

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA PRELIMINAR DE SUELOS  
ORGÁNICOS PROVENIENTES DE VALDIVIA, PUERTO MONTT Y  
PUERTO AYSÉN

**JUVER CESAR MARDONES OCARES**

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA: DIPL-ING. MAURO POBLETE FREIRE.

PROFESOR INFORMANTE: DR. FELIPE VILLALOBOS JARA.

CONCEPCIÓN, DICIEMBRE 2016

*A toda mi familia,  
Especialmente a Juver y Mateo.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí y por todas las bendiciones y oportunidades que me entrega día a día.

A mi madre Mitzi Ocares, que con sacrificio y esfuerzo ha dado todo lo que ha estado a su alcance para darnos lo mejor siempre. Gracias por tu ayuda, tu amor incondicional, tu capacidad de mirar siempre la vida con optimismo, por tus oraciones, que seguramente siempre estaba en ellas. Gracias por tus retos y castigos, por las tantas veces que te he hecho pasar rabias y a pesar de todo siempre estuviste ahí conmigo, simplemente te amo viejita.

A mi padre Cesar Mardones, que me acompañó desde el primer día que supimos que entraría a la Universidad, apoyándome siempre económica y psicológicamente con sus sabios consejos. Gracias por todo papá, por dar la cara siempre en todos lados donde me hospedaba en concepción para que pudiera estudiar tranquilo, por trabajar duro para que nada faltara, espero algún día compensar todo lo que has hecho por mí.

A la tía Mary que fue mi segunda madre en Concepción, por esperarme de lunes a jueves como si fuese un miembro más de su familia. Al tío Rodrigo por abrirme las puertas de su hogar y hacerme sentir como en casa durante mis primeros años universitarios.

A mi hijo Juver Matías, gracias por venir y cambiar mi vida, por ser el motor que me empuja y me levanta día a día, ahora junto a Mateo serán mis dos grandes razones para luchar y cumplir nuestros sueños.

A mi polola Esthefany que desde siempre me ha acompañado y hemos estado juntos en las buenas y en las malas para darles lo mejor a nuestros hijos, por demostrar que pese a la distancia que nos separaba, el amor siempre es más fuerte.

Al profesor Mauro Poblete por los valiosos conocimientos entregados y por la confianza en los trabajos realizados en el laboratorio.

Finalmente agradezco a toda mi familia, que de alguna u otra manera me apoyaron, este pequeño logro también es suyo.

## **RESUMEN**

Se realiza un estudio en suelos orgánicos del sur de Chile específicamente en las Regiones de Los Ríos, Los Lagos, Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, y Magallanes y de la Antártica Chilena. Existe evidencia de que las estructuras que se construyen sobre este tipo de suelo pueden verse afectadas a asentamientos excesivos si no se toman los resguardos necesarios durante las etapas de estudio y construcción. Los suelos orgánicos, a priori, no son aptos para fundar estructuras, sin embargo considerando la heterogeneidad de este tipo de suelos, el avance de las técnicas constructivas y del estudio geotécnico, se busca un método práctico de análisis, presentando recomendaciones constructivas que prevengan futuros problemas.

Mediante la exploración de suelos estándar y la realización de ensayos de laboratorio simples, se obtienen parámetros geotécnicos de los suelos orgánicos y se analizan de acuerdo a la aptitud que tienen para soportar cargas impuestas por las estructuras. En el caso de viviendas existentes se enfrenta el problema de una manera similar, considerando el daño que éstas presentan o podrían llegar a presentar.

## **ABSTRACT**

A study is carried out in organic soils in southern Chile, specifically in the regions of Los Ríos, Los Lagos, Aysen of General Carlos Ibáñez del Campo, and Magallanes and Chilean Antarctica. There is evidence that the structures built on this type of soil can be affected to excessive settlements if the necessary precautions and measures are not taken during the stages of study and construction. It is known beforehand, organic soils are unfit to found structures, however considering the heterogeneity of this kind of soil, the advances of construction techniques and geotechnical study, for a practical method of analysis, presenting constructive recommendations that could prevent future problems.

By scanning standard soil testing and laboratory, geotechnical parameters of organic soils are obtained and analyzed according to the ability they have to bear the burdens imposed by the new structures. In the case of existing structures problem facing a similar manner, considering the damage they have, or may present. Whereupon recommendations appropriate solution are obtained for each case.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>2. ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>13</b>
2.1 DEFINICIÓN DE SUELO ORGÁNICO .....	13
2.2 DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA .....	19
2.3 FORMACIÓN DE SUELOS ORGÁNICOS .....	21
2.4 SUELOS ORGÁNICOS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	22
2.4.1 HUALVES .....	22
2.4.2 MALLINES.....	24
2.4.3 MAZACOTE.....	26
2.5 ANTECEDENTES DE SUELOS ORGÁNICOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
2.5.1 REGIÓN DE LOS RÍOS .....	26
2.5.2 REGIÓN DE LOS LAGOS.....	30
2.5.3 REGIÓN DE AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO .....	32
2.5.4 REGIÓN DE MAGALLANES Y DE LA ANTÁRTICA CHILENA .....	34
2.6 INFORMES DE SUELOS ORGÁNICOS .....	38
<b>3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....</b>	<b>39</b>
3.1 ENSAYOS DE LABORATORIO .....	39
3.1.1 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA .....	40
3.1.2 HUMEDAD NATURAL DE LAS MUESTRAS.....	43
3.1.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA ( $G_s$ ) .....	47
3.1.4 LÍMITE LÍQUIDO.....	51
3.1.5 ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN.....	56
3.1.6 VELETA DE CORTE .....	74
3.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	77
<b>4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS ORGÁNICOS..</b>	<b>79</b>
4.1 DEFINICIONES Y NOTACIÓN.....	79
4.2 RECOMENDACIONES PARA EL MODELO DEL MATERIAL CON ELEMENTOS FINITOS	80
4.3 RECOMENDACIONES PARA CALIBRAR LOS PARÁMETROS DEL MODELO MODIFIED CAM-CLAY MCC CON SUELOS ORGÁNICOS .....	85
4.4 ANÁLISIS DE LAS FUNDACIONES SUPERFICIALES CON ELEMENTOS FINITOS.....	88
4.4.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO Y SIMULACIONES DE ELEMENT TEST 89	
4.4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE VALOR DE CONTORNO EN ELEMENTOS FINITOS.....	91
4.4.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CON LA VIGA DE FUNDACIÓN .....	101
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>103</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>112</b>

ANEXO A: TABLA DE OBSERVACIONES EN INFORMES DE MECÁNICA DE SUELOS EN LA ZONA DE ESTUDIO, RELACIONADO CON SUELOS ORGÁNICOS.....	112
ANEXO B: CURVAS VARIACIÓN DE ESPESOR VS RAÍZ DE TIEMPO .....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: TESTIGOS DE TURBA (LEÓN VALDEBENITO ET AL., 2012).....	15
FIGURA 2: (A) ASENTAMIENTO DEL SUELO EN SIBU (MALASIA); (B) INUNDACIÓN EN SIBU (MALASIA) EL AÑO 2001 (HUAT ET AL., 2014) .....	17
FIGURA 3: ASENTAMIENTO DE TERRENO EN PATIO DE UNA VIVIENDA, LOCALIDAD DE ALERCE, PUERTO MONTT. ....	17
FIGURA 4: ASENTAMIENTO DE TERRENO EN PATIO TRASERO DE UNA VIVIENDA, LOCALIDAD DE ALERCE, PUERTO MONTT. ....	18
FIGURA 5: AGRIETAMIENTO DE PISO INTERIOR EN VIVIENDA DEBIDO AL ASENTAMIENTO DE LA BASE SOBRE LA CUAL SE APOYA, LOCALIDAD DE ALERCE, PUERTO MONTT. ....	18
FIGURA 6: PROCESO DE FORMACIÓN DE UNA TURBERA DE ORIGEN GLACIAR (WWW.TURBERAS.CL). ....	22
FIGURA 7: BOSQUE PANTANOSO O HUALVE (FOTOGRAFÍAS: JUAN PABLO MORA) .....	23
FIGURA 8: DISTRIBUCIÓN DE HUALVES EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS (LARRAÍN, 2011).....	24
FIGURA 9: MALLÍN EN SECTOR QUETRUS PARQUE TAGUA TAGUA (FOTOGRAFÍA: JORGE LEÓN).....	25
FIGURA 10: CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS BÁSICAS Y RESPUESTA SÍSMICA DE SUELOS DE VALDIVIA (ARENAS ET AL., 2005).....	28
FIGURA 11: DISTRIBUCIÓN DE HUMEDALES Y ÁREAS URBANAS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS, CIUDAD DE VALDIVIA Y ALREDEDORES .....	30
FIGURA 12: DISTRIBUCIÓN DE LOS HUMEDALES Y ÁREAS URBANAS-INDUSTRIALES. A) EN LA REGIÓN DE LOS LAGOS; B) CIUDAD DE PUERTO MONTT Y ALREDEDORES. ....	32
FIGURA 13: DISTRIBUCIÓN DE LOS HUMEDALES Y ÁREAS URBANAS A) PUERTO AYSÉN; B) COIHAIQUE .....	33
FIGURA 14: MAPA GEOMORFOLÓGICO DE PUNTA ARENAS, URIBE (1982).....	34
FIGURA 15: DISTRIBUCIÓN DE LOS HUMEDALES Y ÁREAS URBANAS-INDUSTRIALES. A) EN LA REGIÓN DE MAGALLANES; B) CIUDAD DE PUNTA ARENAS Y ALREDEDORES.....	37
FIGURA 16: VALORES DE HUMEDAD NATURAL E ÍNDICE DE COMPRESIÓN DE TURBAS EN COMPARACIÓN CON DEPÓSITOS DE ARCILLAS Y LIMOS (MESRI ET AL., 1997). ....	45
FIGURA 17: RELACIÓN ENTRE LOS PORCENTAJES DE HUMEDAD NATURAL Y CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS. ....	46
FIGURA 18: DENSIDAD SECA VS HUMEDAD NATURAL (HUAT ET AL., 2014) .....	47
FIGURA 19: RELACIÓN ENTRE $G_s$ Y CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	49
FIGURA 20: $G_s$ VS CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (HUAT ET AL., 2014).....	50
FIGURA 21: RELACIÓN ENTRE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS ENSAYAS Y $G_s$ .....	50
FIGURA 22: ENSAYO DE CAÍDA DE CONO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DE LA MUESTRA N°8 .....	52
FIGURA 23: RELACIÓN ENTRE LL Y PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS ORGÁNICOS ENSAYADOS.....	54
FIGURA 24: LÍMITE LÍQUIDO VS CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (ABDALLAH, 1999).....	55
FIGURA 25: CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA VS LÍMITE LÍQUIDO (HUAT ET AL., 2014).....	55
FIGURA 26: EQUIPO EDMÉTRICO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL. A) CONSOLIDÓMETRO; B) PIEZAS DEL CONSOLIDÓMETRO. 1) CELDA, 2) ANILLO, 3) PIEDRA POROSA, 4) DISCO MOLDEADOR, 5) BASTIDOR RÍGIDO.....	57
FIGURA 27: ASENTAMIENTO VS TIEMPO PARA CADA CICLO DE CARGA – DESCARGA DE LA MUESTRA N°4 DE PUERTO MONTT. ....	58

