho más notoria que en el caso de los 20 minutos.

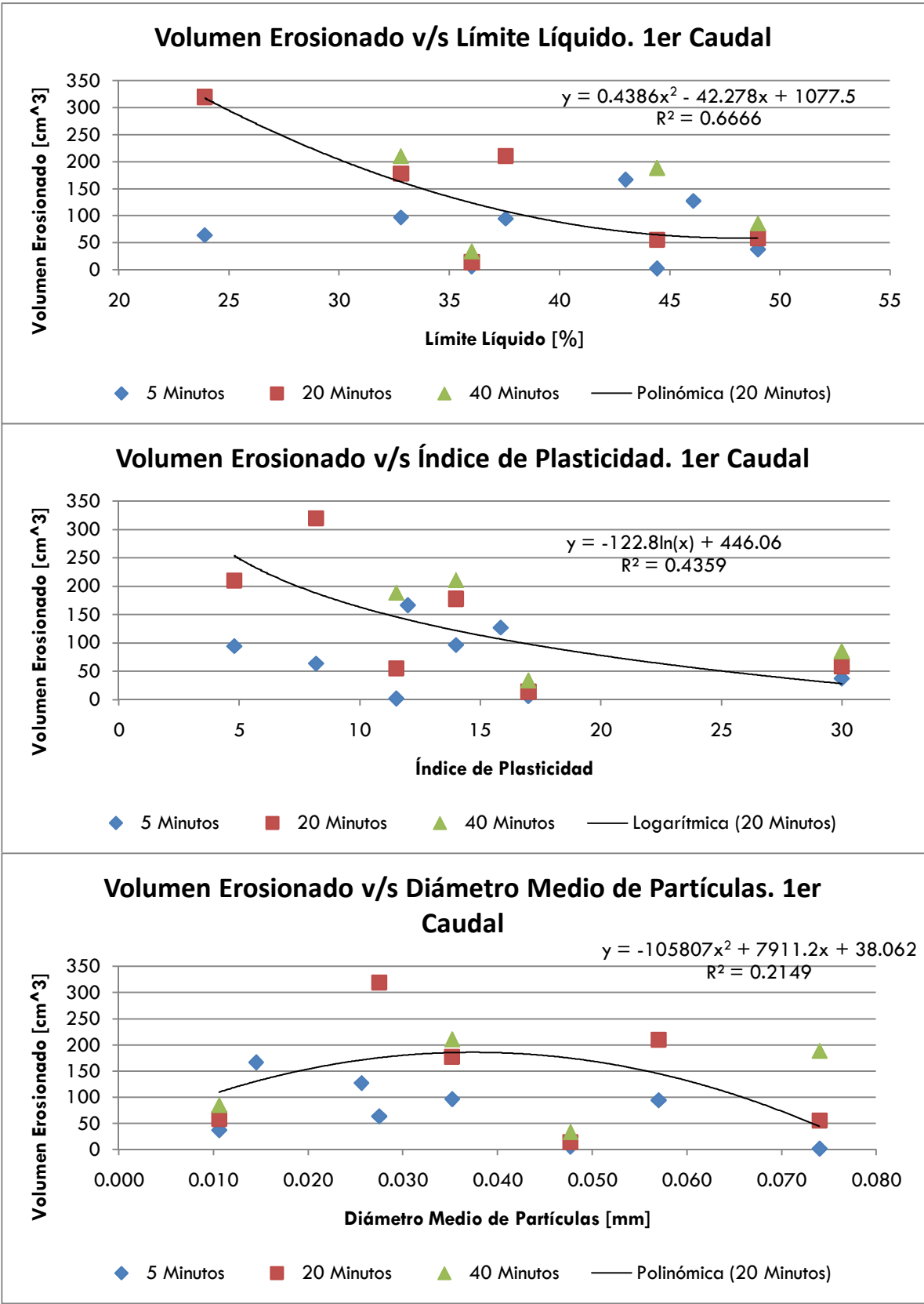


Figura 66: Volumen Erosionado en el Tiempo v/s Propiedades del Suelo. 1er Caudal

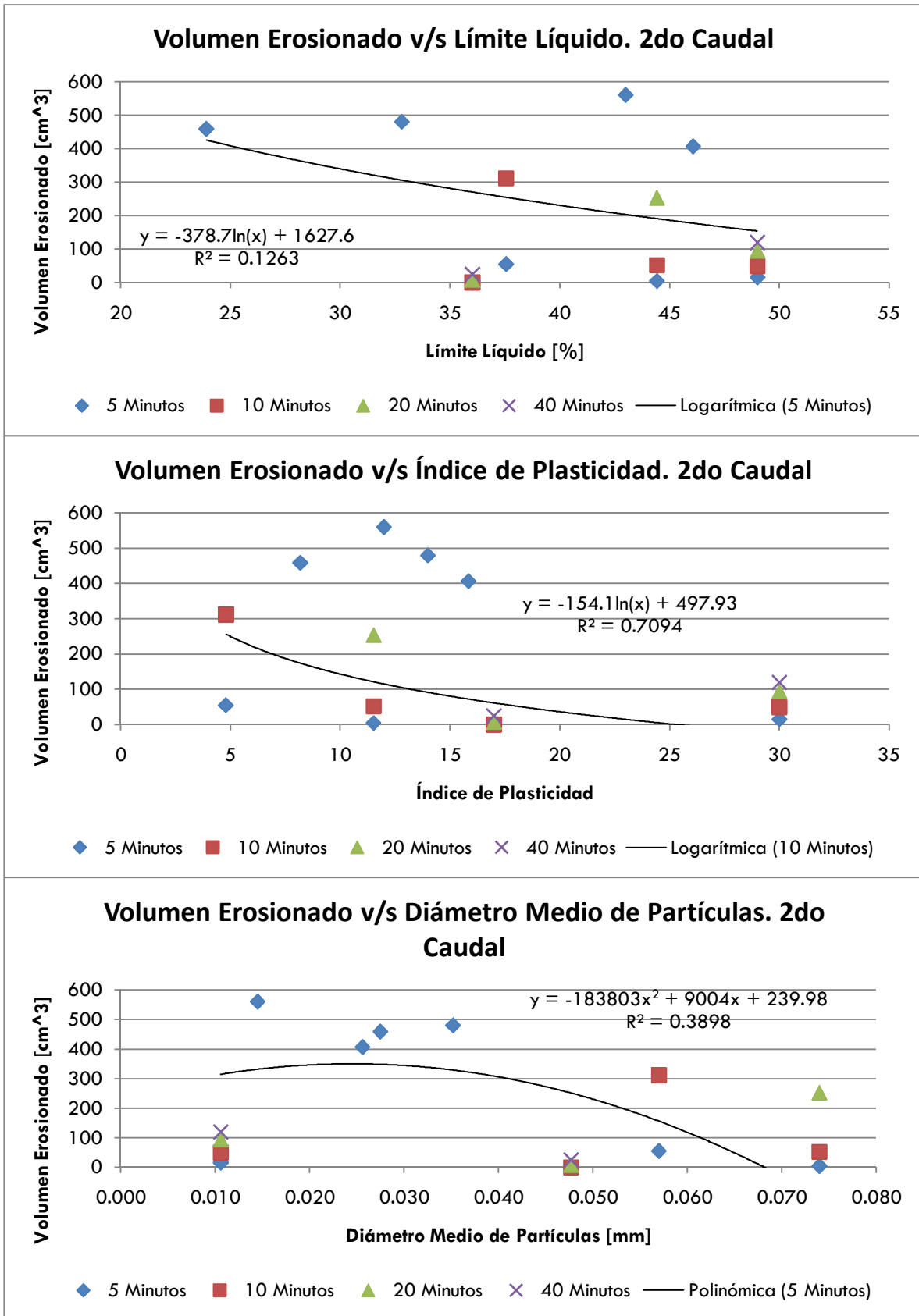


Figura 67: Volumen Erosionado en el Tiempo v/s Propiedades del Suelo. 2do Caudal

Para el caso del segundo caudal la lógica es similar. En este caso, al ser el esfuerzo de corte inducido por agua mayor que el caso del primer caudal, existen muchas muestras que fallan a los 1 y 3 minutos. Antes de los 5 minutos de medición, estas muestras producen datos muy dispersos que no son tomados en cuenta, por lo que sólo quedan los tipos de suelos que ya han estabilizado su erosión en el tiempo. En los suelos más resistentes (L3, ASF Y AM) se produce recién la primera medición a los 5 minutos, siendo estos suelos los que se comportan ante la erosión debido a sus propiedades y no a cambios violentos de esfuerzos. En el caso del índice de plasticidad, la curva mejor ajustada sucede a los 10 minutos debido a que la interpolación propuesta para los 5 minutos (polinomial de grado 2), si bien tenía un factor de correlación mayor al obtenido por la logarítmica a los 10 minutos, no seguía la tendencia esperada según lo revisado en esta investigación y por lo recopilado en la revisión bibliográfica.

Al igual que en el caso del 1er caudal, el hecho de tener como parámetro de medición el tiempo de ensayo, es un factor que afecta en demasía los resultados, ya que está acotado al tiempo máximo de ensayo y, además, entrega valores muy dispersos dados por los suelos más débiles.

7.7. RELACIÓN DE LA EROSIÓN CON PROPIEDADES NO CONTROLADAS EN ESTA INVESTIGACIÓN

Según la revisión bibliográfica, existen muchas variables que afectarían la resistencia de los suelos y que no están consideradas en la presente investigación.

En el caso del suelo de Sector 3 (L3), la presencia de gravillas en su estructura, permite una resistencia a la erosión mucho mayor que las muestras que son similares a estas (Sector 4, Sector 2 y Muestra 1). Como se muestra en la Figura 58 las gravillas proveen de protección a las partículas más finas además de ser, ellas por sí solas, más resistentes a la erosión por el peso que poseen.

Para el caso de la humedad inicial de la muestra, no existe una relación clara con la erosión producida. Existen muestras muy erosionadas que presentan baja humedad natural (muestra Roja, Camino La Pólvara y muestra de Puente Alto) y muestras con un alto porcentaje de humedad inicial que tampoco resisten de buena manera el paso superficial del flujo de agua (Sector 2). La humedad inicial de las muestras, debiese tener un mayor peso específico en la resistencia a la erosión si es que se tuviera el mismo tipo de suelo, al cual se le modificara sólo su humedad.

La densidad natural de las muestras (densidad seca), es un factor que tiene una relación creciente con la resistencia a la erosión por flujo superficial. Las densidades secas de las muestras de suelo (AM, L3), son las mayores entre las analizadas y precisamente estas muestras son las que

tienen una resistencia a la erosión mayor que las demás muestras. La muestra de San Felipe (ASF), que también tiene una gran resistencia a la erosión, presenta una densidad seca cercana a los 1.4 t/m^3 (véase el Anexo 3) siendo no de las mayores, pero también un valor alto con respecto a las demás muestras. El caso que es una excepción a la regla es el de la muestra obtenida en Puente Alto (APA). Esta muestra tiene una densidad seca de valor similar a las recién nombradas (1.43 t/m^3), pero sin embargo posee una débil resistencia a la erosión superficial. Al igual que en el caso de la humedad natural, para evaluar el verdadero efecto de la densidad de las muestras en la resistencia a la erosión, sería necesario contar con el mismo tipo de suelo y sólo hacer variar ese parámetro para relacionarlo con la resistencia a la erosión.

Como se muestra en las siguientes fotografías (Figura 68), existen 2 muestras que poseían una mayor proporción de materia orgánica que las demás: estas muestras son las 2 obtenidas del Camilo La Pólvora (muestra Roja, AR, y muestra Amarilla, AM). En este trabajo de título, el parámetro de la materia orgánica no es un parámetro concluyente respecto a la mayor o menor resistencia a la erosión superficial, debido a que ambas muestras mostraron comportamientos muy disímiles en los ensayos erosivos siendo que tenían una componente orgánica similar.

El último parámetro no controlado en esta investigación pero del cual se pueden obtener conclusiones, es la estructura del suelo. Este parámetro, forma una tendencia clara con respecto a la resistencia a la erosión de las muestras: incluso existiendo suelos que presentan una sensibilidad menor a 1.0, en todos los casos, la eliminación de la estructura original del suelo, influyó en un decaimiento de la resistencia a la erosión superficial. Sólo en el caso del ensayo con el segundo caudal de la muestra AM, se produce una erosión menor en el caso remoldeado, sin que esto signifique una disminución en la tendencia producida.

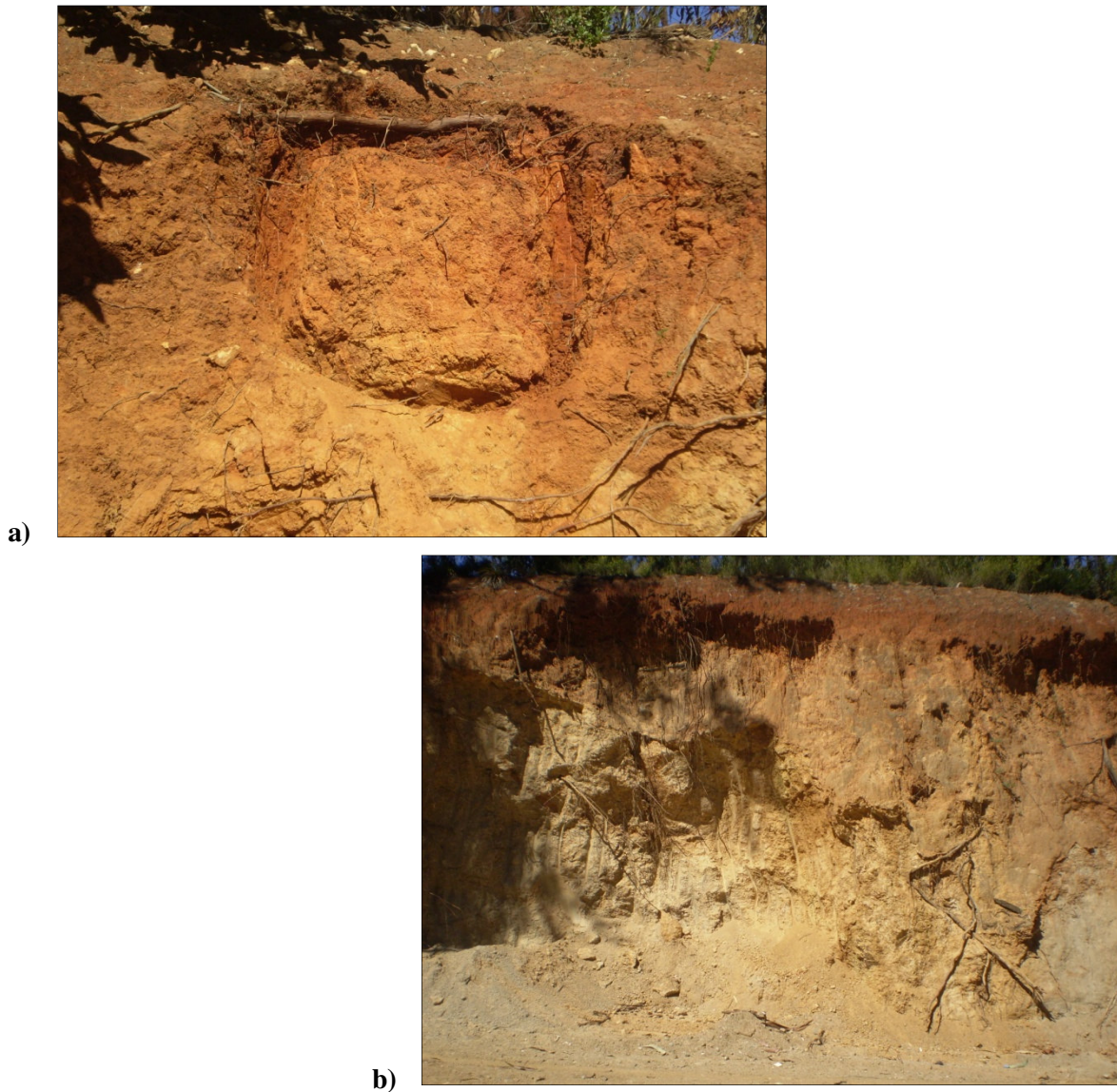


Figura 68: Materia Vegetal en Muestras del Camino La Pólvara, a) Muestra Roja, b) Muestra Amarilla.

7.8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN GENERAL

Con respecto a las formulaciones determinadas en este trabajo de título se puede inferir lo siguiente:

- Las formulaciones propuestas en los ensayos de muestras naturales, se obtuvieron en los tiempos de término del ensayo (40 minutos), y en el caso de las muestras remoldeadas, se ajustó la curva según la mejor interpolación realizada en diversos tiempos de ensayo. Tanto

en el caso natural como en el remoldeado, se testearon diversos tiempos según las mediciones realizadas de volumen erosionado y las correlaciones que en esos casos se obtenían, dejando sólo las mejores. Debido a que el comportamiento de los suelos depende de variados factores (ya mencionados), es que no se puede determinar una formulación que represente cada intervalo de tiempo. Es por esto que se propone que las formulaciones queden normalizadas por unidad de tiempo, teniendo en consideración que la relaciones entregadas en este trabajo de título representan un comportamiento estabilizado de los suelos (eliminando todo dato de erosión inmediata que produce dispersión de los datos) y, por lo tanto, representarían un valor promedio de la erosión con respecto a la variable que en cada caso se analiza.

- Los caudales de ensayo utilizados en esta investigación, fueron seleccionados según lo mencionado en el Capítulo 5. Las relaciones obtenidas para una misma variable muestran que los 2 caudales de diseño difieren, incluso, en el tipo de curva que mejor se ajusta a los datos obtenidos. En el caso de que se desee obtener una magnitud del suelo erosionado en relación con alguna de las variables acá analizadas, con un caudal distinto a los en este trabajo determinados, se recomienda realizar nuevos ensayos de erosión con el caudal de diseño correspondiente. En el caso que esta posibilidad no exista, se podrá interpolar entre las curvas para obtener los resultados buscados.
- El esfuerzo de corte producido por el agua aumenta con el aumento del caudal. En el flujo uniforme esto se traduce en un aumento de la altura de flujo. El esfuerzo inducido por el agua, superó el umbral de algunas muestras y en otras no fue lo suficientemente alto como para producir erosión. Según Zreik, Krishnappan, Germaine, Madsen y Ladd (1998), la resistencia a la erosión de un sedimento es, aproximadamente, un orden de magnitud menos que la resistencias al corte, tanto drenada como no drenada, por lo que el esfuerzo de corte inducido por el agua sobre los sedimentos, siendo de menor valor a las resistencias no drenadas de los suelos, fue capaz de producir la erosión que fue visible en dichas muestras de suelo. La razón entre los esfuerzos de corte determinados es de:

$$\frac{0.107 \text{ kg/cm}^2}{0.157 \text{ kg/cm}^2} = 0.68$$

, sin embargo en la mayor parte de las muestras naturales (en las remoldeadas es difícil analizar esta situación, debido a las fallas inmediatas producidas y a los diversos tiempos de término de ensayos), la razón entre el volumen erosionado en el primer caudal y el volumen erosionado en el segundo caudal es aproximadamente 0.8. Es decir, existe algún aspecto

que no está siendo tomado en consideración para obtener razones más similares entre estos 2 parámetros.