FIGURA 28: ASENTAMIENTO VS TIEMPO PARA CADA CICLO DE CARGA – DESCARGA DE LA MUESTRA N°16 DE AYSÉN. ....	59
FIGURA 29: CICLO DE CARGA Y DESCARGA, DEFORMACIÓN VERTICAL VS TIEMPO PARA EL ENSAYO DE LA MUESTRA N°4 .....	60
FIGURA 30: CICLO DE CARGA Y DESCARGA, DEFORMACIÓN VERTICAL VS TIEMPO PARA EL ENSAYO DE LA MUESTRA N°16 .....	61
FIGURA 31: MUESTRA N°4 PUERTO MONTT. VOLUMEN ESPECIFICO VS TENSIÓN VERTICAL EN GRÁFICO SEMILOGARÍTMICO NATURAL.....	62
FIGURA 32: MUESTRA N°4 PUERTO MONTT. RELACIÓN DE VACÍOS VS TENSIÓN VERTICAL EN ESCALA ARITMÉTICA .....	62
FIGURA 33: MUESTRA N°16 PUERTO AYSÉN. VOLUMEN ESPECIFICO VS TENSIÓN VERTICAL EN GRÁFICO SEMILOGARÍTMICO NATURAL.....	63
FIGURA 34: MUESTRA N°16 PUERTO AYSÉN. RELACIÓN DE VACÍOS VS TENSIÓN VERTICAL EN ESCALA ARITMÉTICA .....	63
FIGURA 35: TENSIÓN DE PRE-CONSOLIDACIÓN MUESTRA PUERTO MONTT. ....	64
FIGURA 36: TENSIÓN DE PRE-CONSOLIDACIÓN MUESTRA AYSÉN. ....	65
FIGURA 37: DETERMINACIÓN DE $T_{90}$ MEDIANTE MÉTODO DE TAYLOR.....	66
FIGURA 38: MUESTRA N°4 PUERTO MONTT. COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN VS TENSIÓN VERTICAL .....	68
FIGURA 39: MUESTRA N°16 AYSÉN. COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN VS TENSIÓN VERTICAL .....	70
FIGURA 40: MUESTRA N°4 PUERTO MONTT. COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN VS TENSIÓN VERTICAL .....	73
FIGURA 41: MUESTRA N°16 PUERTO AYSÉN. COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN VS TENSIÓN VERTICAL .....	73
FIGURA 42: VELETA DE CORTE (WWW.CONTROLS-GROUP.COM) .....	75
FIGURA 43: RESISTENCIA AL CORTE MÁXIMA MEDIDO CON VELETA VS. CONTENIDO ORGÁNICO .....	76
FIGURA 44: SUPERFICIES DE FLUENCIA EN EL ESPACIO 3D DE TENSIONES. A) SUPERFICIE DE MOHR-COULOMB Y B) SUPERFICIE DE MATSUOKA-NAKAI.....	82
FIGURA 45: INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE LODE EN LA SUPERFICIE DE FLUENCIA VISTO EN EL PLANO.....	83
FIGURA 46: SIMULACIONES ESPERADAS POR EL MODELO CONSTITUTIVO PARA SUELOS ORGÁNICOS A) PARA ANÁLISIS ESTÁTICOS, CURVA ISOTRÓPICA O EDOMÉTRICA Y B) PARA ANÁLISIS DINÁMICOS, CURVA DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ.....	85
FIGURA 47: ESQUEMA DE LA INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO. A) ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN. B) ENSAYO TRIAXIAL. (THIYYAKKANDI Y ANNEX, 2011). ....	88
FIGURA 48: INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL COEFICIENTE DE COMPRESIÓN DE LA ARCILLA DE KUTTANAD. (THIYYAKKANDI Y ANNEX, 2011). ....	88
FIGURA 49: SIMULACIONES CON EL MODELO ISA-CLAY. ENSAYO ISOTRÓPICO (CARGA Y DESCARGA). ....	91
FIGURA 50: CASO 1: MATERIALES Y GEOMETRÍA DE VIGA DE FUNDACIÓN SOBRE SUELO HOMOGÉNEO .....	92
FIGURA 51: CASO 2: MATERIALES Y GEOMETRÍA DE VIGA DE FUNDACIÓN SOBRE SUELO CON DOS ESTRATOS .....	94
FIGURA 52: CASO 3: MATERIALES Y GEOMETRÍA DE VIGA DE FUNDACIÓN APOYADA CON COLUMNA DE GRAVA SOBRE SUELO CON DOS ESTRATOS.....	95
FIGURA 53: VIGA DE FUNDACIÓN CON UN SOLO ESTRATO. MAGNITUD DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN METROS.....	97

FIGURA 54: VIGA DE FUNDACIÓN CON DOS ESTRATOS. MAGNITUD DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN METROS.....	98
FIGURA 55: VIGA DE FUNDACIÓN APOYADA SOBRE COLUMNA DE GRAVA. DOS ESTRATOS. MAGNITUD DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN METROS. ....	100

## 1. INTRODUCCIÓN

---

En el sur de Chile existe evidencia de suelos con un alto contenido de materia orgánica, localizados principalmente en sectores de humedales. Se ha determinado que este tipo de suelo constituye aproximadamente el 0.7% de la superficie total de la región de Los Ríos (CONAF, 2014b), 1.2% de la región de Los Lagos (CONAF, 2014a), 1% de la región de Aysén (CONAF, 2012) y 25% de la región de Magallanes (CONAF, 2006), que son las regiones donde se focaliza este estudio, siendo Magallanes la región que mayor superficie de humedales presenta en el país. A partir de esto, surge la necesidad de investigar los suelos orgánicos, como una alternativa para fundar estructuras sobre ellos.

Como antecedentes generales se sabe que las estructuras que se construyen sobre suelos blandos, o con un alto contenido de materia orgánica, podrían presentar problemas no deseados como asentamientos excesivos de las viviendas, inundaciones o daños de los pavimentos producto de la subsidencia del suelo, por lo que se deben tomar los resguardos necesarios durante las etapas de estudio y construcción sobre ellos. Los suelos orgánicos, a priori, no son aptos para fundar estructuras, sin embargo considerando la heterogeneidad de este tipo de suelos, el avance de las técnicas constructivas y del estudio geotécnico, se busca un método práctico de análisis, presentando recomendaciones constructivas que prevengan futuros problemas.

Este trabajo busca en primera instancia identificar los suelos orgánicos presentes en la zona de estudio de acuerdo a su ubicación geográfica y elaborar un mapa mostrando la distribución que tienen dentro de cada región, realizar ensayos en laboratorio a muestras de suelo orgánico representativas, extraídas en las regiones donde se realice el estudio, además de identificar los problemas que tienen o pueden tener las estructuras fundadas sobre suelos orgánicos en la zona de estudio. Como segundo objetivo, plantea dar soluciones a aquellas dificultades que se presentan al momento de emplazar una vivienda sobre un suelo clasificado como orgánico, entregando soluciones apropiadas para las estructuras que se deseen construir. Entregar recomendaciones, tanto para viviendas nuevas como existentes, como medida de mejoramiento o precaución asociadas a la fundación de viviendas sobre este tipo de suelo.

Se establece un estudio de los suelos orgánicos situados al sur de Chile, específicamente los suelos que corresponden a la Región de Los Ríos, Región de Los Lagos, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

En primera instancia se realizó una búsqueda de información, orientada a conocer aspectos básicos de suelos orgánicos tales como formación, clasificación en base al porcentaje de materia orgánica que presentan y estudios relacionados a este tipo de suelos. Se recibieron antecedentes de suelos orgánicos presentes en la zona de estudio, por medio de informes de mecánica de suelos, otorgados por las diferentes oficinas regionales del Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU). Se determinó los lugares donde hay presencia de suelos orgánicos gracias a información otorgada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), quienes entregan datos del uso de suelos en cada región.

El capítulo dos detalla información recopilada asociada a los suelos orgánicos, nombra la denominación coloquial que se les da a los suelos orgánicos dependiendo de la región que se encuentre y se muestran planos de cada región señalando tanto las áreas urbanas como las zonas en donde existe presencia de suelos orgánicos.

El tercer capítulo está orientado a conocer los aspectos técnicos de los suelos orgánicos, mediante un análisis geotécnico se busca caracterizar este tipo de suelo, por medio de ensayos de laboratorio para obtener parámetros básicos como humedad natural de las muestras, gravedad específica, porcentaje de materia orgánica y ensayos edométricos para medir los asentamientos que se obtendrán a distintos estados de carga.

El cuarto capítulo presenta el análisis numérico de una viga de fundación situada sobre un estrato de suelo orgánico. Se presentan varios escenarios con distintas condiciones de estratos de suelos y se entrega un método de mejoramiento para abordar problemas de asentamientos en las viviendas.

## **2. ANTECEDENTES GENERALES**

---

### **2.1 Definición de suelo orgánico**

Técnicamente cualquier material que contenga carbono puede ser llamado orgánico, sin embargo, en las áreas de ingeniería geotécnica y geología, se utiliza una definición más acotada cuando se aplica estos términos a un tipo de suelo determinado. Huat et al., (2014) indica que un suelo orgánico es aquel que contiene una cantidad significativa de materia orgánica, superior al 20%, derivada de restos vegetales.

Los suelos orgánicos presentan en su estructura fibras vegetales de paredes huecas, debido a sus fragmentos de origen vegetal como tallos, hojas, raíces, etc. (Huat et al., 2014), y por lo tanto, es probable que tengan baja resistencia al corte y sean altamente compresibles, lo que implicaría que su proceso de asentamiento pueda tomar un periodo largo de tiempo. Estas condiciones del suelo podrían significar un problema en la construcción de un camino o cualquier otra obra de urbanización, a lo que se le sumarían altos costos de mantenimiento.

Las áreas donde mayoritariamente se concentra la acumulación de suelos orgánicos son los humedales, que según la Convención sobre los humedales de Ramsar (1971) los define como: “Extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda a seis metros” (González et al., 2003; Correa et al., 2011).

Los humedales en Chile pueden clasificarse en salinos y dulceacuícolas. Dentro de los humedales salinos se encuentran las marismas, albuferas y salares. Mientras, los dulceacuícolas se subdividen en dos categorías que son los rivereños y anegadizos. Los rivereños se clasifican como loticos y lenticos; y en los anegadizos se encuentran los pantanos, turberas, ñadis y bosques pantanosos (Ramírez y San Martín, 2008). Los humedales en el país cubren una superficie de aproximadamente 4.500.000 hectáreas, correspondiente al 5,9% de la superficie nacional. El 95% de esta superficie de humedales en el país se concentra entre las regiones de Aysén y Magallanes, las que corresponden a

parte de la llamada Patagonia Chilena, y están representadas mayoritariamente por turberas (Promis, 2010).

Las turberas son humedales formados por la acumulación de turba y que poseen una vegetación actual formadora de ella (Martínez Cortizas et al., 2009). Son pantanos de lugares fríos que es posible encontrar a lo largo de todo Chile, sin embargo se concentran mayoritariamente desde Valdivia al sur, por las cordilleras de los Andes y de la costa. Corresponden habitualmente a lagunas que se han rellenado de material vegetal. Estos pantanos se caracterizan por presentar anegamiento permanente, un pH ácido y una gran deficiencia en nutrientes minerales. El material orgánico se descompone lentamente debido a la alta acidez del sustrato, que impide la proliferación de organismos descomponedores (Promis, 2010).

Las turbas son suelos orgánicos derivados de restos vegetales pero con un mayor contenido de materia orgánica, superior al 75% (ASTM D4427-13), técnicamente son depósitos superficiales no consolidados con alto contenido de materia orgánica y que constituyen la superficie de los sistemas de humedales (Huat et al., 2014). Esta materia orgánica ha sido formada en un lugar determinado, y consta de 90% de agua y 10% de restos vegetales. La turba se forma bajo condiciones donde el material vegetal se conserva por miles de años debido a una combinación de saturación permanente de agua, bajos niveles de oxígeno y altos niveles de acidez (CKPP, 2008). La Figura 1 muestra un perfil de una muestra de turba donde se observa que normalmente tienen un color marrón oscuro a negro, además, presentan una consistencia esponjosa y un olor característico. En ocasiones es posible observar restos de fibras de plantas en su composición (León Valdebenito et al., 2012).



**Figura 1: Testigos de turba (León Valdebenito et al., 2012)**

La clasificación precisa de suelos orgánicos y turba en Ingeniería geotécnica varía dependiendo de su contenido de materia orgánica, la cual indica que todos los suelos con un contenido de materia orgánica superior al 20% se le conocen como suelo orgánico, y turba es el suelo con contenido orgánico de más del 75% (ASTM D4427-13). La Tabla 1 muestra la clasificación ASTM para suelos orgánicos y turbas.

**Tabla 1: Rango de contenido orgánico ASTM D4427-13**

Tipo de suelo	Descripción	Contenido orgánico (%)
Arcilla, limo o arena	Levemente orgánico	2 – 20
Suelo orgánico	-	25 – 75
Turba	-	>75

Huat et al. (2014), indica que la turba tiene ciertas características que lo diferencian de otro tipo de suelo y requiere consideraciones especiales para la construcción sobre ellos, estas características son:

- Alto contenido de humedad natural (hasta 1500%)
- Alta compresibilidad
- Baja resistencia al corte (2 – 5 kPa)
- Alto grado de variabilidad espacial
- Potencial para descomposición adicional como resultado de cambios en las condiciones ambientales
- Alta permeabilidad comparada con la arcilla

La identificación de este tipo de suelos es importante debido a que presentan una baja capacidad de soportar cargas y son altamente compresibles en comparación a un suelo con bajo contenido orgánico, por lo tanto no proporciona un soporte adecuado a las estructuras.

Un caso emblemático de catástrofe a causa del asentamiento de estructuras fundadas sobre suelos orgánicos se presentó en la ciudad de Sibuloh, Malasia, en el año 2001, donde una parte importante de las viviendas de la ciudad se deterioró debido al asentamiento excesivo que presentó el suelo, por lo que estas debieron ser abandonadas completamente por sus residentes (Figura 2 a). La subsidencia del suelo provocó gradientes de drenaje negativos, resultando estancamientos de agua insalubre en muchas partes de la ciudad. Además, la ciudad quedó propensa a sufrir inundaciones dado que la formación misma de los suelos orgánicos se presenta en condiciones de suelos anegados (Figura 2 b) (Huat et al., 2014).



(a)

(b)

**Figura 2: (a) Asentamiento del suelo en Sibul (Malasia); (b) inundación en Sibul (Malasia) el año 2001 (Huat et al., 2014)**

En Chile se pueden encontrar casos de viviendas fundadas sobre suelos orgánicos en la localidad de Alerce, Puerto Montt. En las figura 3 y 4 se muestra el caso de un terreno en que la vivienda presenta un leve asentamiento. Se observa que el suelo ha ido descendiendo, dejando a la vista parte importante de la fundación. Por su parte la figura 5 muestra el agrietamiento del piso interior de una vivienda debido al asentamiento de la base sobre la cual se apoya.



**Figura 3: Asentamiento de terreno en patio de una vivienda, localidad de Alerce, Puerto Montt.**



**Figura 4: Asentamiento de terreno en patio trasero de una vivienda, localidad de Alerce, Puerto Montt.**



**Figura 5: Agrietamiento de piso interior en vivienda debido al asentamiento de la base sobre la cual se apoya, localidad de Alerce, Puerto Montt.**

## 2.2 Determinación de materia orgánica

La materia orgánica influye en algunas de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Dentro de las propiedades que se ven influenciadas por el contenido de materia orgánica puede ser la estructura del suelo, la compresibilidad, la resistencia al corte, además de la capacidad de retención de agua, actividad biológica, y la tasas de filtración de agua y aire (Venegas, 2008).

Montoya et al. (2010) definen la materia orgánica como una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos con propiedades diferentes. La separación de sus fracciones por métodos físicos, químicos y bioquímicos puede mejorar la comprensión del papel de la materia orgánica en el suelo.

La materia orgánica está compuesta elementalmente por carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), y azufre (S) en cantidades variables, lo que hace difícil una evaluación directa de su contenido en el suelo (Rosell et al., 2001).

En un sentido amplio, la materia orgánica es la fracción del suelo compuesta por restos de organismos vivos. También ha sido definida como la fracción orgánica del suelo, excluidos los residuos animales y vegetales aún no descompuestos (SSSA, 1997).

En realidad, la materia orgánica se encuentra constituida por una variedad importante de compuestos de complejidad variable en un continuo estado de transformación. Este material varía desde los residuos de cultivos y animales recientemente incorporados hasta la compleja estructura del humus (componente orgánico del suelo que contiene principalmente ácido húmico) alcanzada luego de siglos de transformación.

Existen diferentes técnicas analíticas para determinar la materia orgánica del suelo, dos de las cuales se utilizan frecuentemente en los laboratorios: el método de pérdida por ignición y el método de combustión húmeda de Walkey – Black (Walkey – Black, 1934).