Los factores de correlación obtenidos en cada una de las variables analizadas, indican que éstas, si bien marcan una tendencia con respecto a la resistencia a la erosión de las muestras, no son las más importantes para determinar una formulación precisa del volumen erosionado esperado.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo de título presenta diversas correlaciones obtenidas entre el volumen erosionado en un suelo fino debido a un flujo superficial y algunas de sus propiedades como son la resistencia no drenada al corte, los límites de plasticidad y el diámetro medio de partículas.

Se realizaron un total de 32 ensayos, considerando 8 tipos de suelos distintos (4 suelos limosos y 4 suelos arcillosos), 2 caudales de diseño distintos (10.18 litros/minuto y 24.39 litros/ minuto), una pendiente fija (45°) y muestras en estado inalterado y remoldeado.

De las propiedades obtenidas de los suelos, se puede concluir que se abarca un gran rango de valores del diámetro medio de partículas y resistencia al corte no drenada validando las relaciones obtenidas tanto para la interpolación de nuevos datos de otro tipo de suelo fino de como para la extrapolación de éstos. Debido a que los suelos son todos de baja plasticidad, los valores del límite líquido están restringidos a valores no superiores a 50% y, por lo tanto, dicho límite, así como el índice de plasticidad, no se encuentran en un rango tan amplio como las otras propiedades del suelo analizadas en el presente trabajo de investigación.

Los ensayos de erosión se realizaron en un canal especialmente acondicionado para este fin. Este equipo de erosión tiene la capacidad de modificar tanto el caudal efectivo de erosión como la pendiente, por lo que podría ser utilizado para siguientes investigaciones del mismo tipo.

En términos generales, existen 3 tipos de suelos en los cuales la erosión fue bastante menor a la de las demás muestras. Estos suelos fueron: 2 suelos arcillosos (muestra Amarilla, código AM, obtenida del Camilo La Pólvora y una muestra obtenida en el Sector de San Felipe, código ASF) y un suelo limoso (muestra Sector 3, código L3, obtenida en el sector de la costa de la 9ª región). De las variables que se han analizado en este trabajo de título (límites de Atterberg, resistencia no drenada, humedad y diámetro de partículas) y de las cuales se tienen los valores, pero que no se han utilizado en los análisis realizados (densidad húmeda, densidad seca y sensibilidad), los mencionados suelos sólo tienen magnitudes similares en la densidad húmeda de terreno ($\gamma_{hL3} = 1.78 \text{ ton/m}^3$, $\gamma_{hASF} = 1.75 \text{ ton/m}^3$ y $\gamma_{hAM} = 1.75 \text{ ton/m}^3$).

Con respecto a la relación del volumen erosionado con los límites de Atterberg, los resultados indican que dicha relación es inversa, es decir, los suelos más plásticos son los que presentan menos potencial a la erosión.

Los datos obtenidos de los ensayos de erosión, muestran que la relación entre el volumen erosionado y el diámetro medio de partículas (D_{50}), tiene un *peak* de desgaste para muestras que presentan un valor de dicha propiedad en el rango comprendido entre 0.04 y 0.06 mm.

En el caso de la resistencia no drenada al corte (evaluada a la humedad de término del ensayo), se tiene una relación decreciente con el volumen erosionado, vale decir, a medida que aumenta la resistencia al corte de la muestra, menor es la erosión producida en ella.

Las correlaciones obtenidas en cada uno de los casos, marcan tendencias de comportamiento que se mantienen constantes a cierto tiempo de comenzada la erosión. En todos los ensayos, se produce un impacto inicial en el suelo que no representa el comportamiento frente a la erosión a largo plazo, dado principalmente por el transporte de partículas que se encuentran sueltas en la superficie de la muestra o la pérdida repentina de resistencia debido al aumento de la humedad de la muestra de suelo. Estos datos iniciales, crean una alta dispersión al inicio de los ensayos de erosión.

Las correlaciones determinadas entre el volumen erosionado y las propiedades del suelo, indican que las variables analizadas en este estudio no son las más determinantes a la hora de evaluar la resistencia a la erosión superficial. Existen otras variables como la estructura del suelo o la densidad de éste que tendrían un peso específico mayor a la hora de realizar un análisis de erosión.

En futuros estudios con el equipo de erosión se propone:

- Encontrar formulaciones empíricas entre la erosión superficial en suelo fino y otras propiedades de este.
- Analizar y determinar una fórmula para la variación del volumen erosionado con respecto a sólo una propiedad del suelo. Para este caso se podría tener un solo tipo de suelo y variar el parámetro en estudio.
- Incluir suelos granulares en el estudio y relacionarlo con parámetros comunes de este tipo de suelo (densidad relativa, ángulo de fricción).
- Incluir un análisis de tensión crítica de erosión y compararla con la tensión tractiva inducida por el agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansari, Sarfaraz, Kothiyari, Umesh y Ranga Raju, Kittur, 2003, “Influence of Cohesion on Scour under Submerged Circular Vertical Jets”, Journal of Hydraulic Engineering, pp 1014 – 1019.
- ASTM, 1984, “ASTM Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes (D 2487)”, Vol.7, Estados Unidos.
- ASTM, 1987, “ASTM Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure) (D 2488)”, Vol.10, Estados Unidos.
- ASTM, 1987, “ASTM Practices for Preserving and Transporting Soil Samples (D 4220)”, Estados Unidos.
- ASTM, 1994, “ASTM Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil (D2573)”, Estados Unidos.
- ASTM, 2006, “ASTM Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (D2166)”, Estados Unidos.
- ASTM, 2002, “ASTM Test Method for Particle Size Analysis of Soils (D422-63)”, Estados Unidos.
- ASTM, 2006, “ASTM Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clays Soils by Pinhole Test”, Estados Unidos.
- Ayala Carcedo F.J. y Andrew Posse F.J., 2006, “Manual de ingeniería de taludes”, 2ª Reimpresión, Publicado por Instituto Geológico Minero de España, Madrid, España, pp. 103 – 159.
- Bowles, J.E., 1996, “Foundation Analysis and Design”, 5ª Edición, McGraw-Hill Companies Ed., Estados Unidos.
- Briaud J., 2001, “Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp 105 – 113.

- Contreras, Marco, 1999, “Flujo Uniforme (Apunte de Clases), Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, Chile.
- Dirección de Vialidad de Chile, 2002, “Manual de Carreteras: Instrucciones y criterios de diseño”, Vol. 3, Parte III, Cap. 3.700., Chile.
- Garay, Hilda y Alva, Jorge, 1999, “Identificación y Ensayos en Suelos Dispersivos”. En: XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil: 16 al 20 de Noviembre de 1999, Huánuco, Perú.
- Instituto Geográfico Militar, 1984, “Geografía de Chile”, Tomo II: Geomorfología, 1ª Edición, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización, 1999, “NCh 1517/1 Of.79: Mecánica de Suelos – Límites de Consistencia – Parte 1: determinación del límite líquido”, Reimpresión, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización, 1999, “NCh 1517/2 Of.79: Mecánica de Suelos – Límites de Consistencia – Parte 2: determinación del límite plástico”, Reimpresión, Chile.
- López Jimeno Carlos, 2002, “Manual de estabilización de taludes”, 2ª Edición, Publicado por U.D. Proyectos, E.T.S.I. Minas – U.P.M., Madrid, España, pp287 – 386.
- Marienberg, Compañía de Mallas y Plásticos Ltda., “Malla Talud”, [en línea], < http://www.marienberg.cl/a_espanol/Frame_productos.htm>, [consulta: 29 de mayo de 2010].
- Morgan, R.P.C, Rickson R.J., 1995, “Slope stabilization and erosion control. A bioengineering approach”, 1ª Edición, Publicado por E & F N Spon, United Kingdom, Capítulo 5, pp 133 – 190.
- Morgan, R.P.C., 2005, “Soil Erosion and Conservation”, 3ª Edición, Publicado por Blackwell Publishing, pp. 304, USA.
- Navarro, Hernán, 2004, “Flume Measurements of Erosion Characteristics of Soils at Bridge Foundations in Georgia”, Tesis para optar al título de Master of Science in

Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, Estados Unidos.

- Salgado, Jorge, 1987, “Curso de Laboratorista Vial”. Volumen I. Geotecnia, 2ª Edición, Laboratorio Nacional de Vialidad, MOP, Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, 1982, “Mapa Geológico de Chile”, 1ª Edición, Chile.
- Verdugo, Jerónimo, 2007, “Desarrollo de una metodología para evaluar la susceptibilidad de los taludes de suelo al efecto de la erosión por flujo superficial”, Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Villagrán, Mauricio, “Hidráulica en Contornos Cerrados”, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- Zreik, Diana, Krishnappan, Bommana, Germaine, John, Madsen, Ole, Ladd, Charles, 1998, “Erosional and Mechanical Strengths of Deposited Cohesive Sediments”, Journal of Hydraulic Engineering, pp 1076 – 1084.

ANEXO 1
Especificaciones técnicas del equipo

Especificaciones de la Bomba:

- Marca : DIANA
- Potencia : 1 HP
- Frecuencia : 2800 RPM

Especificaciones del Motor:

- Marca : Lureye
- $\cos\phi$: 0.87
- Voltaje : 350V
- Potencia : 1.1 KW

Especificaciones Canal:

- Material : Planchas de acrílico de 1.0 cm de espesor
- Sección Transversal : 40 cm x 20 cm
- Largo : 2.0 m

Especificaciones Tuberías:

- Material : PVC 32 mm
- Tubería bomba-canal : Corrugada 32 mm

ANEXO 2

Calibración del perno para el sistema de subida de muestra

La calibración de la subida de la tuerca, constó de 4 mediciones. En cada número medición se registró el número de vueltas dadas a la tuerca y se midió el avance de la placa de acrílico que servía de referencia en las medidas.

Los resultados son los siguientes:

Nº Vueltas	Avance	
3 vueltas:	4,5 mm	Promedio: 4.2 mm
	4.0 mm	
	4.0 mm	
	<i>Por vuelta: 1.4 mm</i>	
5 vueltas:	7.0 mm	Promedio: 6.7 mm
	6.5 mm	
	6.5 mm	
	<i>Por vuelta: 1.34 mm</i>	
7 vueltas:	9.5 mm	Promedio: 9.0 mm
	9.0 mm	
	8.5 mm	
	<i>Por vuelta: 1.29 mm</i>	
10 vueltas:	13.0 mm	Promedio: 12.7 mm
	13.0 mm	
	13.2 mm	
	<i>Por vuelta: 1.31 mm</i>	

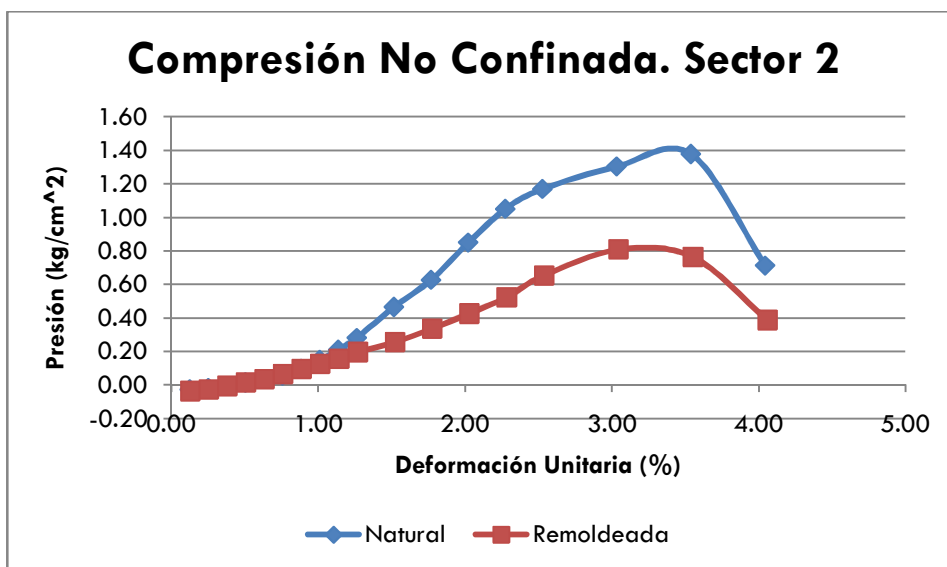
Promedio por Vuelta: 1.34 mm

ANEXO 3

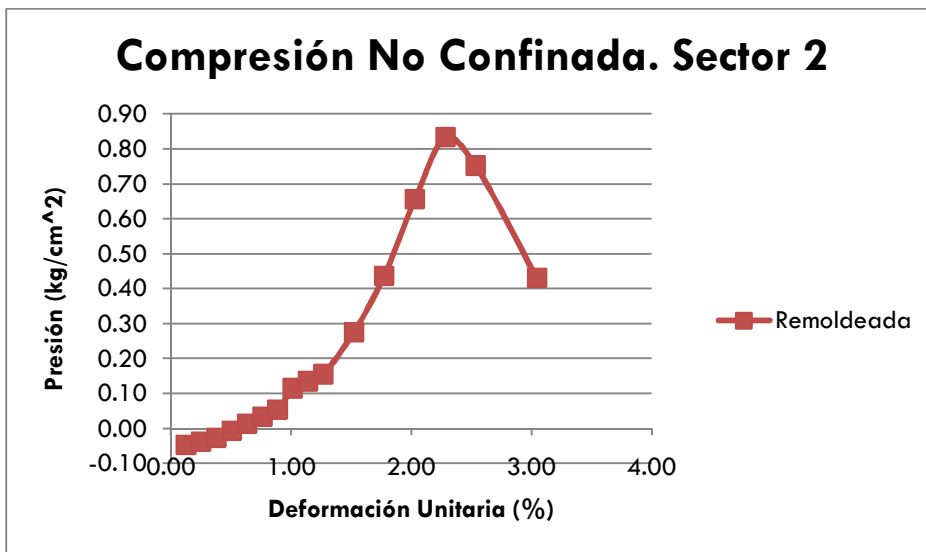
Resultados ensayos de resistencia a la compresión no confinada

Las siguientes tablas y gráficos, muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión no confinada realizados a las muestras de suelo.

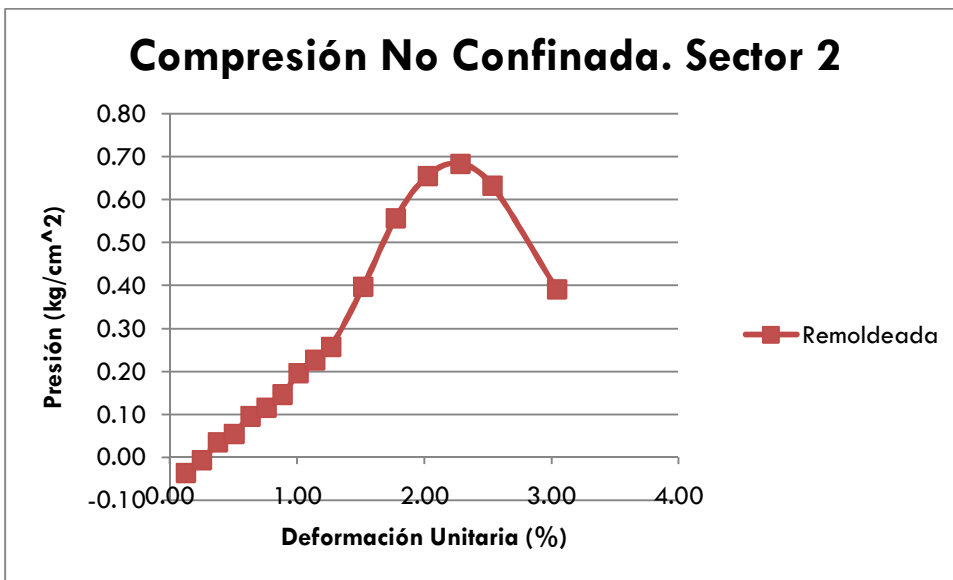
Suelo L2			
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.03	0.13	-0.04
0.25	-0.02	0.25	-0.03
0.38	-0.01	0.38	-0.01
0.51	0.01	0.51	0.01
0.63	0.03	0.63	0.03
0.76	0.05	0.76	0.06
0.88	0.10	0.89	0.09
1.01	0.15	1.01	0.12
1.14	0.21	1.14	0.16
1.26	0.28	1.27	0.20
1.52	0.46	1.52	0.26
1.77	0.63	1.78	0.34
2.02	0.85	2.03	0.42
2.27	1.05	2.28	0.52
2.53	1.17	2.54	0.65
3.03	1.30	3.04	0.81
3.54	1.38	3.55	0.76
4.04	0.71	4.06	0.39
Hum Natural	47.37 (%)	Hum Remold	45.99 (%)