El método de pérdida por ignición se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a una temperatura de 430 °C en horno-mufla durante 24 horas cuyo procedimiento se detalla en la norma ASTM D 2974-14. Con temperaturas de 430 °C se

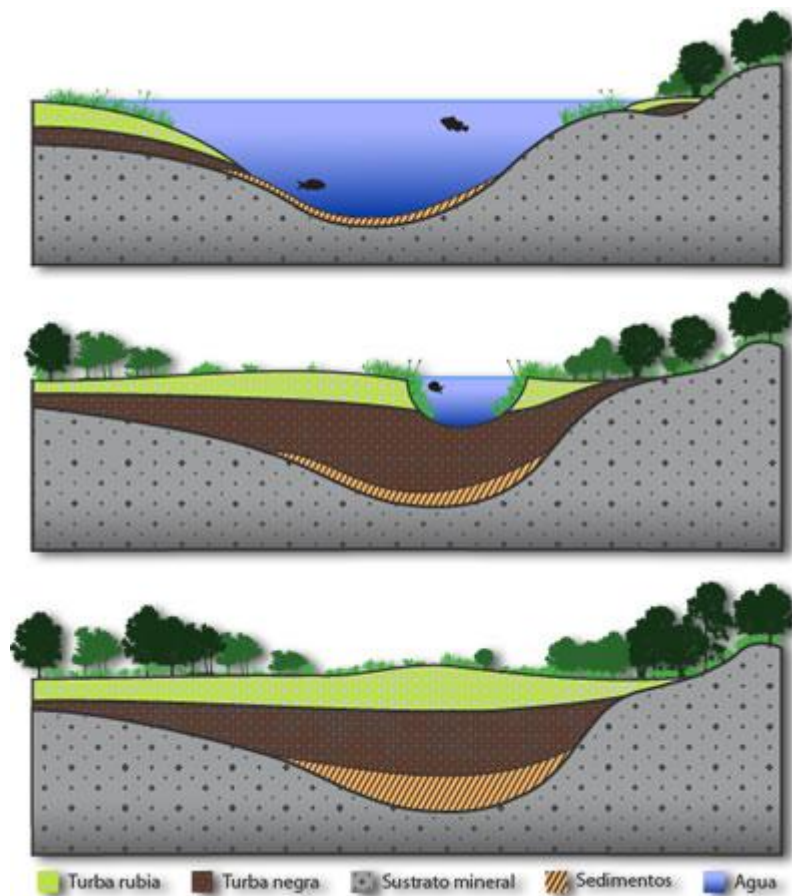
lograría una completa oxidación de la materia orgánica. Así, este método permite la determinación de la materia orgánica total del suelo, incluyendo las formas condensadas, humus y residuos orgánicos poco alterados (Davies, 1974). Otros estudios han determinado que aún a 600 °C parte de las sustancias húmicas permanecen resistentes a la oxidación. Sin embargo, temperaturas mayores a 500 °C pueden implicar importantes errores en la determinación por pérdidas de dióxido de carbono de los carbonatos, agua estructural de los minerales de arcilla, oxidación del ion ferroso y descomposición de sales hidratadas y óxidos (Rosell et al., 2001). El método de pérdida por ignición resulta un método económico dado que no se utilizan reactivos químicos y requiere pocas horas para su realización (La Manna et al., 2007).

El método de la combustión húmeda de Walkey – Black consiste en una oxidación con dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico. La reacción toma el calor de la disolución del ácido, lo que eleva la temperatura y logra la oxidación del carbono orgánico. El método de combustión húmeda determina sólo una parte del carbono orgánico, discriminando las formas condensadas y excluyendo en un 90 a 95% el carbono elemental (Jackson, 1976). Dado que la oxidación de la materia orgánica que se logra es incompleta, se utiliza un factor de corrección que puede variar de acuerdo al tipo de suelo y al horizonte considerado (Rosell et al., 2001). El factor de corrección generalmente utilizado es 1,32 que se basa en la suposición de que el 76% del carbono es oxidado ( $1/0,76=1,32$ ) (Rosell et al., 2001). Se puede utilizar otro factor para convertir la determinación de carbono orgánico en valores de materia orgánica, el que puede variar de acuerdo al tipo de suelo (La Manna et al., 2007). Buduba (2006), ha considerado un factor 2 en suelos de la Patagonia, basado en la suposición de que el carbono orgánico representa el 50% de la materia orgánica. Distintas interferencias pueden afectar la cuantificación de materia orgánica por el método de Walkey-Black, por ejemplo, presencia de iones cloruro o ferroso y óxidos de manganeso. A pesar de estas dificultades, este método es ampliamente utilizado porque requiere un equipamiento mínimo, puede adaptarse para la manipulación de gran número de muestras y no es muy costoso (Rosell et al., 2001). La metodología utilizada tanto para la ejecución del ensayo como los equipos utilizados se detallan en la sección 3.1.1.

### **2.3 Formación de suelos orgánicos**

Los suelos orgánicos se forman casi siempre in situ, provenientes de restos animales y fundamentalmente de plantas, donde la cantidad de materia orgánica (descompuestas o en estado de descomposición), es tan alta en relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudieran derivar de la fracción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en zonas pantanosas, en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de turbas.

El proceso de formación de este tipo de suelos se muestra en la Figura 6, el cual es descrito por Porter (1981), quien señala que durante las eras glaciares del pleistoceno, gran parte del territorio de la Región de Los Lagos fue afectado por una intensa actividad glaciaria, que cubrieron el valle central de esta zona, así como la parte actual de la Isla Grande de Chiloé, formando un paisaje caracterizado por hielo y material sedimentario. El descenso de la actividad glaciaria debido al progresivo aumento de temperatura que se inició hace unos 13.000 años, estableció el retiro de los glaciares dejando grandes masas de agua, lo que permitió la formación de grandes lagos y lagunas glaciares. En estos sectores de restringido drenaje, se generaron especiales condiciones climáticas que favorecieron a la acumulación de materia orgánica, que con posterioridad se transformaron en extensas turberas.



**Figura 6: Proceso de formación de una turbera de origen glaciar (www.turberas.cl).**

## 2.4 Suelos orgánicos en la zona de estudio

Como se mencionó anteriormente, los humedales son áreas naturalmente inundadas o saturadas que presentan un alto contenido de materia orgánica. En Chile se les denominan de distinta forma dependiendo del sector geográfico en que se encuentren, donde se pueden encontrar los hualves, mallines, mazacote entre otras denominaciones coloquiales que se les da a este tipo de suelos.

### 2.4.1 Hualves

Los hualves, hualhues, pitrantos o bosques pantanosos, son bosques nativos, ubicados en depresiones del terreno, anegados casi todo el año y que poseen bajas tasas de descomposición de vegetales en el piso del bosque. Estas comunidades boscosas y pantanosas

chilenas están dominadas mayoritariamente por mirtáceas nativas (familia de árboles o arbustos siempreverdes, ricos en aceites esenciales). Las alteraciones antrópicas en los Hualves, los transforman en matorrales de quila, pantanos o praderas (Promis, 2010). La Figura 7.a muestra un Hualve situado en la región de Los Lagos, en la Figura 7.b se observa el anegamiento estacional que presenta este tipo de bosque.



**Figura 7: Bosque pantanoso o hualve (Fotografías: Juan Pablo Mora)**

Los Hualves se encuentran distribuidos entre Coquimbo (Región de Coquimbo) hasta Puerto Montt (Región de Los Lagos), en sectores planos o de poca pendiente y que presentan anegamiento estacional o permanente, tanto en la Cordillera de la Costa como en la Depresión Intermedia, Cordillera de Los Andes, e Isla de Chiloé. Las especies de árboles más características de este ecosistema son: Pitra (nombre científico: *Myrceugenia exsucca*), Temu (*Blepharocalyx cruckshanksii*), Chequén (*Luma chequen*), Arrayán (*Luma apiculata*), Chin-Chin (*Myrceugenia ovata* var. *ovata*) y Canelo (*Drimys winteri*). Estas especies presentan adaptaciones especiales para resistir las condiciones de anegamiento (Larraín, 2011).

Diversos autores han hecho referencia a este tipo de bosques, describiéndolos adecuadamente de acuerdo a los estudios que se realizaron acerca de ellos, definen los hualves como una asociación vegetal, ya que a menudo se le confunde con los llamados “ñadis” (suelos formados a partir de cenizas de origen volcánico) u otro tipo de pantano. (Ramírez et al., 1983).

La Figura 8 muestra la distribución de hualves en la región del Los Ríos donde se observa la presencia de ellos en algunos sectores costeros y otros al interior de la región bordeando los afluentes de los ríos (Larraín, 2011).



**Figura 8: Distribución de hualves en la región de Los Ríos (Larraín, 2011)**

### 2.4.2 Mallines

El mallín, cuyo significado en lengua mapuche es pantano o tierra pantanosa, también conocidos como vegas en el vocablo español, se definen como comunidades edáficas cuyo terreno está temporalmente inundado (Collantes y Faggi, 1999). Estos suelos de ambientes húmedos también son definidos como humedales o “*wetlands*” en la bibliografía internacional (Gandullo y Schmid, 2001).

Los mallines (Figura 9) al igual que las turberas, son formaciones netamente diferenciadas de las áreas circundantes por su tipo de suelos altamente orgánico, en cuencas con alto contenido hídrico y flora característica (Raffaele, 1999).

Principalmente en las regiones de Aysén y Magallanes, a estos suelos se les reconoce coloquialmente con el nombre de mallines. Contreras (2003) indica que los mallines en la región de Aysén presentan problemas evidentes de drenaje debido a una muy baja o nula conductividad hidráulica, con baja densidad (aproximadamente  $0.4 \text{ g/cm}^3$  de suelo), alta capacidad de retención de humedad, baja capacidad de soporte y materia orgánica poco activa.

En Tierra del Fuego, región de Magallanes, se distinguen dos tipos principales de mallines: los anegados en forma permanente (con presencia de turba en el perfil de suelo) y las húmedas o anegadas temporalmente (Collantes y Faggi, 1999). Las primeras se encuentran al sur del río Grande, en suelos que poseen un gran horizonte de turba, con un pH superficial de 5 a 6 y que son accesibles al ganado en temporada de verano. En tanto, las vegas o mallines húmedos se encuentran al norte del río Grande, asentadas por suelos que varían por el contenido de materia orgánica y por la influencia de agua en el perfil, ocupan las partes más bajas o centrales de los valles y tienen anegamiento frecuente.



**Figura 9: Mallín en sector Quetrus Parque Tagua Tagua (fotografía: Jorge León)**

### **2.4.3 Mazacote**

En la ciudad de Punta Arenas, región de Magallanes, se ha notado la presencia de suelos depositados sobre ambientes glaciares y post-glaciares, que debido a la densificación urbana se ha construido sobre suelos casi siempre saturados, con baja capacidad de soporte y alta compresibilidad, que representan condiciones desfavorables para el diseño de fundaciones (Vásquez, 2012).

Debido a la necesidad de realizar construcciones es en estas áreas, se ha conocido un conjunto de sedimentos de color gris azulado, de matriz arcillosa, denominados coloquialmente como “mazacote”. Este término que se ha convertido en sinónimo de dificultades tanto para el diseño como para la construcción de proyectos de excavación y fundaciones debido a sus pobres características geotécnicas (Vásquez, 2012).