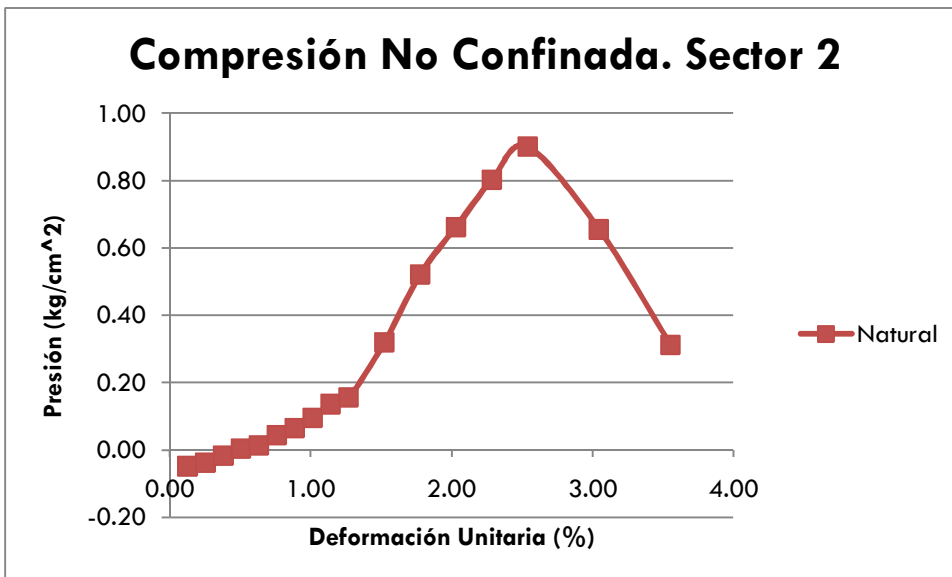
Suelo	L2
Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.05
0.25	-0.04
0.38	-0.03
0.51	-0.01
0.63	0.01
0.76	0.03
0.89	0.05
1.01	0.11
1.14	0.13
1.27	0.15
1.52	0.28
1.78	0.44
2.03	0.66
2.28	0.83
2.54	0.75
3.04	0.43
Hum	23.77
Remold	(%)



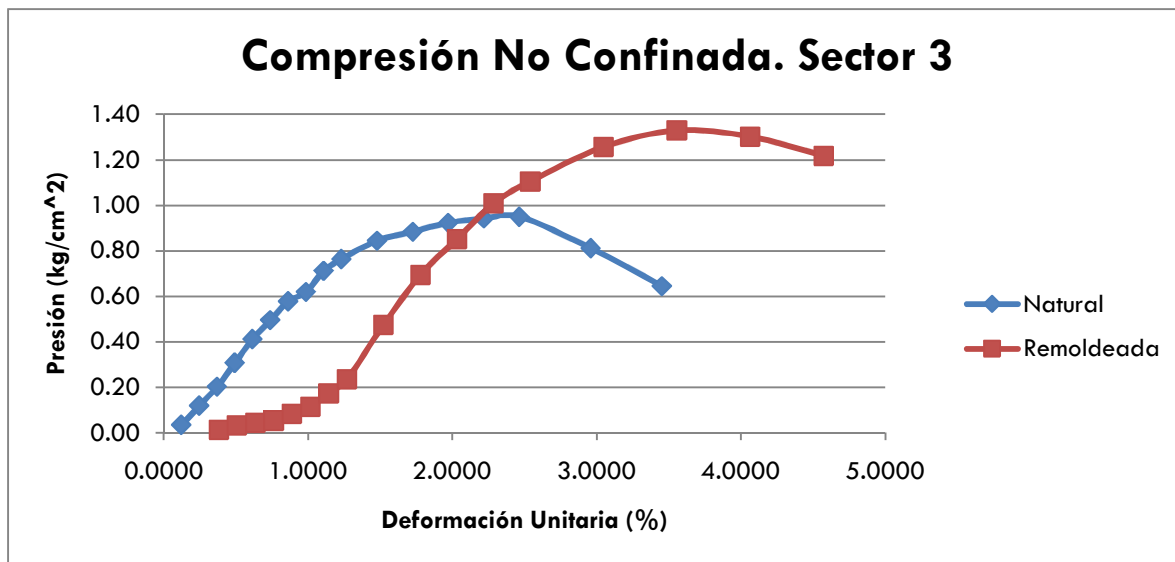
Suelo	L2
Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.04
0.25	-0.01
0.38	0.03
0.51	0.05
0.63	0.09
0.76	0.12
0.89	0.15
1.01	0.20
1.14	0.23
1.27	0.26
1.52	0.40
1.78	0.56
2.03	0.66
2.28	0.68
2.54	0.63
3.04	0.39
Hum	30.00
Remold	(%)



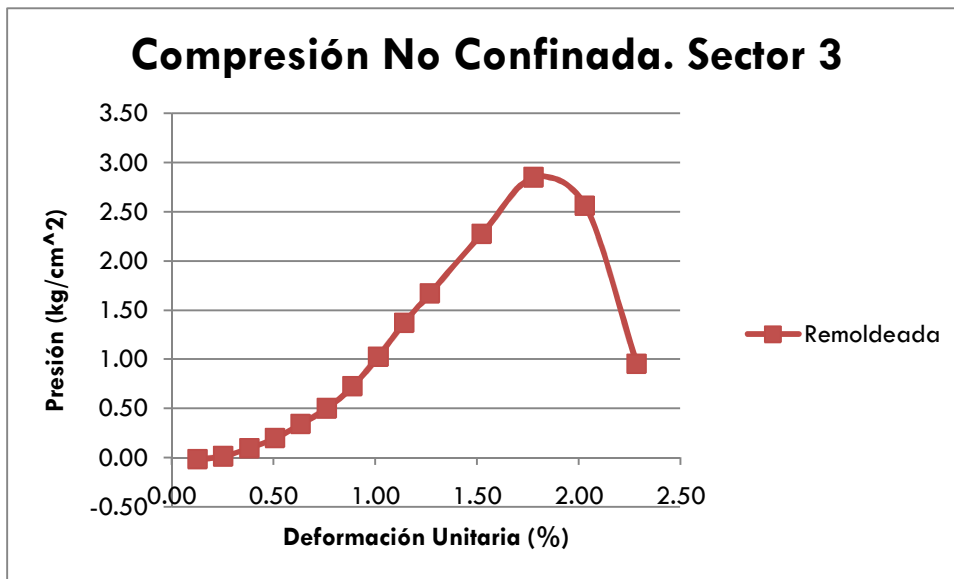
Suelo	L2
Natural	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.05
0.25	-0.04
0.38	-0.02
0.51	0.00
0.63	0.01
0.76	0.04
0.89	0.06
1.01	0.10
1.14	0.14
1.27	0.16
1.52	0.32
1.78	0.52
2.03	0.66
2.28	0.80
2.54	0.90
3.04	0.66
3.55	0.31
Hum	37.24
Natural	(%)



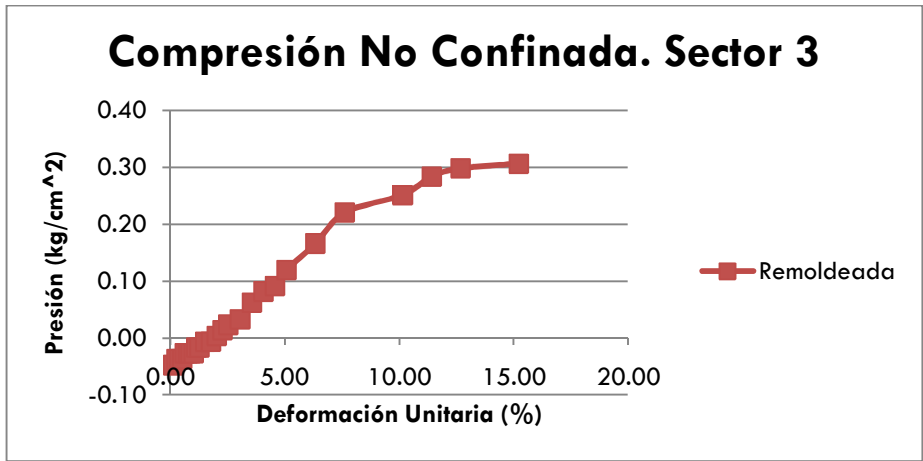
Suelo L3			
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.12	0.03	0.13	-0.03
0.25	0.12	0.25	-0.01
0.37	0.20	0.38	0.01
0.49	0.31	0.51	0.03
0.62	0.41	0.64	0.04
0.74	0.50	0.76	0.05
0.86	0.58	0.89	0.08
0.99	0.62	1.02	0.11
1.11	0.71	1.14	0.17
1.23	0.76	1.27	0.23
1.48	0.85	1.52	0.47
1.73	0.88	1.78	0.69
1.97	0.92	2.03	0.85
2.22	0.94	2.29	1.01
2.47	0.95	2.54	1.10
2.96	0.81	3.05	1.26
3.45	0.65	3.56	1.33
		4.06	1.30
		4.57	1.22
Hum Natural	32.84 (%)	Hum Remold	32.84 (%)



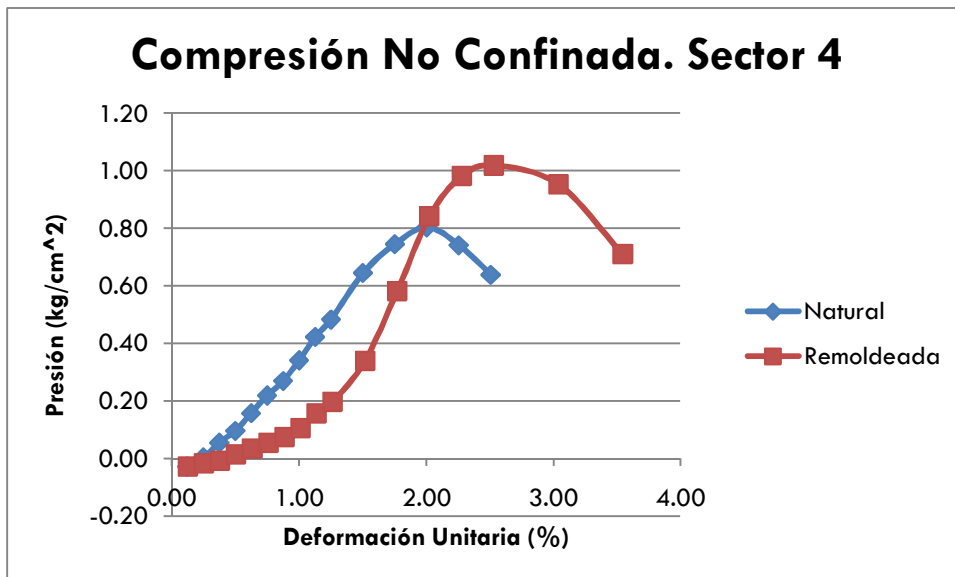
Suelo		L3
Remoldeada		
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	
0.13	-0.02	
0.25	0.01	
0.38	0.10	
0.51	0.20	
0.63	0.34	
0.76	0.50	
0.89	0.72	
1.01	1.03	
1.14	1.37	
1.27	1.67	
1.52	2.27	
1.78	2.85	
2.03	2.56	
2.28	0.95	
Hum	20.00	
Remoldeada	(%)	



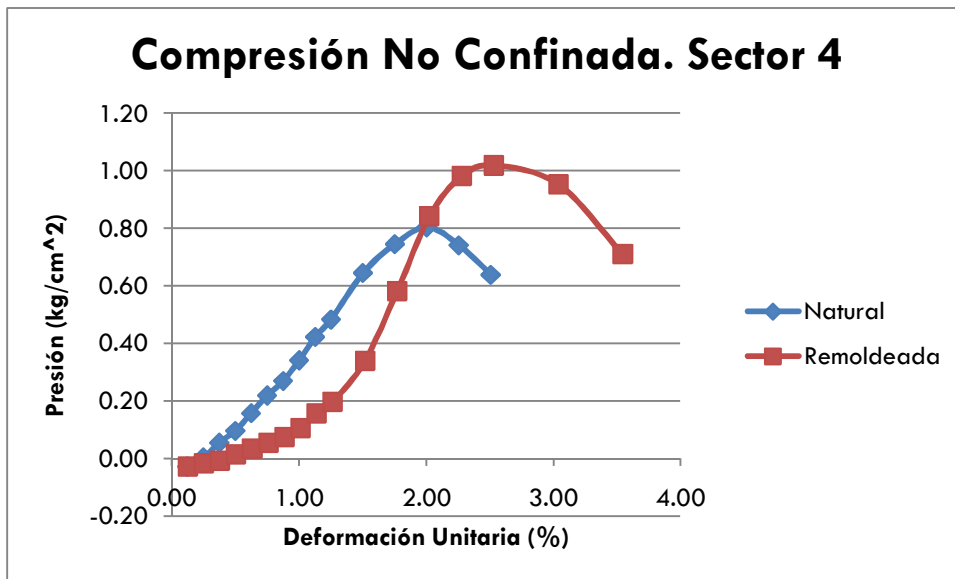
Suelo		L3	Hum	40.00
Remoldeada			Remoldeada	(%)
Def(%)		Carga(kg/cm ²)		
0.13		-0.05		
0.25		-0.04		
0.38		-0.04		
0.51		-0.04		
0.63		-0.03		
0.76		-0.03		
0.89		-0.03		
1.01		-0.03		
1.14		-0.02		
1.27		-0.02		
1.52		-0.01		
1.78		-0.01		
2.03		0.00		
2.28		0.01		
2.54		0.02		
3.04		0.03		
3.55		0.06		
4.06		0.08		
4.57		0.09		
5.07		0.12		
6.34		0.17		
7.61		0.22		
10.15		0.25		
11.42		0.28		
12.69		0.30		
15.22		0.31		



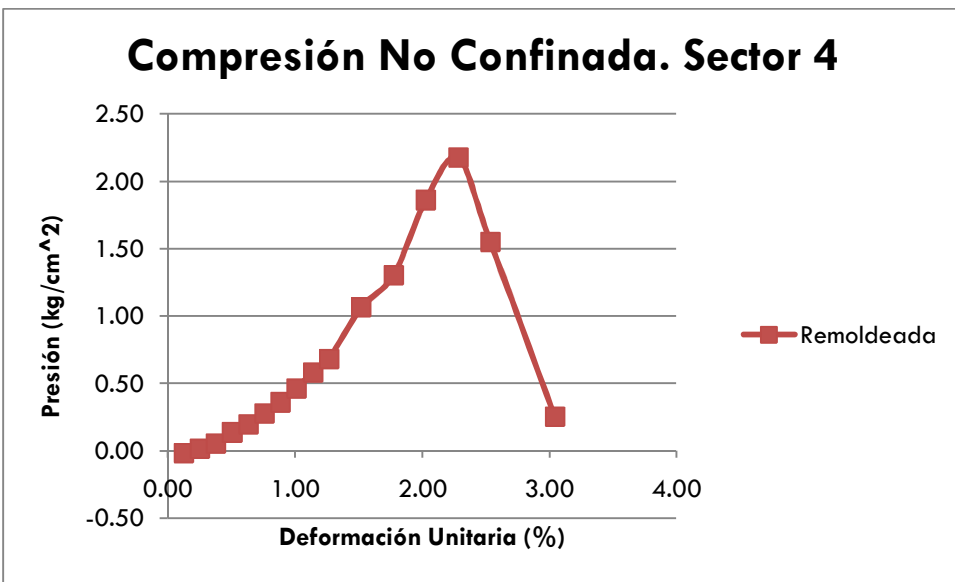
Suelo		L4 1ª Prueba	
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.03	0.13	-0.03
0.25	0.00	0.25	-0.02
0.38	0.05	0.38	-0.01
0.50	0.10	0.51	0.01
0.63	0.16	0.63	0.03
0.75	0.22	0.76	0.05
0.88	0.27	0.89	0.07
1.00	0.34	1.01	0.11
1.13	0.42	1.14	0.16
1.25	0.48	1.27	0.20
1.50	0.65	1.52	0.34
1.76	0.75	1.77	0.58
2.01	0.80	2.03	0.84
2.26	0.74	2.28	0.98
2.51	0.64	2.53	1.02
		3.04	0.95
		3.55	0.71
Hum	35.90	Hum	31.40
Natural	(%)	Remold	(%)



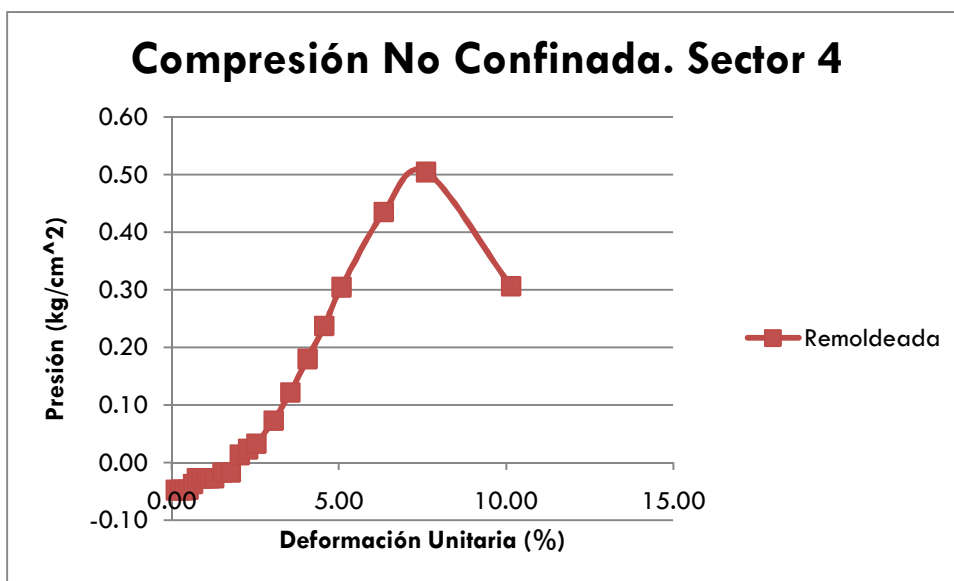
Suelo		L4 2ª Prueba	
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.12	-0.01	0.13	-0.05
0.25	0.01	0.25	-0.02
0.37	0.02	0.38	0.01
0.50	0.07	0.51	0.02
0.62	0.13	0.63	0.04
0.75	0.22	0.76	0.06
0.87	0.34	0.89	0.15
1.00	0.52	1.01	0.24
1.12	0.62	1.14	0.36
1.25	0.73	1.27	0.52
1.49	0.80	1.52	0.84
1.74	0.93	1.78	1.06
1.99	1.05	2.03	1.20
2.24	1.08	2.28	1.34
2.49	1.02	2.54	1.39
2.99	0.55	3.04	1.25
		3.55	0.94
Hum	30.65	Hum	27.56
Natural	(%)	Remold	(%)



Suelo		L4
Remoldeada		
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	
0.13	-0.02	
0.25	0.01	
0.38	0.05	
0.51	0.14	
0.63	0.20	
0.76	0.28	
0.89	0.36	
1.01	0.46	
1.14	0.58	
1.27	0.68	
1.52	1.06	
1.78	1.30	
2.03	1.86	
2.28	2.18	
2.54	1.55	
3.04	0.25	
Hum	20.00	
Remoldeada	(%)	



Suelo		L4	Hum	40.00
Remoldeada			Remoldeada	(%)
Def(%)	Carga(kg/cm ²)			
0.13	-0.05			
0.25	-0.05			
0.38	-0.05			
0.51	-0.05			
0.63	-0.04			
0.76	-0.03			
0.89	-0.03			
1.01	-0.03			
1.14	-0.03			
1.27	-0.03			
1.52	-0.02			
1.78	-0.02			
2.03	0.01			
2.28	0.02			
2.54	0.03			
3.04	0.07			
3.55	0.12			
4.06	0.18			
4.57	0.24			
5.07	0.30			
6.34	0.43			
7.61	0.50			
10.15	0.31			

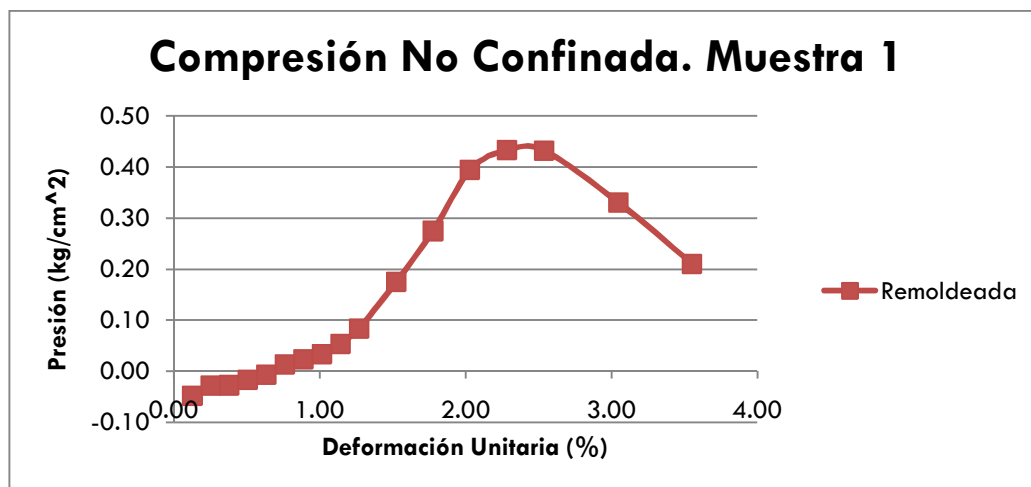


Muestra 1 (L1): Resistencia No Drenada al Corte en la Humedad Natural, obtenida mediante Veleta de Corte.

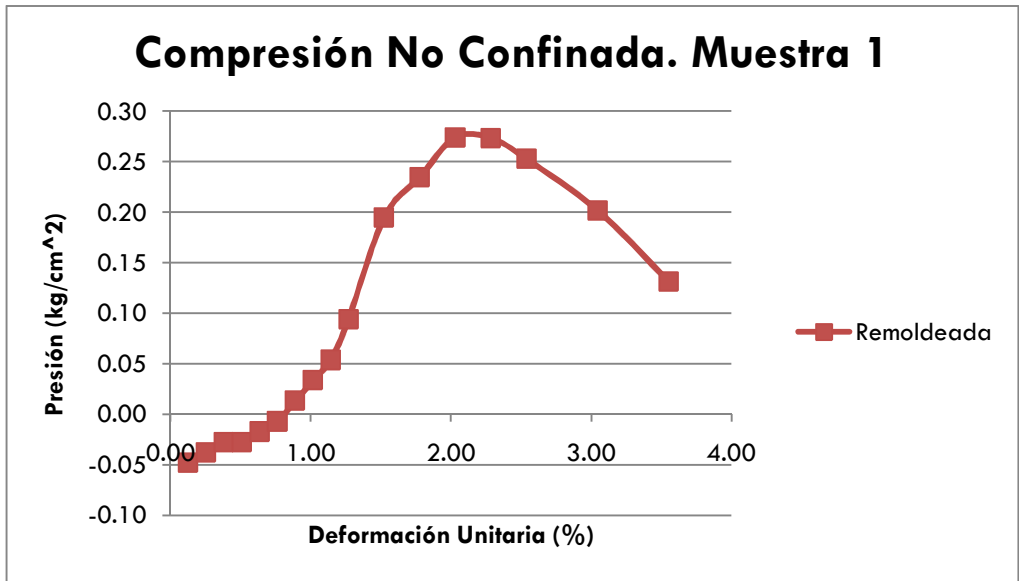
	Natural	Remoldeada
Resistencia No Drenada (Su) [kg/cm ²]	0.98	0.37

Humedad Natural: 53.61 %

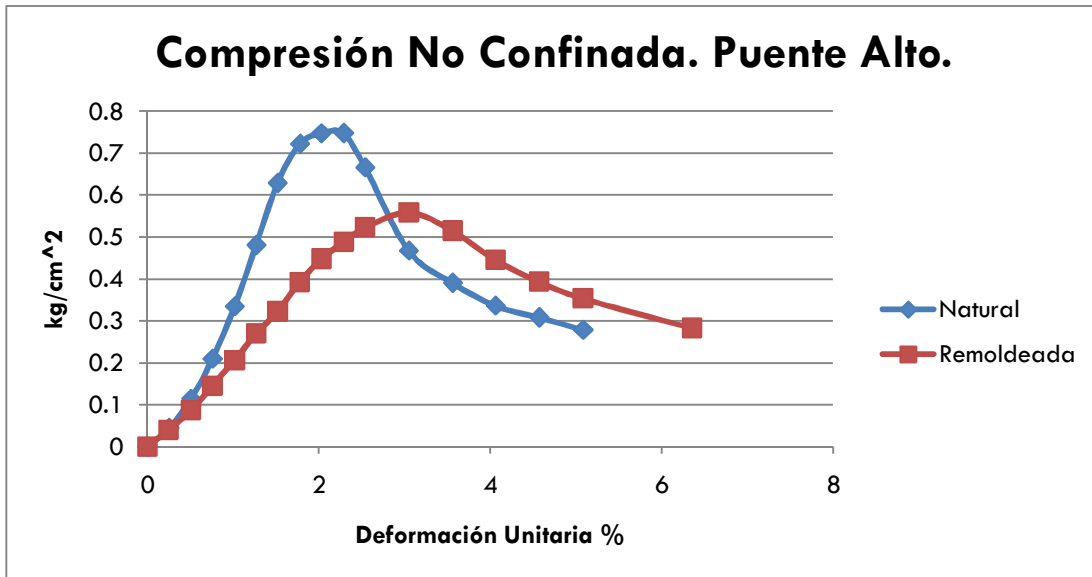
Suelo		L1
Remoldeada		
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	
0.13	-0.05	
0.25	-0.03	
0.38	-0.03	
0.51	-0.02	
0.63	-0.01	
0.76	0.01	
0.89	0.02	
1.01	0.03	
1.14	0.05	
1.27	0.08	
1.52	0.17	
1.78	0.27	
2.03	0.39	
2.28	0.43	
2.54	0.43	
3.04	0.33	
3.55	0.21	
Hum	20.00	
Remoldeada	(%)	



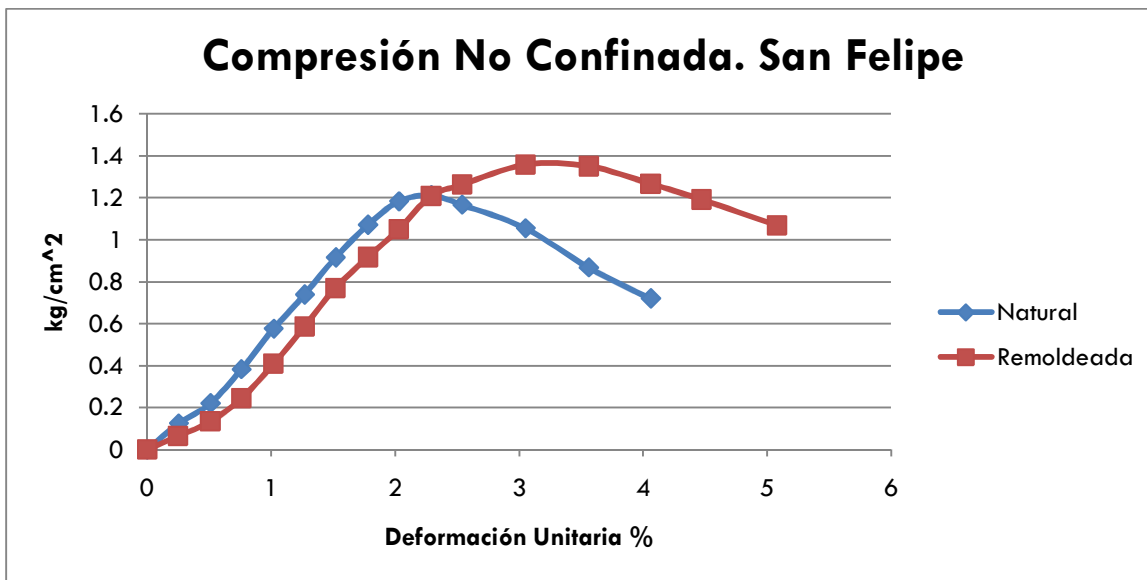
Suelo		L1
Remoldeada		
Def(%)		Carga(kg/cm ²)
0.13		-0.05
0.25		-0.04
0.38		-0.03
0.51		-0.03
0.63		-0.02
0.76		-0.01
0.89		0.01
1.01		0.03
1.14		0.05
1.27		0.09
1.52		0.19
1.78		0.23
2.03		0.27
2.28		0.27
2.54		0.25
3.04		0.20
3.55		0.13
Hum		33.75
Remoldeada		(%)



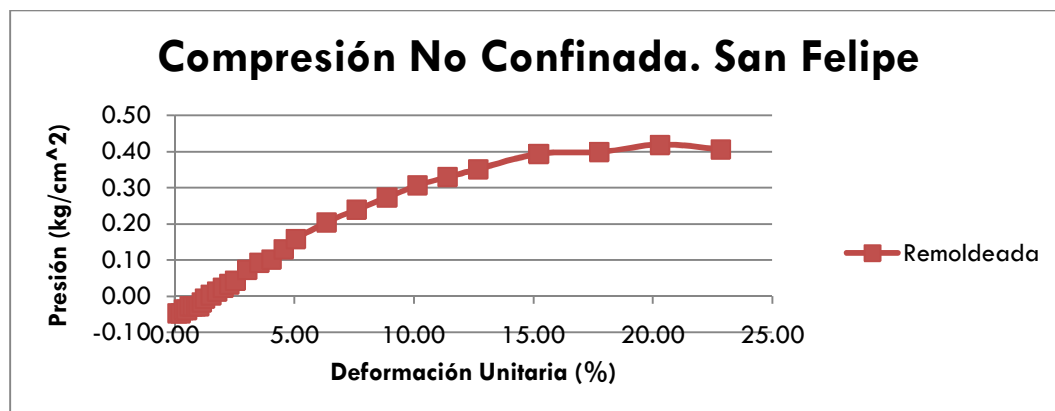
Suelo		APA	
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.04	0.25	0.04
0.51	0.11	0.51	0.09
0.76	0.21	0.76	0.15
1.02	0.33	1.02	0.21
1.27	0.48	1.27	0.27
1.52	0.63	1.52	0.32
1.78	0.72	1.78	0.39
2.03	0.75	2.03	0.45
2.29	0.75	2.29	0.49
2.54	0.67	2.54	0.52
3.05	0.47	3.05	0.56
3.56	0.39	3.56	0.52
4.06	0.34	4.06	0.45
4.57	0.31	4.57	0.39
5.08	0.28	5.08	0.35
		6.35	0.28
Hum	25.35	Hum	26.06
Natural	(%)	Remold	(%)



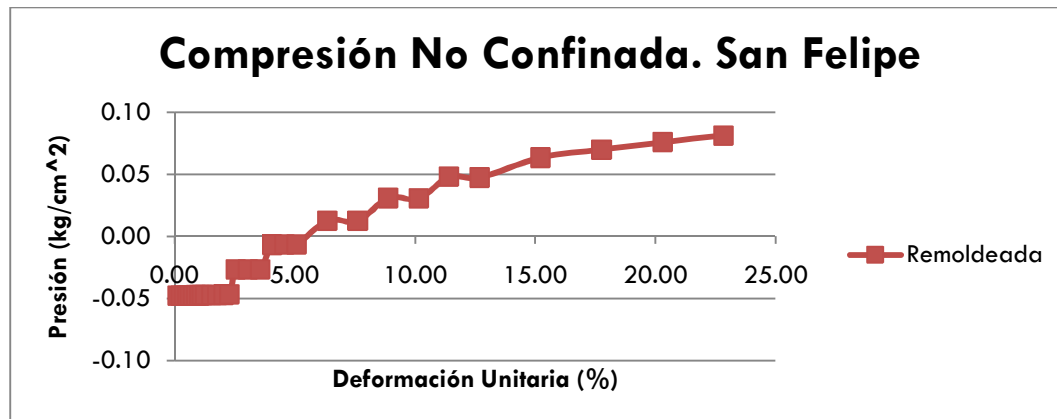
Suelo		ASF	
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.12	0.25	0.06
0.51	0.22	0.51	0.13
0.76	0.38	0.76	0.24
1.02	0.58	1.02	0.41
1.27	0.74	1.27	0.59
1.52	0.92	1.52	0.77
1.78	1.07	1.78	0.92
2.03	1.18	2.03	1.05
2.29	1.21	2.29	1.21
2.54	1.17	2.54	1.26
3.05	1.06	3.05	1.36
3.56	0.87	3.56	1.35
4.06	0.72	4.06	1.27
		4.47	1.19
		5.08	1.07
Hum	26.54	Hum	22.55
Natural	(%)	Remold	(%)



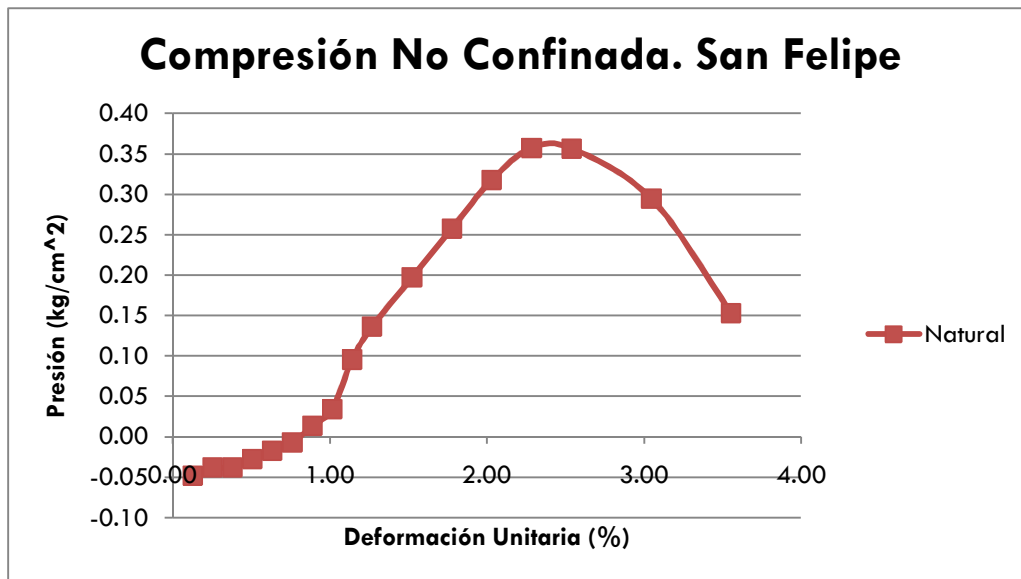
Suelo		ASF	Hum	28.00
Remoldeada			Remoldeada	(%)
Def(%)		Carga(kg/cm ²)		
0.13		-0.05		
0.25		-0.05		
0.38		-0.04		
0.51		-0.04		
0.63		-0.03		
0.76		-0.03		
0.89		-0.03		
1.01		-0.03		
1.14		-0.02		
1.27		-0.01		
1.52		0.00		
1.78		0.01		
2.03		0.02		
2.28		0.03		
2.54		0.04		
3.04		0.07		
3.55		0.09		
4.06		0.10		
4.57		0.13		
5.07		0.16		
6.34		0.20		
7.61		0.24		
8.88		0.27		
10.15		0.31		
11.42		0.33		
12.69		0.35		
15.22		0.39		
17.76		0.40		
20.30		0.42		
22.84		0.41		



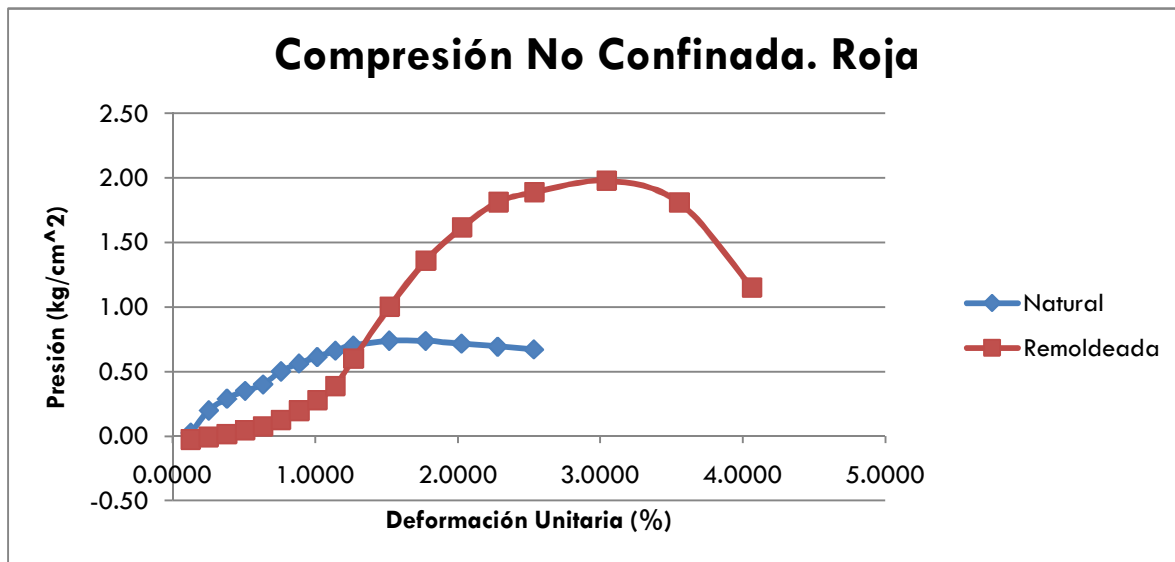
Suelo		ASF	Hum	36.00
Remoldeada			Remoldeada	(%)
Def(%)		Carga(kg/cm ²)		
0.13		-0.05		
0.25		-0.05		
0.38		-0.05		
0.51		-0.05		
0.63		-0.05		
0.76		-0.05		
0.89		-0.05		
1.01		-0.05		
1.14		-0.05		
1.27		-0.05		
1.52		-0.05		
1.78		-0.05		
2.03		-0.05		
2.28		-0.05		
2.54		-0.03		
3.04		-0.03		
3.55		-0.03		
4.06		-0.01		
4.57		-0.01		
5.07		-0.01		
6.34		0.01		
7.61		0.01		
8.88		0.03		
10.15		0.03		
11.42		0.05		
12.69		0.05		
15.22		0.06		
17.76		0.07		
20.30		0.08		
22.84		0.08		