## **2.5 Antecedentes de suelos orgánicos en la zona de estudio**

Como se ha observado, dentro de la geología de Chile existe presencia de diversos tipos de humedales que conservan suelos orgánicos; por tanto, es importante conocer su distribución en cada una de las regiones en estudio. A continuación se muestran la distribución regional de este tipo de suelos, junto con algunas otras características relevantes.

### **2.5.1 Región de Los Ríos**

En la región de Los Ríos se encuentran registros de mapas geológicos publicados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), donde se muestra la presencia de suelos orgánicos, dando especial énfasis a la ciudad de Valdivia. En ese estudio se realiza un catastro de la ciudad, indicando cuales son los sectores en que los suelos son más vulnerables al poblamiento urbano y cuales presentan mejores condiciones. La Figura 10 corresponde a un extracto del documento de Arenas et al. (2005), donde se muestran las principales características geomorfológicas de la zona, mientras que la Tabla 2 muestra la descripción de la simbología utilizada para describir el área de Valdivia.

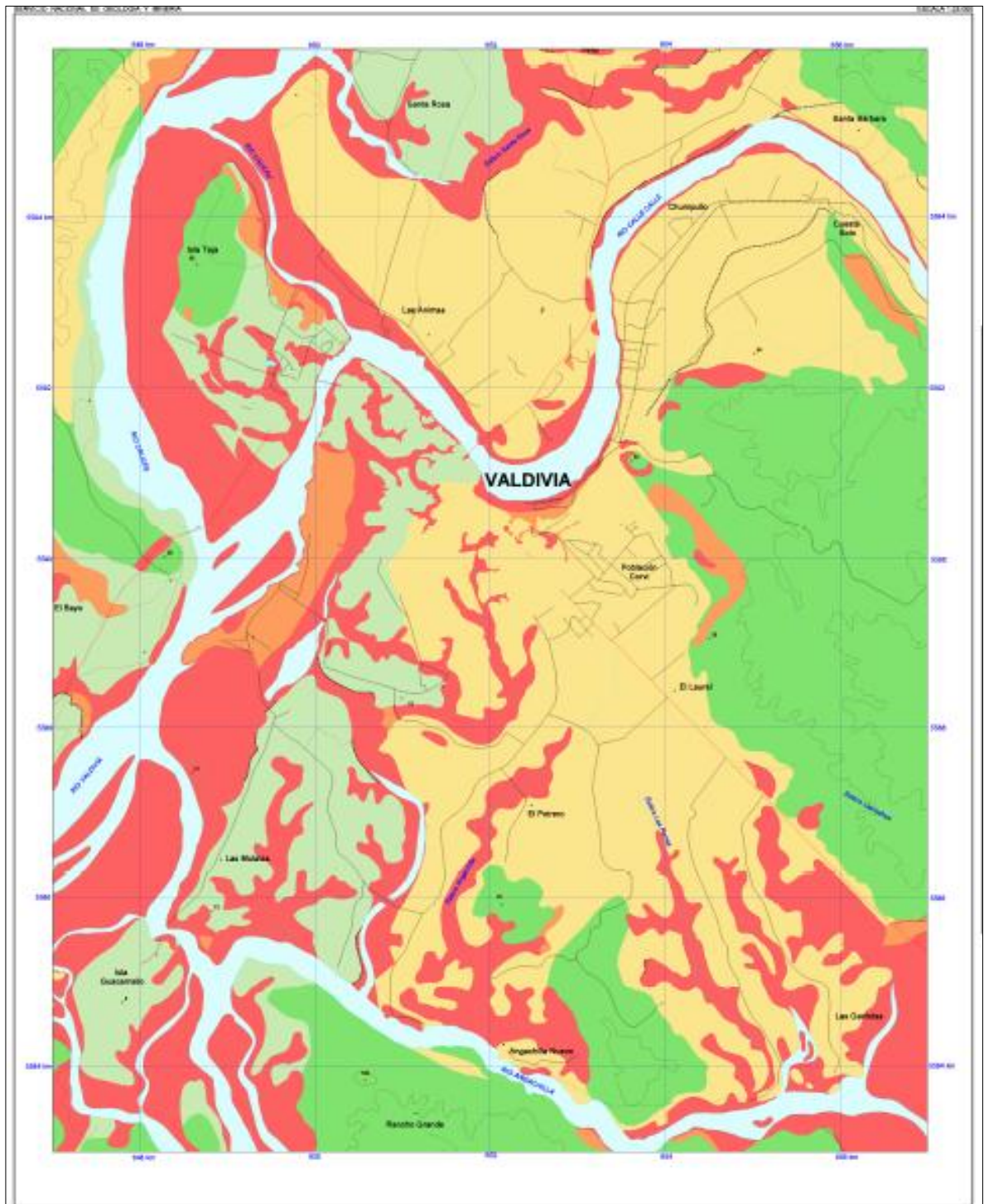
La Corporación Nacional Forestal (CONAF), cuenta con una base de datos de catastros realizados a todas las regiones del país en formato *shape*, a través de la plataforma de Sistema

de Información Territorial (SIT), donde se clasifica el uso de suelo dentro de cada región en distintas categorías que son: urbanas-industriales, terrenos agrícolas, praderas y matorrales, bosques, áreas sin vegetación, nieves y glaciares, cuerpos de agua, áreas no reconocidas y humedales.

Los tipos de humedales que identifica la CONAF son vegetación herbácea en orilla de ríos, marismas herbáceas, ñadis herbácea y arbustiva, turbales, bofedales, vegas y otros terrenos húmedos.






Según estos datos, la región de Los Ríos tiene una superficie de 1.834.964,56 (Ha) de los cuales 12.246,36 (Ha) están cubiertas por humedales lo cual corresponde aproximadamente al 0.7% de la superficie total de la región, esto de acuerdo al último catastro realizado en la región el año 2013 (CONAF, 2014.b).

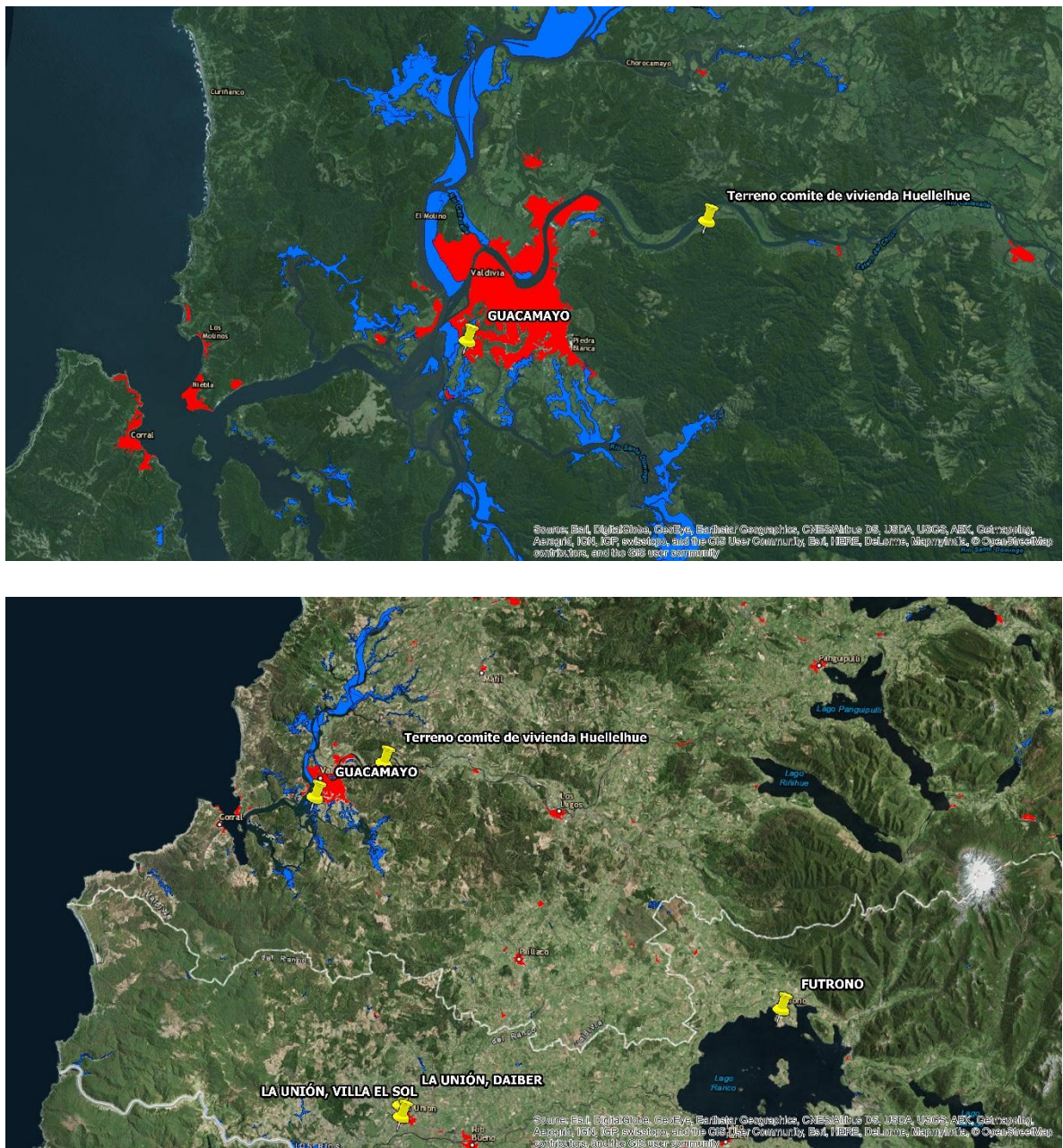
La Figura 11 muestra cómo se distribuyen las áreas entre humedales y sectores urbanos-industriales alrededor de la ciudad de Valdivia, que es la capital de la Región de Los Ríos. Los sectores de humedales se muestran en color azul mientras que las áreas urbanas-industriales se muestran con color rojo. Se puede observar de la Figura 11 que los sectores de poblamiento urbano en Valdivia están expandiéndose a terrenos que presentan suelos orgánicos o de malas condiciones para edificaciones.