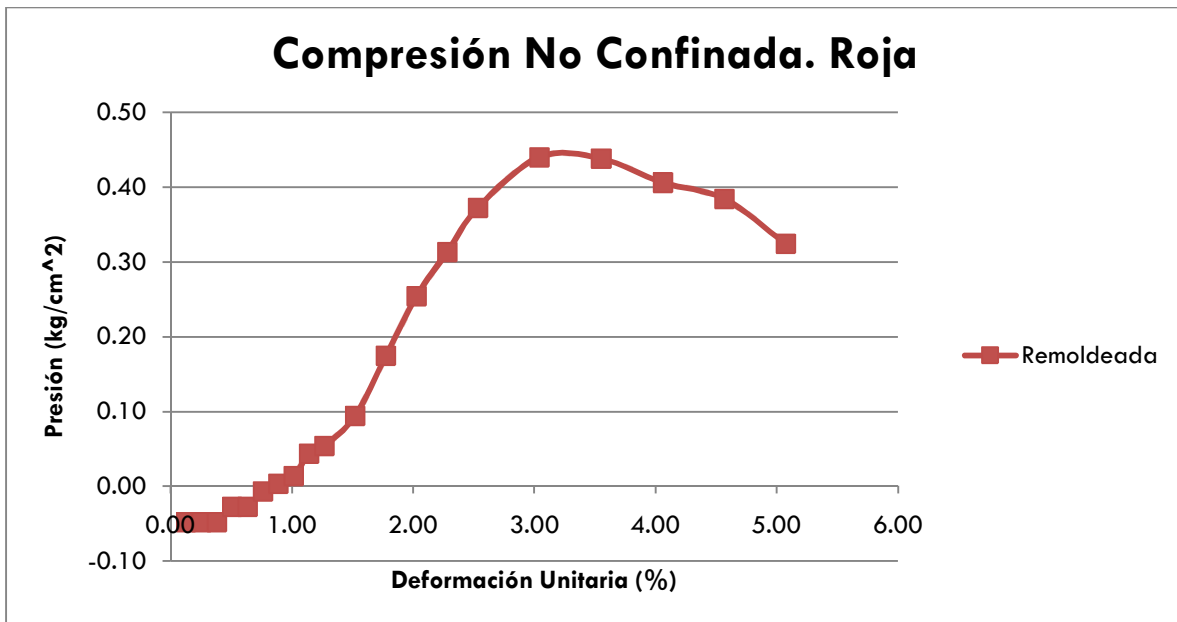
Suelo	ASF
Natural	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.05
0.25	-0.04
0.38	-0.04
0.51	-0.03
0.63	-0.02
0.76	-0.01
0.89	0.01
1.01	0.03
1.14	0.10
1.27	0.14
1.52	0.20
1.78	0.26
2.03	0.32
2.28	0.36
2.54	0.36
3.04	0.29
3.55	0.15
Hum	30.05
Natural	(%)



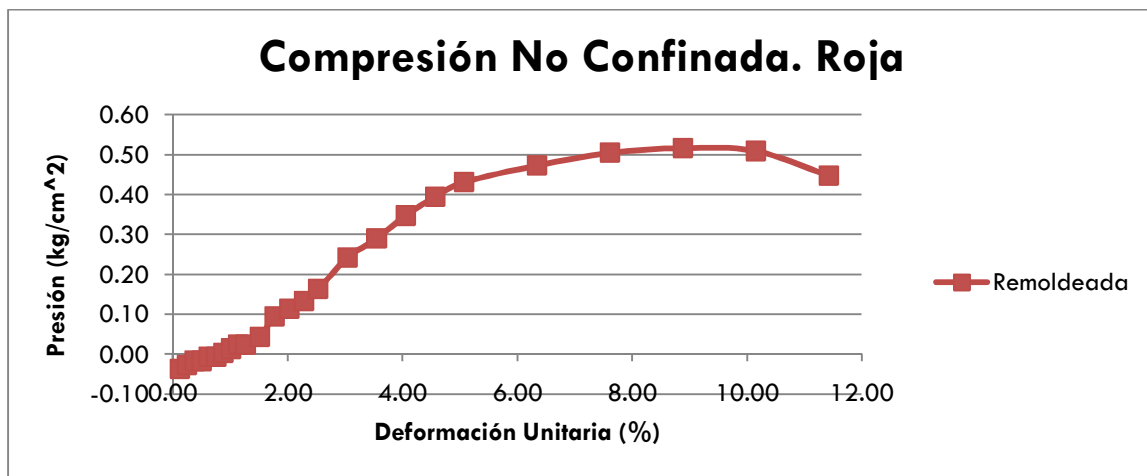
Suelo		AR	
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	0.02	0.13	-0.03
0.25	0.20	0.25	-0.01
0.38	0.29	0.38	0.01
0.51	0.35	0.51	0.04
0.63	0.40	0.64	0.07
0.76	0.50	0.76	0.13
0.89	0.56	0.89	0.20
1.01	0.61	1.02	0.28
1.14	0.66	1.14	0.39
1.27	0.70	1.27	0.60
1.52	0.74	1.52	1.00
1.77	0.74	1.78	1.36
2.03	0.72	2.03	1.62
2.28	0.69	2.29	1.81
2.53	0.67	2.54	1.89
		3.05	1.98
		3.56	1.81
		4.06	1.15
Hum	21.37	Hum	21.37
Natural	(%)	Remold	(%)



Suelo	AR
Remoldeada	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.05
0.25	-0.05
0.38	-0.05
0.51	-0.03
0.63	-0.03
0.76	-0.01
0.89	0.00
1.01	0.01
1.14	0.04
1.27	0.05
1.52	0.09
1.78	0.17
2.03	0.25
2.28	0.31
2.54	0.37
3.04	0.44
3.55	0.44
4.06	0.41
4.57	0.38
5.07	0.32
Hum	26.00
Remoldeada	(%)

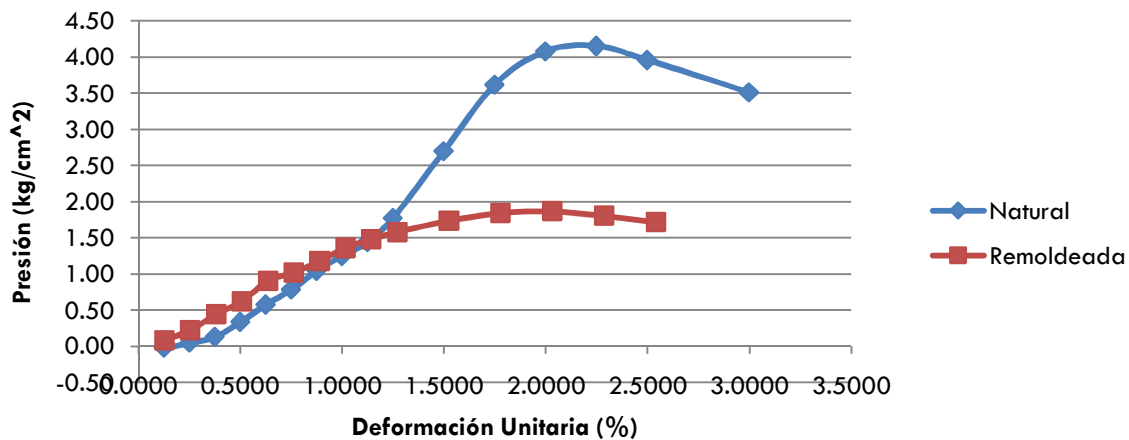


Suelo	AR
Remoldeada	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.04
0.25	-0.03
0.38	-0.02
0.51	-0.02
0.63	-0.01
0.76	-0.01
0.89	0.00
1.01	0.01
1.14	0.02
1.27	0.02
1.52	0.04
1.78	0.09
2.03	0.11
2.28	0.13
2.54	0.16
3.04	0.24
3.55	0.29
4.06	0.35
4.57	0.39
5.07	0.43
6.34	0.47
7.61	0.50
8.88	0.52
10.15	0.51
11.42	0.45
Hum	32.00
Remoldeada	(%)

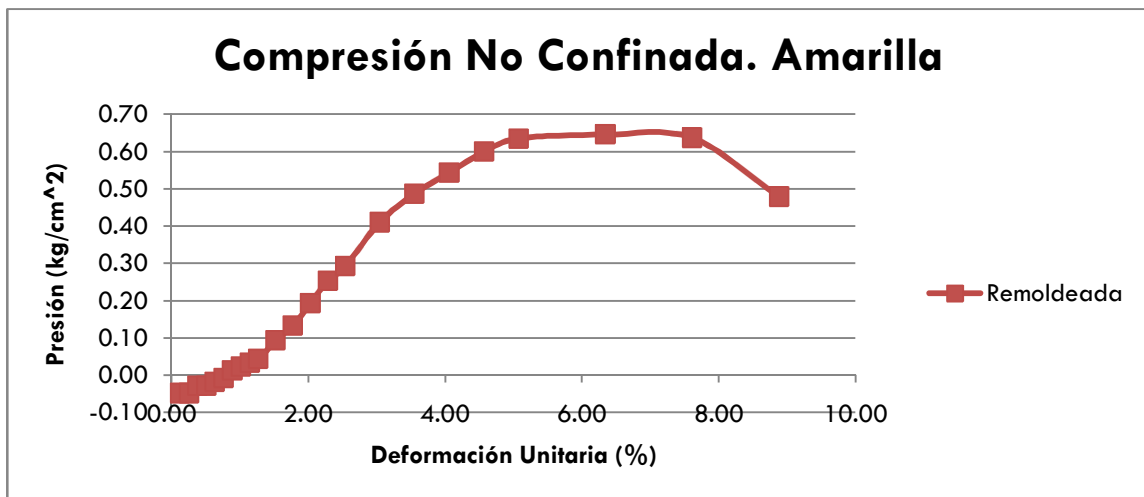


Suelo		AM	
Natural		Remoldeado	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)	Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.12	-0.02	0.13	0.09
0.25	0.05	0.25	0.22
0.37	0.13	0.38	0.45
0.50	0.34	0.51	0.63
0.62	0.58	0.64	0.91
0.75	0.78	0.76	1.02
0.87	1.04	0.89	1.18
1.00	1.25	1.02	1.36
1.12	1.44	1.14	1.48
1.25	1.77	1.27	1.58
1.50	2.70	1.52	1.74
1.75	3.62	1.78	1.85
2.00	4.08	2.03	1.87
2.25	4.15	2.29	1.81
2.50	3.96	2.54	1.72
3.00	3.51		
Hum	16.67	Hum	19.86
Natural	(%)	Remold	(%)

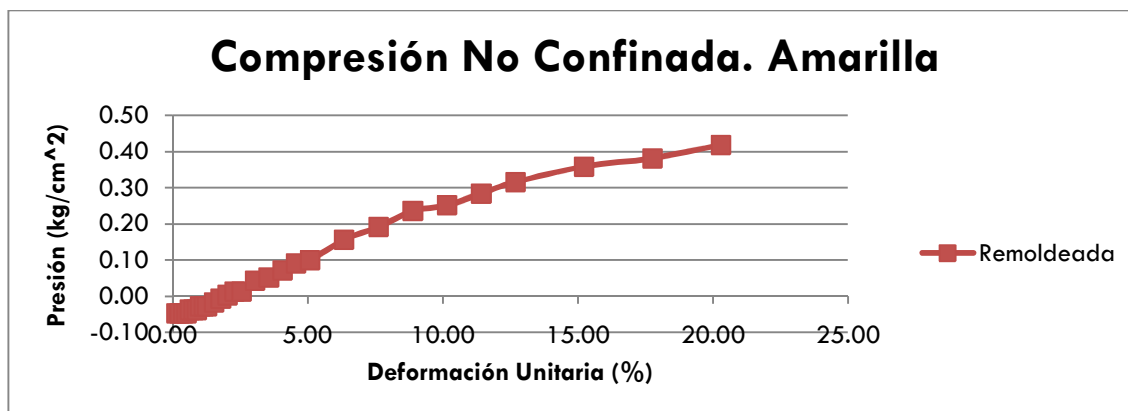
Compresión No Confinada. Amarilla



Suelo	AM
Remoldeada	
Def(%)	Carga(kg/cm ²)
0.13	-0.05
0.25	-0.05
0.38	-0.03
0.51	-0.03
0.63	-0.02
0.76	-0.01
0.89	0.01
1.01	0.02
1.14	0.03
1.27	0.04
1.52	0.09
1.78	0.13
2.03	0.19
2.28	0.25
2.54	0.29
3.04	0.41
3.55	0.49
4.06	0.54
4.57	0.60
5.07	0.64
6.34	0.65
7.61	0.64
8.88	0.48
Hum	26.00
Remoldeada	(%)



Suelo		AM	Hum	32.00
Remoldeada			Remoldeada	(%)
Def(%)		Carga(kg/cm ²)		
0.13		-0.05		
0.25		-0.05		
0.38		-0.05		
0.51		-0.05		
0.63		-0.04		
0.76		-0.04		
0.89		-0.04		
1.01		-0.03		
1.14		-0.03		
1.27		-0.03		
1.52		-0.02		
1.78		-0.01		
2.03		0.00		
2.28		0.01		
2.54		0.01		
3.04		0.04		
3.55		0.05		
4.06		0.07		
4.57		0.09		
5.07		0.10		
6.34		0.16		
7.61		0.19		
8.88		0.24		
10.15		0.25		
11.42		0.28		
12.69		0.32		
15.22		0.36		
17.76		0.38		
20.30		0.42		
22.84		0.08		



ANEXO 4

Valores de los límites de Atterberg de las muestras de suelo

Las siguientes tablas, muestran los límites de Atterberg obtenido en cada una de las muestras de suelo analizadas:

	LL (%)	LP (%)	IP
Sector 2	46	30	16

	LL (%)	LP (%)	IP
Sector 3	44	33	12

	LL (%)	LP (%)	IP
Sector 4	38	33	5

	LL (%)	LP (%)	IP
Muestra 1	43	31	12

	LL (%)	LP (%)	IP
Puente Alto	24	16	8

	LL (%)	LP (%)	IP
San Felipe	49	19	30

	LL (%)	LP (%)	IP
Muestra Roja	33	19	14

	LL (%)	LP (%)	IP
Muestra Amarilla	36	19	17

ANEXO 5

Análisis granulométricos de los suelos

En las siguientes tablas, se muestran los valores de los análisis granulométricos, tanto por el método mecánico (tamizado), como por el método de la decantación de sedimentos (hidrómetro), de todas las muestras de suelos analizadas.