**Figura 10: Características geotécnicas básicas y respuesta sísmica de suelos de Valdivia (Arenas et al., 2005)**

**Tabla 2: Descripción de la calidad de los suelos en Valdivia (Arenas et al., 2005).**

<b>APTITUD PARA LA CONSTRUCCIÓN</b>		
Descripción	Problemas asociados	Recomendaciones
<p> <b>Muy Mala</b> Corresponde, principalmente, a las zonas de humedales, vegas, rellenos artificiales y zonas de peligro de remociones en masa.</p>	<p>Mayores daños a infraestructura y edificios durante el terremoto de 1900. Sobrecarga puede causar subsidencias, licuefacción de los sedimentos, debido a exceso de presión de agua, y estrujación lateral de sedimentos. En las riberas de los ríos se pueden producir deslizamientos debido a la falta de confinamiento y el alto grado de saturación.</p>	<p>En caso de relleno, se pueden construir edificios de máximo dos pisos con fundación somera (losa rígida de hormigón).</p>
<p> <b>Mala</b> Corresponde, principalmente, a zonas de sedimentos fluviales y estuarinos recientes y algunas zonas de peligro de remociones en masa en rocas metamórficas.</p>	<p>Sobrecarga puede causar subsidencias y licuefacción de los sedimentos debido a exceso de presión de agua. En las riberas de los ríos se pueden producir deslizamientos debido a la falta de confinamiento y el alto grado de saturación.</p>	<p>Para edificios ligeros: Fundación somera con losa de hormigón rígida. Para edificios pesados: Fundación profunda (pilotes hasta capas potentes de arena).</p>
<p> <b>Regular</b> Principalmente sedimentos fluvio-estuarinos antiguos, algunas zonas de depósitos fluviales y estuarinos recientes y zonas de peligro de remociones en masa.</p>	<p>Sobrecarga puede causar subsidencias, licuefacción de los sedimentos, debido a exceso de presión de agua, y estrujación lateral de sedimentos.</p>	<p>Re lleno de áreas grandes: Terraplenes de ripios construidos en varias capas de máximo 1 m de espesor. Método de sobrecarga temporal para aumentar compactación. Re lleno de áreas reducidas: Excavación y reemplazo de los suelos compresibles por ripios. Colocación de una lámina de geotextiles con una capa de ripio para drenaje lateral y pozos rellenos con ripio cada 20 m para drenaje vertical. Protección contra inundaciones: Diques de algunos metros de altura.</p>
<p> <b>Buena</b> Corresponde a depósitos fluvio-estuarinos antiguos con niveles de arena limosa cementada (cancagua).</p>	<p>Capacidad de carga de la arena limosa cementada es limitada. Sobrecarga de los estratos superiores puede causar subsidencias. Se pueden producir deslizamientos en laderas y taludes de pendientes fuertes, debido a falta de confinamiento.</p>	<p>Arena moderadamente cementada apta para edificios de hasta aproximadamente 4 pisos. Evitar perforar con pilotes este estrato. Fundamentos extendidos de carga mediana. Edificios pesados necesitan fundación muy profunda con pilotes hasta capas de arena de espesor considerable.</p>
<p> <b>Muy Buena</b> Corresponde a las unidades de roca metamórfica, sedimentaria e ignea, en ausencia de zonas de peligro de remociones en masa.</p>	<p>Alto de grado de fracturación y meteorización puede limitar la capacidad de carga. Se pueden producir remociones en masa en taludes y laderas de alta pendiente, asociadas a planos de esquistocidad favorables, alto grado de fracturación y zonas de falla .</p>	<p>Desarrollo de obras civiles en consideración del peligro.</p>



**Figura 11: Distribución de humedales y áreas urbanas en la Región de Los Ríos, ciudad de Valdivia y alrededores**

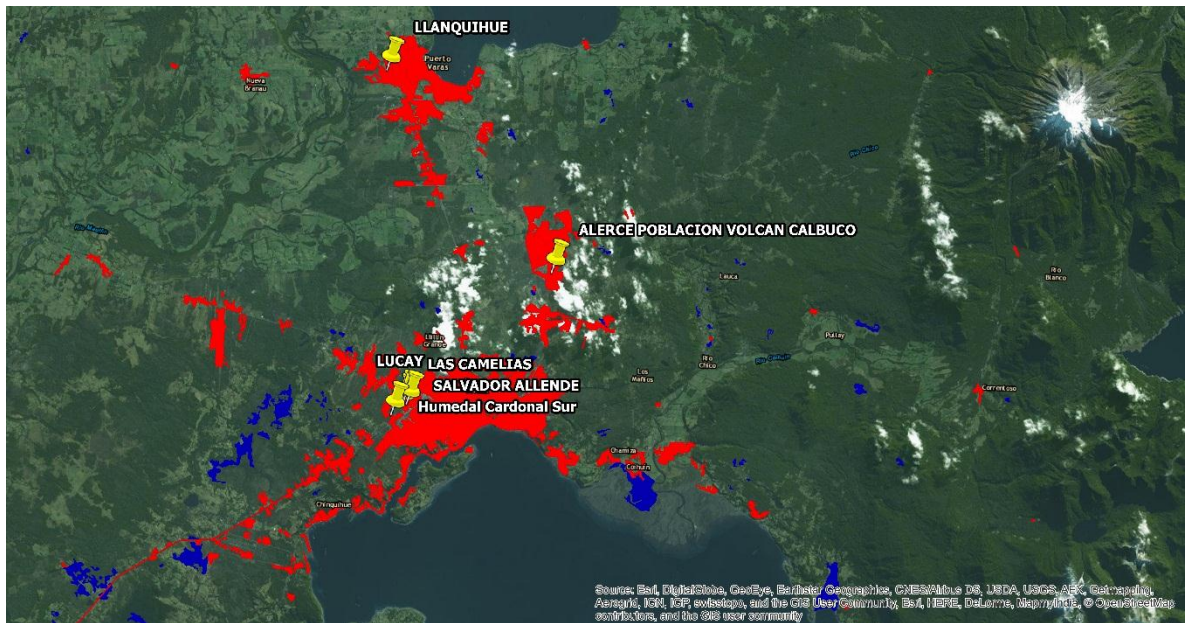
### 2.5.2 Región de Los Lagos

En la Región de Los Lagos existe la presencia de humedales conocidos coloquialmente como “hualves”. Esta región cuenta con una superficie de 4.840.836,1 (Ha), de los cuales 56.643,6 (Ha) corresponden a terrenos ocupados por humedales, lo cual representa aproximadamente

el 1.2% de la superficie total de la región (CONAF, 2014.a). La Figura 12.a muestra la distribución de humedales y áreas urbanas-industriales encontradas en esta región, de acuerdo al catastro realizado por CONAF el año 2013, por su parte la Figura 12.b muestra los sectores aledaños a la ciudad de Puerto Montt, que es la capital de la región de Los Lagos, donde observa que en esta región, la presencia de estos suelos se concentra en los sectores costeros. El color azul corresponde a humedales, mientras que el color rojo corresponde a áreas urbano-industriales de la ciudad.



(a)



(b)

**Figura 12: Distribución de los humedales y áreas urbanas-industriales. a) En la Región de Los Lagos; b) ciudad de Puerto Montt y alrededores.**

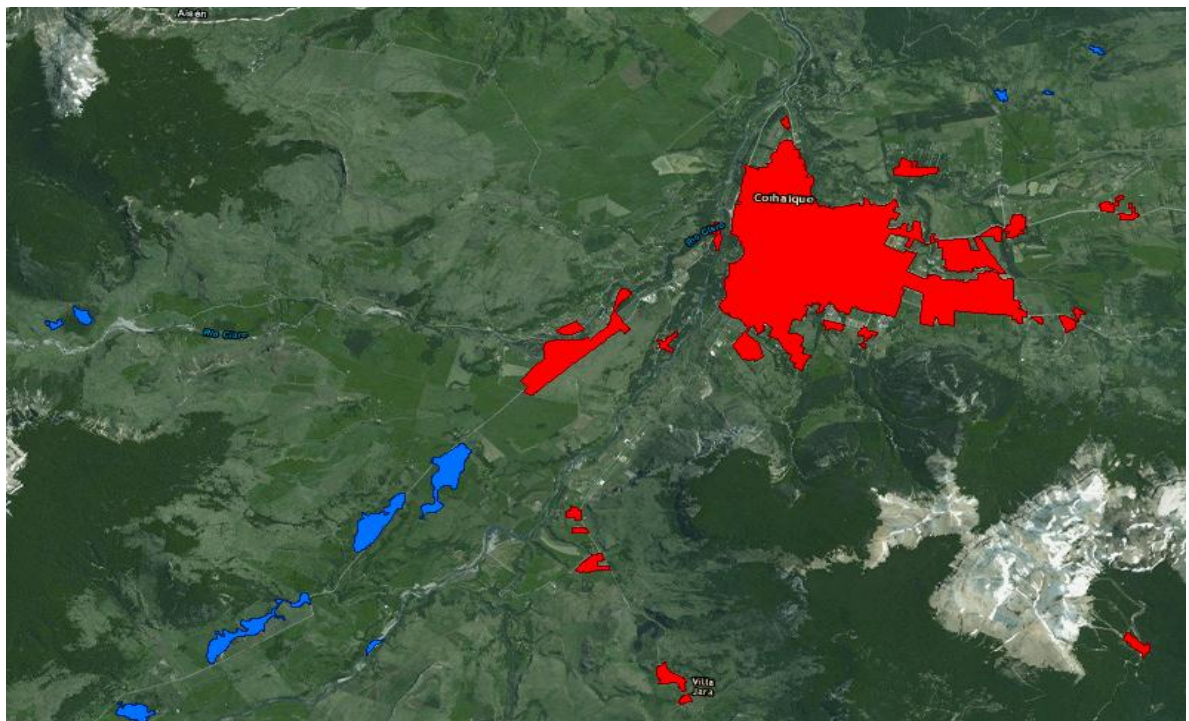
### 2.5.3 Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

En la región de Aysén se ha notado la presencia de mallines, que como se mencionó anteriormente, son suelos que presentan propiedades mecánicas muy pobres para la construcción. De acuerdo al último catastro realizado por CONAF realizado el año 2011, esta región tiene una superficie total de 10.736.056,1 (Ha) de las cuales 107.806 (Ha) corresponden a humedales, que representan aproximadamente el 1% de la superficie total de la región (CONAF, 2012).

La Figura 13 muestra la distribución de humedales y áreas urbanas en la ciudad de Puerto Aysén y Coihaique, dentro de la región de Aysén. El color azul corresponde a humedales, mientras que el color rojo corresponde a áreas urbano-industriales de la ciudad.



(a)



(b)

**Figura 13: Distribución de los humedales y áreas urbanas a) Puerto Aysén; b) Coihaique**

#### 2.5.4 Región de Magallanes y de la Antártica Chilena

En la región de Magallanes existe la presencia de mallines anegados permanente y temporalmente. Como ya se mencionó anteriormente, este tipo de humedales se presentan en los sectores en que el nivel de terreno es más bajo, o centrales entre los valles y generalmente se encuentran saturados.

También existe la presencia del mazacote, que es el término vulgar que se le da a un suelo con malas propiedades mecánicas para construir sobre él. Existe evidencia que en esta región, particularmente en el sector del río Las Minas, en Punta Arenas, se ha rellenado pequeños cauces de agua y lagunas, fundando sobre ellos e incorporándolo como terreno urbano. Esas áreas de relleno constituyen un cauce abandonado del río La Mano, que aún mantiene características de turba. Registros históricos indican que edificios ubicados en la zona central de Punta Arenas, han presentado asentamientos diferenciales debido a que sus fundaciones se apoyan sobre suelos orgánicos (Vásquez, 2012).

Uno de los trabajos más completos en cuanto a descripción de la geomorfología del área es el realizado por Uribe (1982), cuyo trabajo se muestra representado en la Figura 14.

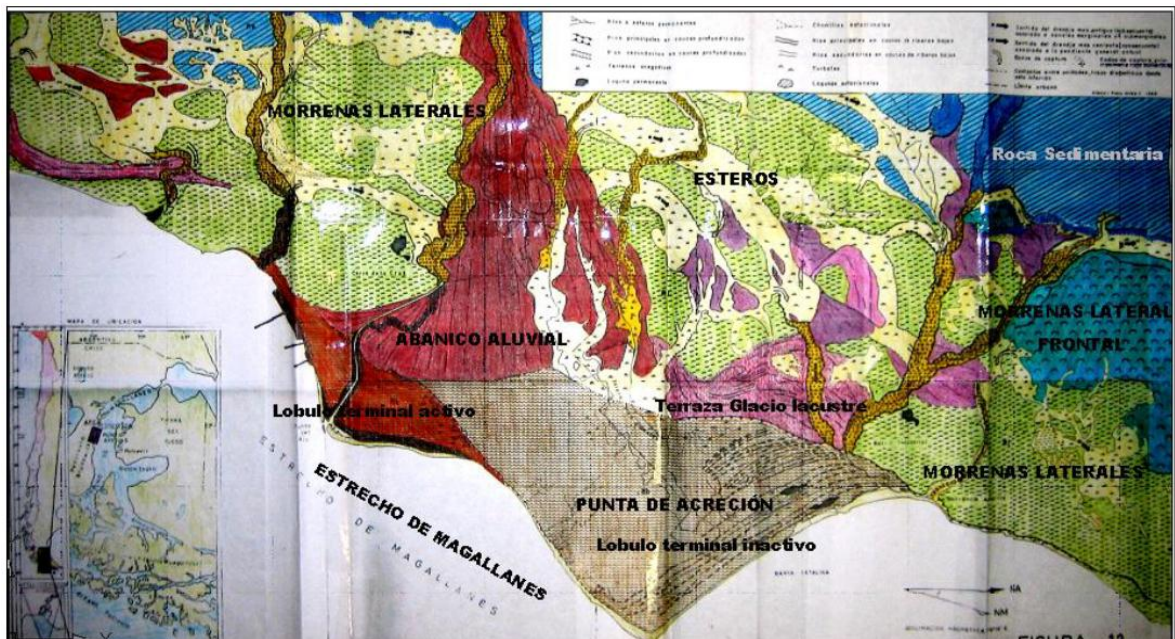
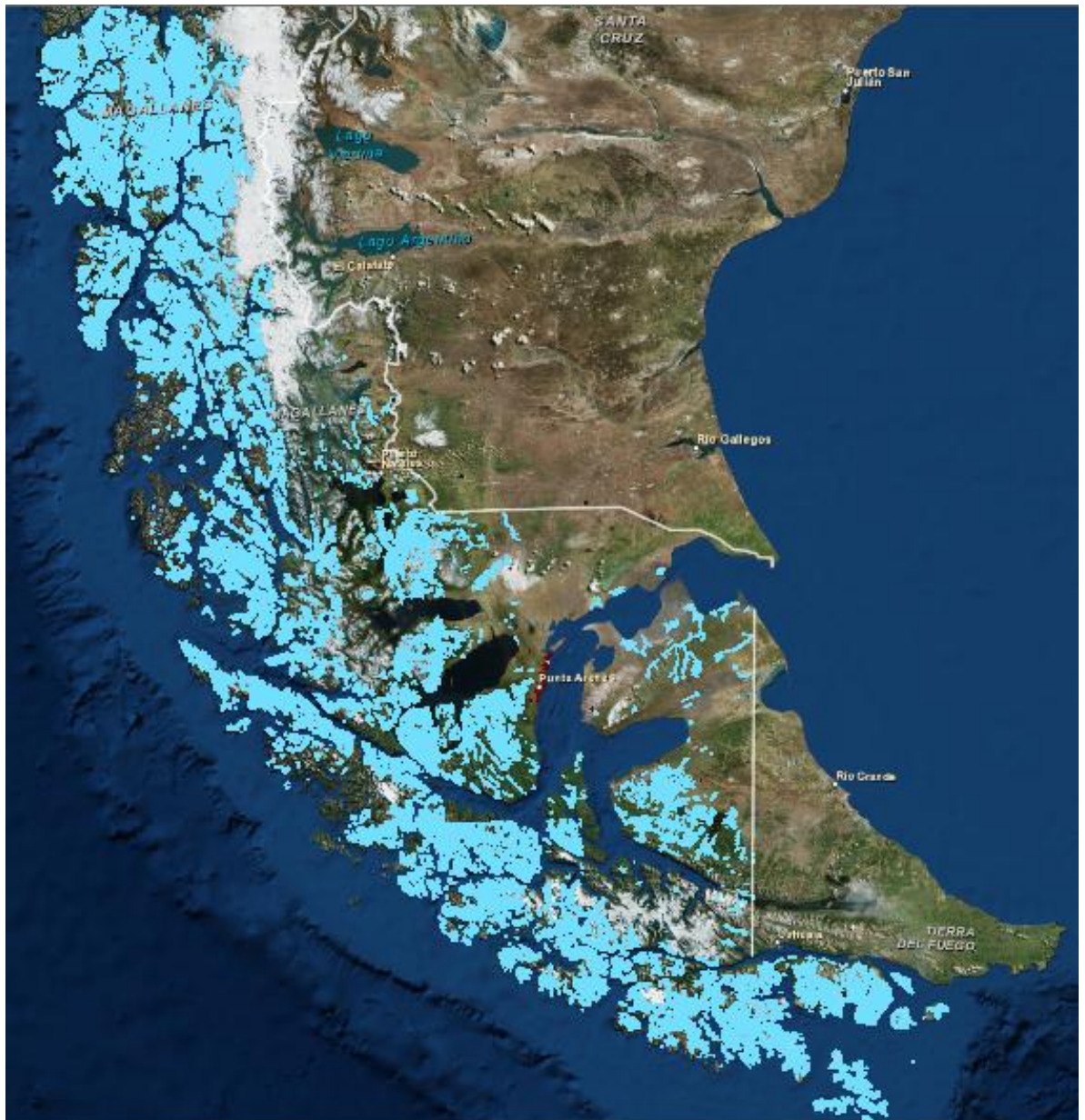
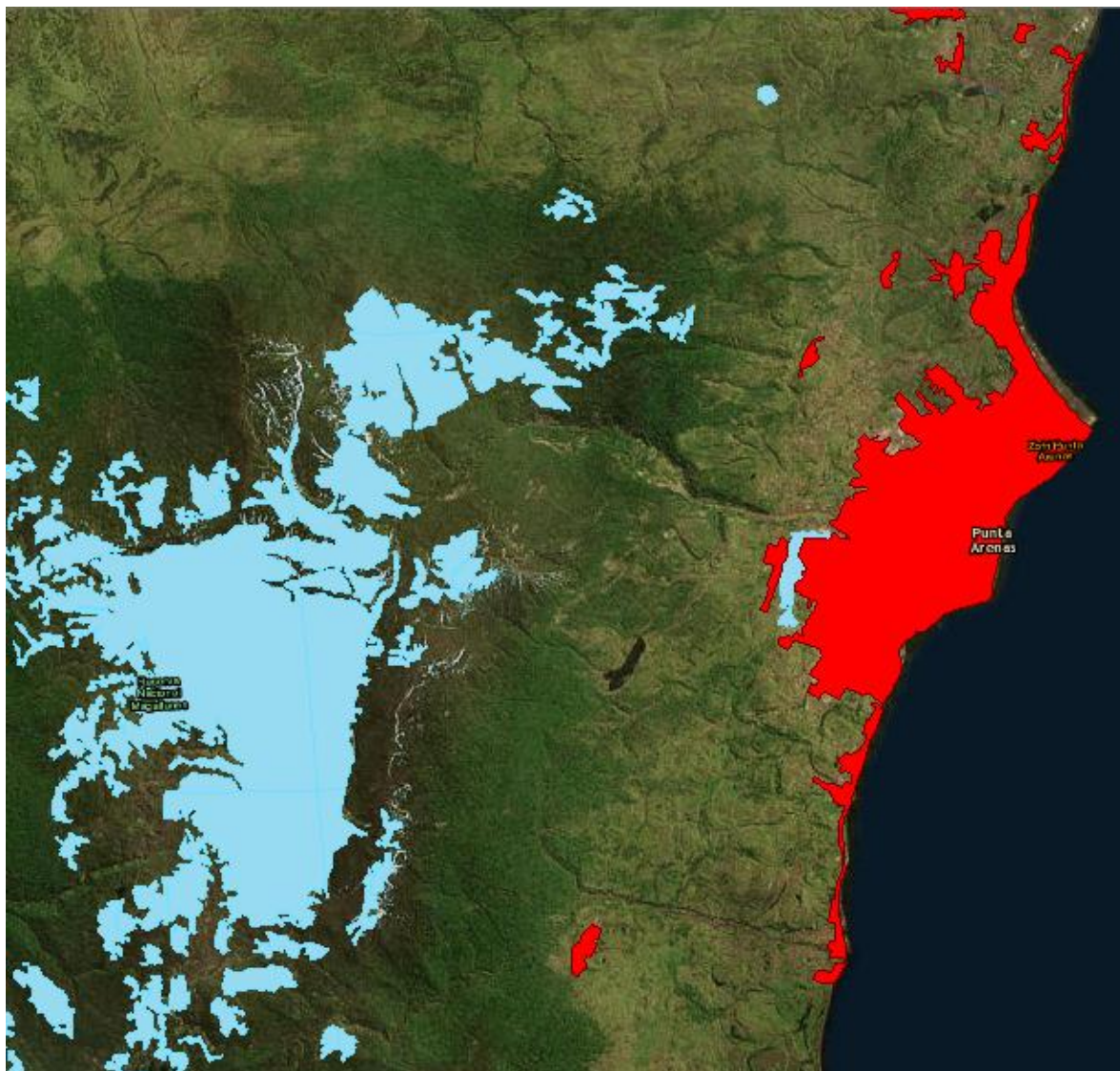