Sector 2

Tamizado

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa
3/8"	9.50	0.00	0.00	100.00
4.00	4.75	0.07	0.02	99.98
8.00	2.36	0.51	0.11	99.87
10.00	2.00	0.26	0.06	99.81
30.00	0.60	3.73	0.82	98.99
40.00	0.43	1.52	0.34	98.66
50.00	0.30	3.05	0.67	97.98
100.00	0.15	47.63	10.52	87.47
200.00	0.08	79.26	17.50	69.97

Hidrómetro

Diámetro Partículas [mm]	Contenido de finos [%]
0.05016	97.32
0.03627	93.35
0.02715	82.40
0.02008	72.94
0.01692	65.52
0.01490	61.54
0.01355	57.52
0.01260	53.44
0.01145	49.42
0.01011	44.40
0.00918	40.38
0.00853	36.25
0.00711	30.24
0.00626	26.12
0.00521	21.01
0.00457	17.84
0.00379	13.77
0.00328	13.77
0.00296	11.73
0.00272	10.51
0.00131	9.55

Sector 3 TAMIZADO

HIDRÓMETRO

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diametro Partículas [mm]	Contenido de finos [%]
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	100.00	0.051442	97.51
1"	25.00	14.89	3.38	96.62	0.038065	89.36
3/4"	19.00	8.40	1.91	94.71	0.028143	80.62
1/2"	12.50	18.90	4.30	90.41	0.020933	69.70
3/8"	9.50	11.38	2.59	87.82	0.017535	63.74
4.00	4.75	29.68	6.75	81.08	0.015437	59.77
8.00	2.36	21.55	4.90	76.18	0.013918	57.78
10.00	2.00	5.45	1.24	74.94	0.012905	53.81
30.00	0.60	27.78	6.31	68.62	0.011631	51.82
					0.010248	46.90
					0.009220	45.31
					0.008507	42.33
					0.007106	35.43
					0.006188	33.49
					0.005080	31.55
					0.004442	28.57
					0.003638	27.58
					0.003167	25.64
					0.002789	22.80
					0.002654	21.90
					0.001365	17.23

Sector 4 TAMIZADO

HIDRÓMETRO

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diametro Particulas [mm]	Contenido de finos [%]
1/2"	12.50	0.00	0.00	100.00	0.052194	95.33
3/8"	9.50	2.77	0.61	99.39	0.038342	88.38
4.00	4.75	3.70	0.82	98.57	0.028363	79.44
8.00	2.36	5.54	1.23	97.34	0.021086	68.52
10.00	2.00	2.03	0.45	96.89	0.017696	62.06
30.00	0.60	18.70	4.14	92.76	0.015512	59.08
40.00	0.43	9.95	2.20	90.56	0.014095	55.11
50.00	0.30	16.61	3.67	86.88	0.012967	53.12
100.00	0.15	80.98	17.91	68.97	0.011759	49.19
200	0.08	78.30	17.32	51.65	0.010371	44.23
					0.009193	41.25
					0.008618	39.26
					0.007100	36.33
					0.006203	33.40
					0.005125	29.47
					0.004456	27.58
					0.003685	23.60
					0.003201	22.61
					0.002670	19.82
					0.002625	19.82
					0.001355	15.25

Muestra1 TAMIZADO**HIDRÓMETRO**

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diametro Particulas [mm]	Contenido de finos [%]
40	0.425			100	0.051452	93.27
50	0.3				0.037461	87.82
100	0.15				0.027430	80.88
200	0.075			87	0.020240	71.52
					0.016993	65.08
					0.015080	59.13
					0.013685	55.22
					0.012636	52.24
					0.011471	48.28
					0.010114	43.32
					0.009204	38.37
					0.008449	36.43
					0.007028	30.54
					0.005953	24.64
					0.005094	21.77
					0.004433	19.84
					0.003565	16.97
					0.003174	13.27
					0.002669	11.73
					0.002577	9.91
					0.001305	7.54

Puente Alto**TAMIZADO****HIDRÓMETRO**

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diametro Particulas [mm]	Contenido de finos [%]
8.00	2.36	0.00	0.00	100.00	0.052866	86.71
10.00	2.00	0.01	0.00	100.00	0.039722	74.43
30.00	0.60	1.36	0.30	99.69	0.030013	59.19
40.00	0.43	1.60	0.36	99.33	0.022097	48.86
50.00	0.30	2.49	0.56	98.78	0.018535	41.49
100.00	0.15	12.00	2.69	96.09	0.016386	35.59
200.00	0.08	29.98	6.72	89.37	0.014754	33.63
					0.013558	31.66
					0.012230	28.76
					0.010625	27.78
					0.009564	25.81
					0.008758	24.83
					0.007165	23.89
					0.006243	21.93
					0.005107	20.99
					0.004431	20.06
					0.003624	19.12
					0.003081	18.19
					0.002817	16.28
					0.002587	15.29
					0.001300	12.49

San Felipe**TAMIZADO****HIDRÓMETRO**

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diámetro Partículas [mm]	Contenido de finos [%]
4.00	4.75			100.00	0.050871	98.70
8.00	2.36			99.00	0.037629	90.77
10.00	2.00			99.00	0.027868	81.85
30.00	0.60			98.00	0.020558	72.93
40.00	0.43			98.00	0.017160	67.97
50.00	0.30			97.00	0.015116	64.01
100.00	0.15			97.00	0.013688	61.03
200.00	0.08			95.00	0.012597	59.05
					0.011446	55.09
					0.010053	51.17
					0.009059	49.19
					0.008300	48.20
					0.006892	43.29
					0.006046	39.37
					0.004998	35.45
					0.004372	32.48
					0.003593	30.49
					0.003128	28.56
					0.002764	24.74
					0.002622	24.83
					0.001361	17.20

Muestra

Roja

TAMIZADO

HIDRÓMETRO

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diametro Particulas [mm]	Contenido de finos [%]
3/4"	19.00	0	0.00	100.00	0.050251	92.03
1/2"	12.50	3.86	0.29	99.71	0.036972	84.12
3/8"	9.50	11.11	0.84	98.87	0.027540	72.74
4.00	4.75	11.3	0.85	98.02	0.020493	60.38
8.00	2.36	10.38	0.78	97.23	0.017093	54.84
10.00	2.00	5.15	0.39	96.84	0.015151	48.51
30.00	0.60	130.78	9.88	86.97	0.013742	44.55
40.00	0.43	67.05	5.06	81.90	0.012660	41.65
50.00	0.30	62.74	4.74	77.16	0.011425	38.75
100	0.15	119.57	9.03	68.13	0.009960	36.77
200	0.08	94.54	7.14	60.99	0.008868	34.86
					0.008219	32.96
					0.006781	29.14
					0.005902	27.24
					0.004837	25.73
					0.004202	24.42
					0.003399	23.03
					0.002917	21.53
					0.002651	21.68
					0.002446	19.95
					0.001241	17.99

Muestra**Amarilla****TAMIZADO****HIDRÓMETRO**

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Que pasa	Diametro Particulas [mm]	Contenido de finos [%]
3/4"	19.00	0	0.00	100.00	0.049920	93.85
1/2"	12.50	3.44	0.32	99.68	0.036675	86.37
3/8"	9.50	5.2	0.48	99.20	0.027323	74.98
4.00	4.75	4.1	0.38	98.82	0.020396	62.03
8.00	2.36	10.08	0.93	97.89	0.017103	55.08
10.00	2.00	4.07	0.38	97.52	0.014976	52.10
30.00	0.60	121.23	11.18	86.34	0.013588	48.13
40.00	0.43	62.64	5.78	80.56	0.012534	45.15
50.00	0.30	63.15	5.83	74.73	0.011301	43.09
100	0.15	123.06	11.35	63.38	0.009919	39.12
200	0.08	105.08	9.69	53.69	0.008931	37.13
					0.008206	35.15
					0.006677	33.09
					0.005884	31.10
					0.004855	27.73
					0.004183	26.73
					0.003460	25.14
					0.003006	24.15
					0.002668	22.31
					0.002458	22.45
					0.001253	18.85

ANEXO 6

Fotografías de taludes de donde provienen las muestras



Fotografía 1: Talud erosionado, Sector 2 (Tranapunte-Tirúa, IX Región)



Fotografía 2: Talud, Sector 3 (Tranapunte-Tirúa, IX Región)



Fotografía 3: Talud, Sector 4 (Tranapunte-Tirúa, IX Región)



Fotografía 4: Talud, Puente Alto



Fotografía 5: Talud, Muestra Amarilla, Camino La Pólvara



Fotografía 6: Talud, Muestra Roja, Camino La Pólvara

ANEXO 7

Registro de los volúmenes erosionados

En las siguientes tablas se muestran los perfiles medidos en todos los ensayos de erosión realizados:

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.9	6.9	6.3	6.25	6	t=	0
	2	6.9	6.75	6.75	6.7	6.2	t=	2
	3	6.85	6.7	6.7	6.6	6.5	t=	0
	4	6.7	6.7	6.55	6.5	6.35	t=	1
	5	6.65	6.55	6.55	6.4	6.4		
	6	6.75	6.7	6.7	6.65	6.6		
	7	6.8	6.75	6.7	6.65	6.7		
	8	6.7	6.65	6.6	6.55	6.65		
	9	6.75	6.7	6.7	6.65	6.5		
Perfil 2	1	7.2	7.1	6.55	6.4	6.4	ENSAYO N°	
	2	6.95	6.8	6.75	6.75	6.4	FECHA	
	3	6.85	6.75	6.7	6.6	6.4	HORA	
	4	6.7	6.5	6.5	6.4	6.2	DESCRIPCIÓN	
	5	6.75	6.65	6.5	6.45	6.4	Suelo	2
	6	7	6.9	6.8	6.6	6.55	Caudal	1
	7	7	6.9	6.85	6.8	6.55	Estado	Nat.
	8	6.95	6.9	6.8	6.8	6.7		
	9	7	6.85	6.7	6.5	5.55		
Perfil 3	1	7.05	6.75	6.6	6.45	6.45	OBS	
	2	7	6.8	6.75	6.6	6.5		
	3	7	6.85	6.8	6.65	6.5		
	4	7	6.7	6.65	6.6	6.45		
	5	6.9	6.75	6.65	6.6	6.5		
	6	7	6.9	6.85	6.8	6.8		
	7	7.1	7	6.9	6.85	6.8		
	8	6.95	6.8	6.7	6.65	6.65		
	9	6.4	6.25	6.3	6.25	6.35		

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.9	6.5				t=	2.5
	2	6.85	6				t=	0
	3	6.9	6.5				t=	0
	4	6.8	6.45				t=	0
	5	6.85	6.45					
	6	7.05	6.45					
	7	7	6.35					
	8	6.95	1					
	9	6.95	1					
Perfil 2	1	7.2	7				ENSAYO N°	
	2	7	6.5				FECHA	
	3	7	6.55				HORA	
	4	6.85	6.5				DESCRIPCIÓN	
	5	6.9	6.6				Suelo	2
	6	7.1	6.65				Caudal	1
	7	7.05	6.15				Estado	Rem
	8	7	1					
	9	7	1					
Perfil 3	1	7.3	6.2				OBS	
	2	7.05	5				8.05	Minutos
	3	7.05	7.15				Desprendimiento	Total
	4	6.85	6.2					
	5	7	6.4					
	6	7.1	6.6					
	7	7.1	6.5					
	8	7	1					
	9	6.95	1					

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.7	8.1	8.05	7.5	7.7	t=	3.25
	2	7.4	7.75	7.75	7.2	7.4	t=	0
	3	7.3	7.7	7.65	7.1	7.3	t=	0
	4	7.05	7.4	7.4	6.9	7.05	t=	2.5
	5	7.05	7.45	7.4	6.9	6.95		
	6	7.1	7.4	7.4	6.8	6.9		
	7	6.95	7.3	7.25	6.7	6.9		
	8	6.75	7.1	7.1	6.5	6.7		
	9	6.5	6.9	6.9	6.4	6.5		
Perfil 2	1	7.75	8	8	7.45	7.25	ENSAYO Nº	
	2	7.4	7.65	7.6	7.1	7.25	FECHA	
	3	7.4	7.65	7.6	7.1	7.05	HORA	
	4	7.15	7.4	7.35	6.85	7	DESCRIPCIÓN	
	5	7.2	7.4	7.4	6.9	7.05	Suelo	2
	6	7.2	7.4	7.35	6.8	7	Caudal	2
	7	7	7.25	7.2	6.65	6.85	Estado	Nat
	8	6.85	7.05	7	6.5	6.65		
	9	6.75	6.95	6.85	6.3	6.35		
Perfil 3	1	7.8	7	7	6.4	6.45	OBS	
	2	7.5	7.3	7.2	6.5	6.5		
	3	7.5	7.6	7.4	6.7	6.65		
	4	7.3	7.45	7.4	6.8	6.75		
	5	7.1	7.25	7.25	6.6	6.75		
	6	7.35	7.5	7.5	6.9	7.05		
	7	7.2	7.35	7.35	6.8	6.95		
	8	6.9	7.05	7.05	6.5	6.65		
	9	6.7	6.85	6.85	6.2	6.3		

		t=0	t=1	t=2:50	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.1	4.45	1			t=	5
	2	6.85	4.45	1			t=	12
	3	6.85	4.65	1			t=	0
	4	6.65	4.7	1			t=	0
	5	6.65	4.5	1				
	6	6.8	5.5	1				
	7	6.8	6.3	1				
	8	6.65	6.3	1				
	9	6.65	5	1				
Perfil 2	1	7.1	5.4	5.15			ENSAYO N°	
	2	6.85	5.7	5.35			FECHA	
	3	6.85	6.1	5.6			HORA	
	4	6.65	6.55	5.45			DESCRIPCIÓN	
	5	6.7	6.65	1			Suelo	2
	6	6.85	6.65	1			Caudal	2
	7	6.85	6.7	1			Estado	Rem
	8	6.7	6.5	1				
	9	6.7	6.15	1				
Perfil 3	1	7.1	4.85	5.15			OBS	
	2	6.85	4.9	5.35			2.5	Min
	3	6.8	5.25	5.5			Pérdida	Total
	4	6.6	5.4	5.3				
	5	6.65	6.2	1				
	6	6.85	5	1				
	7	6.8	4.65	1				
	8	6.7	5.1	1				
	9	6.7	5.35	1				

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.3	7.6	7.9	7.8	7.6	t=	3
	2	7.2	7.55	7.85	7.8	7.9	t=	2.5
	3	7.1	7.5	7.8	7.7	7.8	t=	0
	4	6.9	7.2	7.5	7.45	7.5	t=	1
	5	6.8	7.15	7.45	7.45	7.5		
	6	6.75	7.1	7.4	7.4	7.5		
	7	6.8	7.15	7.45	7.4	7.5		
	8	6.6	7	7.3	7.2	7.3		
	9	6.4	6.75	7.05	6.9	6.7		
Perfil 2	1	7.6	7.9	7.9	7.9	8	ENSAYO N°	
	2	7.4	7.7	7.8	7.8	7.9	FECHA	
	3	7.3	7.65	7.8	7.8	7.85	HORA	
	4	7.1	7.5	7.6	7.6	7.7	DESCRIPCIÓN	
	5	7.2	7.6	7.7	7.6	7.6	Suelo	3
	6	7.2	7.6	7.55	7.55	7.75	Caudal	1
	7	7	7.4	7.5	7.5	7.6	Estado	Nat
	8	6.8	7.1	7.3	7.3	7.4		
	9	6.6	7	7.1	7.1	7.2		
Perfil 3	1	7.55	7.85	7.9	7.85	7.95	OBS	
	2	7.4	7.7	7.8	7.8	7.9	Min	
	3	7.35	7.6	7.7	7.7	7.8		
	4	7.1	7.4	7.45	7.45	7.55		
	5	7.2	7.5	7.6	7.6	7.65		
	6	7.2	7.6	7.7	7.4	7.5		
	7	7	7.35	7.4	7.2	7.3		
	8	6.8	7.15	7.25	7.2	7.3		
	9	6.6	7	7	7	7.1		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.2	7.2	7.1	6.9	6.1	t=	0
	2	6.95	6.95	6.9	6.5	5.5	t=	0
	3	6.95	6.9	6.9	5.8	4.9	t=	4
	4	6.8	6.75	6.75	5.95	2.5	t=	3.5
	5	6.8	6.75	6.75	6.1	2.1		
	6	6.95	6.9	6.9	6.3	1		
	7	6.9	6.9	6.75	6.2	1		
	8	6.75	6.75	6.5	6	1		
	9	6.7	6.7	6.65	5.7	1		
Perfil 2	1	7.25	7.25	7.25	7.4	7.8	ENSAYO N°	
	2	6.95	6.95	6.95	7.2	7.3	FECHA	
	3	6.9	6.9	6.9	7.2	7.5	HORA	
	4	6.7	6.7	6.7	7.15	7.4	DESCRIPCIÓN	
	5	6.75	6.7	6.7	7.05	6.9	Suelo	3
	6	6.9	6.9	6.9	7.25	6.25	Caudal	1
	7	6.85	6.8	6.8	6.95	6.25	Estado	Rem
	8	6.7	6.65	6.6	6.5	3.6		
	9	6.65	6.5	6.5	6.2	3.6		
Perfil 3	1	7.25	7.2	7.2	6.5	5.5	OBS	
	2	7	6.9	6.9	6.75	4.8	Min	
	3	6.95	6.9	6.9	6.75	5.2		
	4	6.7	6.7	6.7	6.4	5.7		
	5	6.7	6.7	6.7	6.7	6		
	6	6.9	6.85	6.85	6.6	5.95		
	7	6.85	6.8	6.8	6.2	5.15		
	8	6.7	6.65	6.3	5.45	4.4		
	9	6.65	6.55	6.2	5.25	3.15		

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.7	7.85	7.75	7.6	7.55	t=	2
	2	7.8	8.05	8	7.85	8	t=	0
	3	7.95	8.1	8.1	8.05	8.1	t=	0
	4	7.7	7.9	7.9	7.85	7.75	t=	1
	5	7.6	7.8	7.8	7.75	7.85		
	6	7.65	7.85	7.85	7.75	7.85		
	7	7.25	7.45	7.45	7.35	7.35		
	8	6.9	7.1	7.05	7	6.9		
	9	6.55	6.7	6.4	6.15	4		
Perfil 2	1	8.6	8.75	8.75	8.7	8.8	ENSAYO Nº	
	2	8.3	8.45	8.45	8.4	8.5	FECHA	
	3	8.2	8.4	8.4	8.35	8.45	HORA	
	4	8	8.2	8.2	8.15	8.2	DESCRIPCIÓN	
	5	7.9	8.05	8.1	8.05	8.05	Suelo	3
	6	7.45	7.6	7.6	7.6	7.6	Caudal	2
	7	7.6	7.75	7.75	7.7	7.75	Estado	Nat
	8	7.2	7.4	7.45	7.4	7.4		
	9	6.9	7	7	6.85	6.8		
Perfil 3	1	7.7	7.8	7.75	7.6	7.6	OBS	
	2	7.7	7.6	7.5	7.45	7.55	Min	
	3	6.95	6.75	6.75	6.6	6.65		
	4	7.45	7.6	7.6	7.6	7.6		
	5	7.8	7.85	7.85	7.85	7.85		
	6	7.8	8	8	8	8		
	7	7.55	7.75	7.85	7.7	7.75		
	8	7.25	7.4	7.35	7.3	7.4		
	9	6	6.2	6.1	5.95	6		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7	7	6.7	1		t=	1
	2	6.75	6.75	7.3	1		t=	4.75
	3	6.7	6.7	7.4	1		t=	0
	4	6.55	6.55	7.25	4.1		t=	13
	5	6.6	6.6	7.3	3.8			
	6	6.8	6.85	7.5	4.25			
	7	6.8	6.9	7.3	1			
	8	6.7	6.75	6.95	1			
	9	6.7	6.55	5.75	1			
Perfil 2	1	6	7	7	7.2		ENSAYO N°	
	2	6.75	6.8	7.25	7.35		FECHA	
	3	6.75	6.8	7.25	7.6		HORA	
	4	6.6	6.65	7.1	7.5		DESCRIPCIÓN	
	5	6.65	6.7	7.15	7.6		Suelo	3
	6	6.9	6.95	7.35	7.55		Caudal	2
	7	6.9	6.95	7.35	6.2		Estado	Rem
	8	6.75	6.85	7.25	5.75			
	9	6.8	6.85	6.9	5.35			
Perfil 3	1	7.05	7	4.05	1		OBS	
	2	6.8	6.8	5.3	1		20	Min
	3	6.8	6.85	6.35	1		Desplaza	Muestra
	4	6.7	6.7	6.9	1			
	5	6.75	6.75	6.7	1			
	6	6.95	7	6.65	1			
	7	7	7	5.7	1			
	8	6.9	6.85	5.1	1			
	9	6.8	6.65	5.05	1			

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7	6.85	6.85	6.7	6.85	t=	0.5
	2	6.85	6.7	6.7	6.7	6.9	t=	0.25
	3	6.95	6.8	6.8	6.75	6.95	t=	0
	4	6.8	6.7	6.7	6.7	6.9	t=	2
	5	6.9	6.8	6.75	6.7	6.95		
	6	7.1	7	6.95	6.95	7.15		
	7	7.05	7	6.85	6.8	7		
	8	6.9	6.8	6.75	6.7	6.95		
	9	6.75	6.6	6.25	6.2	6.4		
Perfil 2	1	7.2	6.95	6.7	6.3	6.35	ENSAYO Nº	
	2	7.15	6.95	6.85	6.7	6.8	FECHA	
	3	7.25	7.05	7	6.9	6.7	HORA	
	4	7.15	7	6.95	6.95	7	DESCRIPCIÓN	
	5	7.15	7	6.9	6.85	7	Suelo	4
	6	7.3	7.15	7.1	7.05	7.2	Caudal	1
	7	7.2	7.1	7	6.9	7.05	Estado	Nat
	8	7.05	7	6.9	6.85	7.05		
	9	7.05	7	6.85	6.8	6.95		
Perfil 3	1	7.2	6.95	6.9	6.7	6.9	OBS	
	2	7.1	6.85	6.8	6.7	6.9	Min	
	3	7.2	7	6.95	6.95	7		
	4	7.1	6.9	6.85	6.75	6.9		
	5	7.15	7	7	6.9	7		
	6	7.3	7.15	7.05	7	7.05		
	7	7.1	7	6.85	6.8	6.95		
	8	7.25	7.05	6.9	6.9	7		
	9	6.85	6.75	6.3	6.1	5.5		

		t=0	t=5	t=10	t=14	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.25	6.4	6.4	6.6		t=	1
	2	7.05	6.65	6.65	6.75		t=	0
	3	7	6.9	6.9	6.5		t=	1.5
	4	6.85	6.5	6.5	4.6		t=	0
	5	6.85	6.85	6.85	1			
	6	7	7	7	1			
	7	7	7	7	1			
	8	6.9	6.9	6.9	1			
	9	6.85	2	2	1			
Perfil 2	1	7.4	6.3	6.1	6		ENSAYO N°	
	2	7.1	6.7	6.7	6.9		FECHA	
	3	7	6.9	6.7	6.85		HORA	
	4	6.85	6.8	6.7	6.8		DESCRIPCIÓN	
	5	6.9	6.9	6.85	6.8		Suelo	4
	6	7	6.9	6.85	6.9		Caudal	1
	7	7	6.9	6.65	6.6		Estado	Rem
	8	6.9	6.9	1	1			
	9	6.9	0	1	1			
Perfil 3	1	7.5	6.3	6	5.6		OBS	
	2	7.1	4.75	4.6	1		13.45	Min
	3	7	5.1	3.6	1		Desplaza	Muestra
	4	6.85	6.8	6.6	6.6			
	5	6.9	6.8	6.7	6.6			
	6	7.05	6.6	1	1			
	7	6.9	1	1	1			
	8	6.8	1	1	1			
	9	6.75	1	1	1			

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.1	6.95	6.8	6.65	6.55	t=	0
	2	7.05	7	7	6.9	6.9	t=	0
	3	7.2	7.2	7.2	7.15	7.15	t=	0
	4	7.05	7.05	7.05	7	7	t=	0
	5	7	7	7	7	7		
	6	7.25	7.25	7.25	7.2	7.1		
	7	7.2	7.15	7.15	7.1	6.85		
	8	7	7	7	6.85	6.45		
	9	6.8	6	5.9	5.9	5.7		
Perfil 2	1	7.7	7.65	7.6	7.5	7.45	ENSAYO N°	
	2	7.45	7.4	7.4	7.4	7.35	FECHA	
	3	7.45	7.45	7.45	7.45	7.4	HORA	
	4	7.35	7.3	7.3	7.3	7.3	DESCRIPCIÓN	
	5	7.35	7.3	7.3	7.3	7.3	Suelo	4
	6	7.45	7.45	7.4	7.4	7.3	Caudal	2
	7	7.4	7.35	7.3	7.3	7.3	Estado	Nat
	8	7.2	7.1	7.1	7.1	7.05		
	9	7.15	7.1	7	7	6.9		
Perfil 3	1	7.7	7.7	7.7	7.6	7.5	OBS	
	2	7.55	7.55	7.55	7.5	7.45		Min
	3	7.6	7.6	7.6	7.5	7.5		
	4	7.5	7.5	7.45	7.45	7.45		
	5	7.45	7.45	7.45	7.45	7.4		
	6	7.55	7.55	7.55	7.5	7.45		
	7	7.5	7.5	7.45	7.45	7.4		
	8	7.3	7.3	7.3	7.3	7.05		
	9	6.95	6.85	6.7	6.4	5.9		

		t =0	t=5	t=8	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.8	6.95	5.8			t=	1
	2	6.7	6.9	5.7			t=	0
	3	6.7	6.9	5.9			t=	0
	4	6.6	6.75	5.2			t=	0
	5	6.7	6.8	1				
	6	6.95	6.95	1				
	7	6.9	6.95	1				
	8	6.85	5.7	1				
	9	6.7	1	1				
Perfil 2	1	6.85	6.35	1			ENSAYO N°	
	2	6.6	6.9	1			FECHA	
	3	6.65	6.9	1			HORA	
	4	6.65	6.8	1			DESCRIPCIÓN	
	5	6.65	6.5	1			Suelo	4
	6	6.9	6.5	1			Caudal	2
	7	6.9	6.75	1			Estado	Rem
	8	6.85	6.05	1				
	9	6.85	1	1				
Perfil 3	1	6.4	6.2	1			OBS	
	2	6.6	5.6	1			8	Min
	3	6.65	6.7	1			Erosión	Masiva
	4	6.6	6.6	1				
	5	6.6	6.65	1				
	6	6.9	6.9	1				
	7	6.9	6.4	1				
	8	6.8	6	1				
	9	6.85	1	1				

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.7	6.5	6.25	6.2	6.1	t=	0
	2	6.5	6.45	6.35	6.35	6.35	t=	0
	3	6.45	6.45	6.4	6.4	6.3	t=	1
	4	6.4	6.35	6.25	6.15	6.1	t=	1
	5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5		
	6	6.75	6.75	6.7	6.7	6.7		
	7	6.8	6.75	6.7	6.7	6.8		
	8	6.6	6.6	6.5	6.5	6.5		
	9	6.65	6.5	6.2	6.1	6.1		
Perfil 2	1	7.1	7	6.8	6.7	6.7	ENSAYO Nº	
	2	6.85	6.8	6.85	6.65	6.65	FECHA	
	3	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	HORA	
	4	6.85	6.8	6.8	6.8	6.9	DESCRIPCIÓN	
	5	6.9	6.9	6.85	6.85	6.85	Suelo	L1
	6	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1	Caudal	1
	7	7.2	7.2	7.15	7.15	7.2	Estado	Nat
	8	7	7	7	6.95	6.9		
	9	7.05	7.05	7.05	7	7.05		
Perfil 3	1	7.5	7.45	7.4	7.35	7.25	OBS	
	2	7.3	7.25	7.25	7.2	7.2	Min	
	3	7.3	7.2	7.15	7	7		
	4	7.2	7.15	7.1	7	7.05		
	5	7.25	7.2	7.2	7.2	7.2		
	6	7.45	7.3	7.1	7.05	7		
	7	7.2	7.1	7	7	7		
	8	6.9	6.9	6.9	6.95	7		
	9	6.85	6.8	6.7	6.7	6.7		

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.5	4				t=	5
	2	7.15	4.2				t=	0
	3	7.1	6.9				t=	0
	4	6.9	6.4				t=	0
	5	6.9	6.4					
	6	7.1	6.3					
	7	7	1					
	8	6.85	1					
	9	6.7	1					
Perfil 2	1	7.6	7.5				ENSAYO N°	
	2	6.3	6.8				FECHA	
	3	6.2	6.8				HORA	
	4	6	6.5				DESCRIPCIÓN	
	5	6	6.4				Suelo	L1
	6	6.15	6.3				Caudal	1
	7	6.1	5.5				Estado	Rem
	8	5.9	4					
	9	5.85	1					
Perfil 3	1	7.6	4.8				OBS	
	2	7.3	4				8.55	Min
	3	7.2	6.2				Erosión	Masiva
	4	7	6					
	5	7	5.9					
	6	7.15	5					
	7	7.1	4.75					
	8	6.9	1					
	9	6.85	1					

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.3	7.3	7.4	7.4	7.55	t=	0
	2	7.15	7	7.05	7	7.1	t=	1
	3	7.1	7.05	7.15	7.1	7.1	t=	0
	4	7.05	7.05	7.15	7.15	7.25	t=	1
	5	7.15	7.15	7.2	7.15	7.25		
	6	7.3	7.3	7.4	7.35	7.3		
	7	7.25	7.2	7.25	7.1	7.15		
	8	7.15	7.1	7.15	6.9	6.85		
	9	6.8	6.65	6.5	6.25	6.2		
Perfil 2	1	7.1	7	6.95	6.9	6.85	ENSAYO N°	
	2	6.9	6.8	6.7	6.6	6.35	FECHA	
	3	6.9	6.85	6.8	6.7	6.7	HORA	
	4	6.7	6.7	6.8	6.8	6.8	DESCRIPCIÓN	
	5	6.75	6.75	6.85	6.85	6.9	Suelo	L1
	6	6.95	6.9	7	6.9	6.1	Caudal	2
	7	6.95	6.9	7	6.9	6.95	Estado	Nat
	8	6.8	6.75	6.85	6.8	6.85		
	9	6.8	6.8	6.9	6.75	6.85		
Perfil 3	1	6.9	6.65	6.35	6.25	6.25	OBS	
	2	6.75	6.7	6.7	6.7	6.7	Min	
	3	6.8	6.8	6.9	6.85	6.9		
	4	6.55	6.5	6.55	6.55	6.6		
	5	6.5	6.45	6.5	6.5	6.5		
	6	6.7	6.6	6.45	6.4	6.4		
	7	6.7	6.5	6.45	6.4	6.4		
	8	6.6	6.25	6.2	6.05	6		
	9	6.5	5.6	5.6	5.55	5.2		

		t =0	t=1	t=3	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.35	4.1	1			t=	1
	2	7.1	6.7	1			t=	5
	3	7.1	7.2	1			t=	12
	4	6.95	7	1			t=	0
	5	7	7.1	4.25				
	6	7.15	7	5.4				
	7	7.15	6.6	5.5				
	8	7	6.25	5.45				
	9	6.95	5.6	5				
Perfil 2	1	7.2	7	5.5			ENSAYO N°	
	2	6.95	7	5.7			FECHA	
	3	6.95	7	7			HORA	
	4	6.75	6.8	7.05			DESCRIPCIÓN	
	5	6.8	6.8	7.25			Suelo	L1
	6	6.95	7.1	7.4			Caudal	2
	7	6.95	7.1	7.75			Estado	Rem
	8	6.8	6.95	5.9				
	9	6.7	6	6.4				
Perfil 3	1	7.05	6.5	4.45			OBS	
	2	6.8	5.95	4			4.55	Min
	3	6.85	6.75	2.6			Desplaza	Muestra
	4	6.7	6.7	0.5				
	5	6.75	6.75	1				
	6	6.9	6.15	1				
	7	6.85	6.8	1				
	8	6.7	4.9	1				
	9	6.35	6.15	1				

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7	6	5.9	5.7	5.4	t=	0.5
	2	7	5.7	4.95	4.9	4.75	t=	0.5
	3	7	6.15	6	5.8	5.7	t=	0
	4	7	6.95	6.95	6.95	6.8	t=	0
	5	7.2	7.25	7.2	7.1	7		
	6	7.5	7.5	7.25	7.25	7.05		
	7	7.6	7.5	7.3	7.3	7.15		
	8	7.7	7.45	7.1	7	6.8		
	9	7.4	6	5.8	5.6	5.5		
Perfil 2	1	7.4	7.3	7.2	7.2	7.15	ENSAYO N°	
	2	7.1	7.1	7.1	7.05	7.05	FECHA	
	3	7.1	7.05	7	7	7	HORA	
	4	6.95	7	6.85	6.8	6.8	DESCRIPCIÓN	
	5	7	7.05	7	6.85	6.8	Suelo	APA
	6	7.3	7.25	7.2	7.15	7	Caudal	1
	7	7.3	7.3	7.15	6.85	6.8	Estado	NAT
	8	7.2	6.9	6.8	6.65	6.5		
	9	7	6.85	6.3	5.75	5.5		
Perfil 3	1	7.1	7.15	6.95	6.8	6.5	OBS	
	2	6.8	6.8	6.7	6.45	6.3	Min	
	3	6.9	6.95	6.9	6.9	6.85		
	4	6.4	6.45	6.5	5.75	5.7		
	5	6.75	6.6	5.85	5.5	5.35		
	6	6.85	6.8	6.65	6.35	6.3		
	7	7.1	6.6	6.6	6.6	6.4		
	8	7	6.9	6.3	1	1		
	9	6.9	6.5	2.8	1	1		

		t =0	t=5	t=10	t=15	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.8	6.95	6.85	5.8		t=	2
	2	6.7	6.9	6.9	5.7		t=	0
	3	6.7	6.9	6.9	5.9		t=	0
	4	6.6	6.75	6.65	5.2		t=	0
	5	6.7	6.8	6.8	1			
	6	6.95	6.95	6.9	1			
	7	6.9	6.95	1	1			
	8	6.85	5.7	1	1			
	9	6.7	1	1	1			
Perfil 2	1	6.85	6.35	6.35	1		ENSAYO N°	
	2	6.6	6.9	6.8	1		FECHA	
	3	6.65	6.9	6.85	1		HORA	
	4	6.65	6.8	6.8	1		DESCRIPCIÓN	
	5	6.65	6.5	6.5	1		Suelo	APA
	6	6.9	6.5	1	1		Caudal	1
	7	6.9	6.75	1	1		Estado	REM
	8	6.85	6.05	1	1			
	9	6.85	1	1	1			
Perfil 3	1	6.4	6.2	5.95	1		OBS	
	2	6.6	5.6	4.8	1		14.55	Min
	3	6.65	6.7	4.1	1		Erosión	Masiva
	4	6.6	6.6	3.3	1			
	5	6.6	6.65	2.3	1			
	6	6.9	6.9	1	1			
	7	6.9	6.4	1	1			
	8	6.8	6	1	1			
	9	6.85	1	1	1			

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	1.25
	2	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	0
	3	7.1	6.75	6.75	6.7	6.7	t=	0
	4	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	t=	1
	5	6.85	6.95	6.95	6.95	6.85		
	6	7	7.1	6.85	6.8	6.55		
	7	7.05	7.15	7.15	7.15	7.05		
	8	6.8	6.95	6.95	6.9	6.3		
	9	6.55	6.55	6.55	6.55	6.45		
Perfil 2	1	7.65	5.8	5.6	5.5	5	ENSAYO N°	
	2	7.35	5.25	5.1	5.1	4.8	FECHA	
	3	7.1	5.4	5.05	4.95	4.75	HORA	
	4	6.75	5.5	5.3	5.2	5.15	DESCRIPCIÓN	
	5	6.85	6.4	5.45	5.3	4.7	Suelo	APA
	6	7	6.6	5.45	5.3	5.1	Caudal	2
	7	7.1	6.8	6.55	5.3	4.3	Estado	NAT
	8	6.95	6.65	6.6	5.15	5.1		
	9	6.8	6.05	6	5.9	5.7		
Perfil 3	1	6.15	5.8	6.6	5.9	4.2	OBS	
	2	7.1	6.8	6.45	6.45	6	Min	
	3	6.9	6.8	6.55	6.55	6		
	4	6.4	6.5	6.5	6.45	6		
	5	6.45	6.5	6.45	6.45	6		
	6	6.7	6.8	6.75	6.7	6.2		
	7	6.6	6.65	6.6	6.3	6.1		
	8	6.55	6.65	6.65	6.65	6.65		
	9	6.2	2.4	1.2	1	1		

		t=0	t=1	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.25	7.1				t=	5
	2	7.1	6.05				t=	0
	3	7.05	6.4				t=	0
	4	7.05	4.55				t=	0
	5	7.05	1.9					
	6	7.2	1					
	7	7.2	1					
	8	7	1					
	9	6.75	1					
Perfil 2	1	7.5	7.35				ENSAYO N°	
	2	7.25	6.5				FECHA	
	3	7.2	5.8				HORA	
	4	7	5.55				DESCRIPCIÓN	
	5	7	5.7				Suelo	APA
	6	7.2	5.3				Caudal	2
	7	7.15	4.45				Estado	REM
	8	7	4.15					
	9	6.9	4					
Perfil 3	1	7.5	5.5				OBS	
	2	7.2	5				1.55	Min
	3	7.2	5.1				Erosión	Masiva
	4	7	2.9					
	5	7	1					
	6	4.15	1					
	7	7.1	1					
	8	6.95	1					
	9	6.4	1					

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.4	7.8	7.6	7.6	7.6	t=	3
	2	7.25	7.55	7.55	7.55	7.5	t=	0
	3	7.2	7.55	7.55	7.55	7.45	t=	0
	4	7.05	7.4	7.4	7.35	7.2	t=	0
	5	7.1	7.4	7.4	7.4	7.25		
	6	7.3	7.6	7.6	7.6	7.45		
	7	7.2	7.5	7.5	7.5	7.35		
	8	7	7.3	7.3	7.2	7.2		
	9	6.8	7.1	7	7	6.8		
Perfil 2	1	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	ENSAYO N°	
	2	7.2	7.45	7.45	7.45	7.4	FECHA	
	3	7.2	7.5	7.45	7.45	7.4	HORA	
	4	7.1	7.4	7.35	7.3	7.25	DESCRIPCIÓN	
	5	7.15	7.4	7.4	7.35	7.3	Suelo	ASF
	6	7.3	7.55	7.5	7.5	7.45	Caudal	1
	7	7.2	7.4	7.4	7.4	7.3	Estado	NAT
	8	7	7.2	7.2	7.2	7.1		
	9	6.9	7.05	7.05	7	6.95		
Perfil 3	1	7.25	7.35	7.35	7.35	7.35	OBS	
	2	7.2	7.35	7.35	7.35	7.35	Min	
	3	7.3	7.5	7.4	7.4	7.4		
	4	7.15	7.25	7.2	7.2	7.2		
	5	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3		
	6	7.3	7.4	7.3	7.3	7.3		
	7	7.05	7.2	7.1	7.05	7		
	8	6.85	6.95	6.95	6.9	6.9		
	9	6.7	6.8	6.75	6.7	6.7		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	1
	2	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	0
	3	7.1	6.75	6.75	6.7	6.7	t=	0
	4	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	t=	1
	5	6.85	6.95	6.95	6.95	6.85		
	6	7	7.1	6.85	6.8	6.55		
	7	7.05	7.15	7.15	7.15	7.05		
	8	6.8	6.95	6.95	6.9	6.3		
	9	6.55	6.55	6.55	6.55	6.45		
Perfil 2	1	7.65	5.8	5.6	5.5	5	ENSAYO N°	
	2	7.35	5.25	5.1	5.1	4.8	FECHA	
	3	7.1	5.4	5.05	4.95	4.75	HORA	
	4	6.75	5.5	5.3	5.2	5.15	DESCRIPCIÓN	
	5	6.85	6.4	5.45	5.3	4.7	Suelo	ASF
	6	7	6.6	5.45	5.3	5.1	Caudal	1
	7	7.1	6.8	6.55	5.3	4.3	Estado	REM
	8	6.95	6.65	6.6	5.15	5.1		
	9	6.8	6.05	6	5.9	5.7		
Perfil 3	1	6.15	5.8	6.6	5.9	4.2	OBS	
	2	7.1	6.8	6.45	6.45	6	Min	
	3	6.9	6.8	6.55	6.55	6		
	4	6.4	6.5	6.5	6.45	6		
	5	6.45	6.5	6.45	6.45	6		
	6	6.7	6.8	6.75	6.7	6.2		
	7	6.6	6.65	6.6	6.3	6.1		
	8	6.55	6.65	6.65	6.65	6.65		
	9	6.2	2.4	1.2	1	1		

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.7	6.5	6.25	6.2	6.05	t=	0.75
	2	6.5	6.45	6.35	6.35	6.35	t=	0
	3	6.45	6.45	6.4	6.4	6.3	t=	0
	4	6.4	6.35	6.25	6.15	6.1	t=	1
	5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5		
	6	6.75	6.75	6.7	6.7	6.7		
	7	6.8	6.75	6.7	6.7	6.8		
	8	6.6	6.6	6.5	6.5	6.5		
	9	6.65	6.5	6.2	6.1	6		
Perfil 2	1	7.1	7	6.8	6.7	6.7	ENSAYO N°	
	2	6.85	6.8	6.8	6.65	6.65	FECHA	
	3	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	HORA	
	4	6.85	6.8	6.8	6.8	6.9	DESCRIPCIÓN	
	5	6.9	6.9	6.85	6.85	6.8	Suelo	ASF
	6	7.2	7.2	7.1	7.1	7	Caudal	2
	7	7.2	7.2	7.15	7.15	7	Estado	NAT
	8	7	7	7	6.95	6.9		
	9	7.05	7.05	7.05	7	7.05		
Perfil 3	1	7.5	7.45	7.4	7.35	7.15	OBS	
	2	7.3	7.25	7.25	7.2	7	Min	
	3	7.3	7.2	7.15	7	7.15		
	4	7.2	7.15	7.1	7	7.05		
	5	7.25	7.2	7.2	7.2	7.25		
	6	7.45	7.3	7.1	7.05	7		
	7	7.2	7.1	7	7	7		
	8	6.9	6.9	6.9	6.9	7		
	9	6.85	6.8	6.7	6.7	6.7		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.45	6.35	5.55	4.1	3.5	t=	1
	2	7.1	6.75	5	3.8	3.2	t=	0
	3	7.05	7.05	5.2	3.6	3	t=	0
	4	6.85	6.95	4.8	3.85	3.4	t=	0
	5	6.8	6.9	4.5	3.8	3.6		
	6	6.9	7	5.95	4.65	4.1		
	7	6.8	6.9	6.9	4.9	4.5		
	8	6.6	6.7	6.7	4.7	4.5		
	9	6.5	6.6	6.6	4.95	4.95		
Perfil 2	1	7.5	7.4	6.5	5.65	5.6	ENSAYO Nº	
	2	7.2	7.3	6.5	5.9	5.5	FECHA	
	3	7.15	7.25	6.85	6.2	5.65	HORA	
	4	6.9	7	6.8	6.5	5.65	DESCRIPCIÓN	
	5	6.9	7	7	6.3	5.7	Suelo	ASF
	6	7	7.05	7	6.5	6.2	Caudal	2
	7	6.95	7.05	6.95	6.7	6.45	Estado	REM
	8	6.75	6.85	6.75	6.7	6.5		
	9	6.7	6.8	6.8	7	6.8		
Perfil 3	1	7.45	5.7	5.5	5.1	4.8	OBS	
	2	7.15	5.75	5.4	4.85	4.6	Min	
	3	7.1	6.55	5.7	5.2	5.05		
	4	6.85	6.7	6.1	5.55	5		
	5	6.85	6.95	6.55	6.3	5.2		
	6	7	7.1	6.85	6.5	5.6		
	7	6.9	7	7.1	6.65	6		
	8	6.7	6.8	6.95	6.6	6.4		
	9	6.65	6.75	6.7	6.5	6.15		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	1
	2	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	0
	3	7.1	6.75	6.75	6.7	6.7	t=	0
	4	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	t=	0
	5	6.85	6.95	6.95	6.95	6.85		
	6	7	7.1	6.85	6.8	6.55		
	7	7.05	7.15	7.15	7.15	7.05		
	8	6.8	6.9	6.9	6.9	6.3		
	9	6.55	6.55	6.55	6.55	6.45		
Perfil 2	1	7.65	5.8	5.6	5.5	5.2	ENSAYO Nº	
	2	7.35	5.25	5.1	5.1	4.8	FECHA	
	3	7.1	5.4	5.05	4.95	4.75	HORA	
	4	6.75	5.5	5.3	5.2	5.15	DESCRIPCIÓN	
	5	6.85	6.4	5.45	5.3	4.9	Suelo	AR
	6	7	6.6	5.45	5.3	5.15	Caudal	1
	7	7.1	6.8	6.55	5.3	4.3	Estado	NAT
	8	6.95	6.65	6.6	5.15	5.1		
	9	6.8	6.05	6	5.9	5.7		
Perfil 3	1	6.15	5.8	5.6	5.6	4.2	OBS	
	2	7.1	6.8	6.45	6.45	6	2.25	Min
	3	6.9	6.8	6.55	6.55	6	Grieta	Central
	4	6.4	6.5	6.5	6.45	6		
	5	6.45	6.5	6.45	6.45	6.15		
	6	6.7	6.8	6.75	6.7	6.2		
	7	6.6	6.65	6.6	6.3	6.1		
	8	6.55	6.65	6.65	6.65	6.65		
	9	6.2	2.4	1.2	1	1		

		t =0	t=3	t=5	t=10	t=30	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.15	6.5	6.4	6.35	6.35	t=	3
	2	6.9	6.85	6.75	6.7	4.9	t=	0
	3	6.9	6.9	6.9	6.9	6.75	t=	0
	4	6.7	6.9	6.9	6.8	6.85	t=	0
	5	6.75	6.9	6.9	6.9	6.85		
	6	6.9	7.1	6.95	6.85	6.8		
	7	6.8	7	7.05	7.05	6.8		
	8	6.75	6.95	6.8	6.8	6.75		
	9	6.25	2.9	1	1	1		
Perfil 2	1	7.15	7.2	7.2	7.2	7.2	ENSAYO N°	
	2	6.85	7	6.9	6.9	6.8	FECHA	
	3	6.9	7.05	7	6.95	6.9	HORA	
	4	6.7	6.85	6.7	6.7	6.7	DESCRIPCIÓN	
	5	6.75	6.9	6.9	6.9	6.7	Suelo	AR
	6	6.9	5.2	4	1	1	Caudal	1
	7	6.9	5.25	4.3	1	1	Estado	REM
	8	6.8	5.05	4.3	1	1		
	9	6.8	5.2	4.95	1	1		
Perfil 3	1	6.7	6	6.05	6	1	OBS	
	2	6.95	4.2	4.8	4.9	1	Min	
	3	6.95	4.45	3.95	4.35	1		
	4	6.75	4.6	2.4	1	1		
	5	6.8	4.8	2.4	1	1		
	6	6.95	4.2	2.55	1	1		
	7	6.95	3.35	1.65	1	1		
	8	6.9	3	1	1	1		
	9	6.5	3.5	1	1	1		

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	2
	2	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	t=	1
	3	7.1	6.75	6.75	6.7	6.7	t=	0
	4	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	t=	0.5
	5	6.85	6.95	6.95	6.95	6.85		
	6	7	7.1	6.85	6.8	6.55		
	7	7.05	7.15	7.15	7.15	7.05		
	8	6.8	6.95	6.95	6.9	6.3		
	9	6.55	6.55	6.55	6.55	6.45		
Perfil 2	1	7.65	5.8	5.6	5.5	5	ENSAYO Nº	
	2	7.35	5.25	5.1	5.1	4.8	FECHA	
	3	7.1	5.4	5.05	4.95	4.7	HORA	
	4	6.75	5.5	5.3	5.2	5.15	DESCRIPCIÓN	
	5	6.85	6.4	5.45	5.3	4.65	Suelo	AR
	6	7	6.6	5.45	5.3	5.05	Caudal	2
	7	7.1	6.8	6.55	5.3	4.35	Estado	NAT
	8	6.95	6.65	6.6	5.15	5.1		
	9	6.8	6.05	6	5.9	5.7		
Perfil 3	1	6.15	5.8	5.8	5.8	4.2	OBS	
	2	7.1	6.8	6.45	6.45	6	Min	
	3	6.9	6.8	6.55	6.55	6		
	4	6.4	6.5	6.5	6.45	6		
	5	6.45	6.5	6.45	6.45	6		
	6	6.7	6.8	6.75	6.7	6.2		
	7	6.6	6.65	6.6	6.3	6.1		
	8	6.55	6.65	6.65	6.65	6.65		
	9	6.2	2.4	1.2	1	1		

		t =0	t=1	t=3	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.65	6	1			t=	4.5
	2	7.25	3.25	1			t=	19
	3	7.25	4.05	1			t=	0
	4	7	4.6	1			t=	0
	5	7	4.8	1				
	6	7.05	5.3	1				
	7	7.85	4.45	1				
	8	6.85	3.3	1				
	9	6.45	0	1				
Perfil 2	1	7.7	7.1	1			ENSAYO N°	
	2	7.35	7.2	1			FECHA	
	3	7.3	7.65	1			HORA	
	4	7	7.45	5.6			DESCRIPCIÓN	
	5	7	7.5	6.1			Suelo	AR
	6	7.1	7.7	5.85			Caudal	2
	7	7.05	7	1			Estado	REM
	8	6.9	6.75	1				
	9	6.85	6.5	1				
Perfil 3	1	7.5	5.2	5.6			OBS	
	2	7.25	5.4	3.8			2.55	Min
	3	7.3	5.7	1			Desplaza	muestra
	4	7	5.85	4.9				
	5	7.05	6.05	5.15				
	6	7.1	6.15	5.6				
	7	7.05	5.95	1				
	8	6.85	6	1				
	9	6.8	4.9	1				

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.4	7.8	7.6	7.6	7.6	t=	1.75
	2	7.25	7.55	7.55	7.55	7.45	t=	0
	3	7.2	7.55	7.55	7.55	7.45	t=	0
	4	7.05	7.4	7.4	7.35	7.25	t=	0.25
	5	7.1	7.4	7.4	7.4	7.35		
	6	7.3	7.6	7.6	7.6	7.55		
	7	7.2	7.5	7.5	7.5	7.4		
	8	7	7.3	7.3	7.2	7.05		
	9	6.8	7.1	7	7	6.95		
Perfil 2	1	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	ENSAYO Nº	
	2	7.2	7.45	7.45	7.45	7.4	FECHA	
	3	7.2	7.5	7.45	7.45	7.4	HORA	
	4	7.1	7.4	7.35	7.3	7.25	DESCRIPCIÓN	
	5	7.15	7.4	7.4	7.35	7.3	Suelo	AM
	6	7.3	7.55	7.5	7.5	7.5	Caudal	1
	7	7.2	7.4	7.4	7.4	7.3	Estado	NAT
	8	7	7.2	7.2	7.2	7.15		
	9	6.9	7.05	7.05	7	6.95		
Perfil 3	1	7.25	7.35	7.35	7.35	7.35	OBS	
	2	7.2	7.35	7.35	7.35	7.35	Min	
	3	7.3	7.5	7.4	7.4	7.4		
	4	7.15	7.25	7.2	7.2	7.2		
	5	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3		
	6	7.3	7.4	7.3	7.3	7.3		
	7	7.05	7.2	7.1	7.05	7.05		
	8	6.85	6.95	6.95	6.9	6.9		
	9	6.7	6.8	6.75	6.7	6.7		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.3	7.2	7.2	7.2	6.95	t=	0
	2	7.05	6.95	7.05	7.05	7.25	t=	1
	3	7	6.9	7	7	7.3	t=	0
	4	6.85	6.75	6.85	6.75	7	t=	3
	5	6.9	6.7	6.8	6.8	7		
	6	7	6.85	6.95	6.9	7.1		
	7	6.95	6.8	6.9	6.9	6.9		
	8	6.8	6.7	6.8	6.8	6.3		
	9	6.7	6.6	6.3	5.55	5.5		
Perfil 2	1	7	6.9	7	7	7.25	ENSAYO N°	
	2	6.75	6.65	6.75	6.75	7	FECHA	
	3	6.8	6.65	6.7	6.7	6.9	HORA	
	4	6.65	6.5	6.6	6.6	6.8	DESCRIPCIÓN	
	5	6.65	6.55	6.65	6.65	6.85	Suelo	AM
	6	6.8	6.7	6.8	6.8	7	Caudal	1
	7	6.8	6.7	6.8	6.75	6.9	Estado	REM
	8	6.65	6.55	6.65	6.6	6.6		
	9	6.4	6.4	6.45	6.4	6.4		
Perfil 3	1	6.75	6.7	6.75	6.5	6.45	OBS	
	2	6.8	6.6	6.6	6.25	6.25	Min	
	3	6.8	6.55	6.6	6.6	6.6		
	4	6.55	6.55	6.6	6.6	6.6		
	5	6.6	6.6	6.65	6.6	6.7		
	6	6.7	6.7	6.75	6.75	6.9		
	7	6.75	6.7	6.75	6.7	6.7		
	8	6.65	6.6	6.7	6.65	6.6		
	9	6.65	6.65	6.75	6.75	6.7		

		t=0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.35	7.75	6	5.85	5.5	t=	3
	2	7.15	7.55	7	6.35	5.9	t=	0
	3	7.1	7.5	7.5	7.5	7.4	t=	0
	4	6.9	7.3	7.3	7.3	7.3	t=	0
	5	6.95	7.35	7.35	7.35	7.35		
	6	7	7.4	7.4	7.4	7.4		
	7	6.9	7.3	7.25	6.9	6.4		
	8	6.75	7.15	7.1	5.5	5		
	9	6.6	6.95	6.95	5.85	4.95		
Perfil 2	1	7.3	7.5	7.5	7.5	7.45	ENSAYO N°	
	2	7.05	7.35	7.35	7.35	7.35	FECHA	
	3	7	7.3	7.3	7.3	7.3	HORA	
	4	6.8	7.1	7.1	7.05	7.05	DESCRIPCIÓN	
	5	6.8	7.1	7.1	7.1	7.1	Suelo	AM
	6	7	7.25	7.25	7.25	7.15	Caudal	2
	7	6.9	7.2	7.2	7.15	7.15	Estado	NAT
	8	6.65	6.95	6.9	6.9	6.9		
	9	6.7	7	7	6.8	6.8		
Perfil 3	1	7	5.3	5.1	5.1	4	OBS	
	2	6.75	6.9	6.85	6.85	6.05	Min	
	3	6.65	6.8	6.7	6.4	6.2		
	4	6.4	6.5	6.45	6.45	6.45		
	5	6.6	6.75	6.75	6.7	6.7		
	6	6.75	6.8	6.65	6.6	6.55		
	7	6.6	6.75	6.7	6.65	6.65		
	8	6.5	6.65	6.6	6.55	6.55		
	9	6.3	6.6	6.6	6.55	6.4		

		t =0	t=5	t=10	t=20	t=40	Vueltas Tuerca	
Perfil 1	1	7.05	7.05	7.05	7.05	6.95	t=	0
	2	6.8	6.8	6.8	6.85	6.75	t=	0
	3	6.8	6.8	6.8	6.85	6.7	t=	1
	4	6.6	6.6	6.6	6.65	6.5	t=	2
	5	6.65	6.65	6.65	6.7	6.7		
	6	6.85	6.85	6.85	6.85	6.7		
	7	6.85	6.85	6.85	6.85	6.7		
	8	6.8	6.8	6.8	6.85	6.65		
	9	6.85	6.8	6.8	6.85	6.7		
Perfil 2	1	7.1	7.1	7.05	7.05	6.9	ENSAYO N°	
	2	6.8	6.8	6.8	6.85	6.85	FECHA	
	3	6.8	6.8	6.8	6.85	6.7	HORA	
	4	6.6	6.6	6.6	6.65	6.65	DESCRIPCIÓN	
	5	6.7	6.7	6.7	6.75	6.7	Suelo	AM
	6	6.9	6.9	6.9	6.95	6.8	Caudal	2
	7	6.9	6.9	6.9	7	6.85	Estado	REM
	8	6.8	6.8	6.8	6.85	6.7		
	9	6.9	6.85	6.8	6.9	6.75		
Perfil 3	1	7.2	7.15	7.1	7.1	6.95	OBS	
	2	6.8	6.8	6.8	6.8	6.6	Min	
	3	6.8	6.8	6.8	6.85	6.65		
	4	6.65	6.65	6.7	6.75	6.6		
	5	6.7	6.7	6.7	6.75	6.5		
	6	6.9	6.9	6.9	7	6.75		
	7	6.9	6.9	6.9	7	6.75		
	8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9		
	9	6.85	6.8	6.8	6.9	6.8		