Figura 14: Mapa geomorfológico de Punta Arenas, Uribe (1982).

De acuerdo al catastro realizado por CONAF el año 2005, la región de Magallanes tiene una superficie total de 13.188.352,7 (Ha), de los cuales 3.236.724 (Ha) corresponden a sectores comprendidos por humedales, el cual corresponde aproximadamente al 25% del total de la superficie de la región. De lo anterior se puede asegurar que esta región es la que concentra la mayor cantidad de superficie de humedales en nuestro país. En la Figura 15 se muestra la distribución de los distintos tipos de humedales dentro de la región, donde se debe destacar que la mayor parte corresponde a turbales cubriendo una superficie de 3.166.489,6 (Ha) lo que corresponde al 97.8 % de la superficie cubierta por humedales en la región (CONAF, 2006).



(a)



(b)

**Figura 15: Distribución de los humedales y áreas urbanas-industriales. a) En la Región de Magallanes; b) ciudad de Punta Arenas y alrededores.**

## **2.6 Informes de suelos orgánicos**

Los primeros antecedentes de suelos orgánicos se obtuvieron de los informes de mecánica de suelos de los sectores en que el SERVIU de cada región identificó este tipo de suelo, donde se diagnosticaron los sectores que se verían afectados a problemas producto de este tipo de suelos. Se revisaron informes de mecánica de suelos de proyectos de viviendas en ejecución y otras ya terminadas, encontrando información tanto de estratigrafía del terreno como de ensayos ya realizados a suelos orgánicos.

En algunos casos se notó la presencia de suelos orgánicos o cubierta vegetal en el estrato superficial del suelo con espesores variables, en algunos casos inferiores a 1 m, el cual podría ser removido fácilmente por medio de un escarpe del terreno, no obstante en otros sectores se presentan estratos con grandes espesores, superiores a 1 m, tanto en el primer horizonte como en los subsiguientes.

En el Anexo A se muestran información de los informes otorgados por las autoridades de SERVIU de cada región, donde se muestran las observaciones que se tomaron de cada uno de los informes, y que tienen directa relación con la presencia de suelos orgánicos que presenta cada zona.

### **3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA**

---

Se realizó un reconocimiento del área urbana y zona perimetral en los sectores donde se han presentado deterioro de viviendas producto de la fundación sobre suelos orgánicos. Se recolectaron un total de 16 muestras representativas, encaminadas a la caracterización geotécnica en el laboratorio. Los lugares y fecha donde se extrajeron las muestras se detallan en la Tabla 3.

#### **3.1 Ensayos de laboratorio**

De los informe de mecánica de suelos recibidos por las autoridades de cada región, se identificaron los suelos que presentan características orgánicas, a partir de esta información, sumado a los antecedentes que se tenían de suelos orgánicos en la zona de estudio, Se extrajeron muestras representativas en las distintas localidades de las regiones de Los Ríos, Los Lagos y Aysén, las que se recibieron en el Laboratorio de GeoMateriales (LGM) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, donde posteriormente fueron ensayadas.

**Tabla 3: lugares de extracción de las muestras**

Muestra N°	Región	Localidad	Fecha	Profundidad extracción
1	Los Lagos	Puerto Montt, población Las Camelias	08/11/2015	0,6 m
2	Los Lagos	Puerto Montt, población Lucay calle Granito	08/11/2015	1,1 m
3	Los Lagos	Puerto Montt, población salvador allende	08/11/2015	1,0 m
4	Los Lagos	Puerto Montt, humedal Cardonal Sur	08/11/2015	0,2 m
5	Los Lagos	Puerto Montt, Alerce, población Volcán Calbuco	08/11/2015	1,3 m
6	Los Lagos	Puerto Varas, calle Lago Llanquihue	08/11/2015	0,5 m
7	Los Lagos	Ancud, calle 2 población Caicumeo	07/11/2015	0,5 m
8	Los Lagos	Rio Negro, puente peatonal	08/11/2015	1,0 m
9	Los Lagos	Fresia, sector Villa Esperanza	08/11/2015	0,7 m
10	Los Lagos	Dalcahue, calle 18 de Septiembre	07/11/2015	0,5 m
11	Los Ríos	La Unión, el Rehue, población Daiber	17/11/2015	0,8 m
12	Los Ríos	Valdivia, sector Guacamayo	17/11/2015	0,3 m
13	Los Ríos	Futrono, viviendas comité Nuestro Sueño	17/11/2015	0,5 m
14	Los Ríos	Valdivia, viviendas sector Huellelhue	17/11/2015	1,0 m
15	Los Ríos	La Unión, Villa el Sol	17/11/2015	0,5 m
16	Aysén	Puerto Aysén, golpeando puertas	12/12/2015	1,0 m

Para la recolección de las muestras en terreno se tuvo precaución en mantener las condiciones de humedad natural que ellas presentaban, por lo que se sellaban con papel film plástico al momento de ser extraídas.

### **3.1.1 Contenido de materia orgánica**

Desde el punto de vista de la mecánica de suelos, la materia orgánica es un componente no deseado. Su estructura abierta y esponjosa y la debilidad mecánica de sus constituyentes reducen la capacidad de carga del suelo, aumentan sus deformaciones cuando se le somete a presión o cambios en el contenido de agua y además tiende a dar una reacción ácida al agua del suelo, lo que puede provocar corrosión en los elementos constructivos enterrados en él.

Por todo esto es una práctica común eliminar en obra las capas superficiales de suelos que contienen cantidades apreciables de materia orgánica (Fabre et al., 2010).

Las características de este suelo representan una condición desfavorable para la fundación superficial de estructuras. Debido a su alta compresibilidad y los continuos procesos de descomposición de la materia orgánica, se produce una disminución del volumen de materia sólida, lo que trae como consecuencia un reacomodo de las partículas, y así una depresión en el nivel de terreno.

Se realizó el ensayo de contenido de materia orgánica por el método de pérdida por ignición, a las muestras de la Región de Los Lagos, de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM D 2974-14, las muestras fueron llevadas al instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, gracias a la colaboración del Profesor Óscar Jerez Riveros, quien es miembro del Grupo Geometalúrgico (GEOMET) del mismo instituto. El equipo utilizado para llevar a cabo la medición del contenido de materia orgánica es principalmente un horno de mufla, capaz de alcanzar una temperatura constante de 440°C, además de balanza con precisión de 0.01g, desecador y elementos misceláneos como espátulas y recipientes para la correcta ejecución del ensayo.

El ensayo consiste en determinar el contenido de ceniza y materia orgánica del suelo orgánico, el contenido de ceniza se define como el porcentaje en peso seco del material remanente de un suelo orgánico, que ha sido secado en un horno y luego calcinado por el método prescrito. Inicialmente se debe medir la humedad de cada muestra de suelo siguiendo el método de ensayo descrito en la norma NCh 1515 of 79, el cual se especifica en la sección 3.1.2. El contenido de humedad es expresado como porcentaje de la masa secada en el horno. Posteriormente el contenido de ceniza es determinado por medio de un proceso de ignición de la muestra secada en el horno, procedente de la determinación del contenido de humedad, en un horno de mufla a una temperatura constante de 440 °C.

El material remanente después de la ignición es la ceniza, el que se expresa como porcentaje de la masa de la muestra secada en el horno de mufla. Finalmente el contenido de materia orgánica se obtiene de la diferencia del porcentaje de ceniza obtenido. La ecuación 1 permite

calcular el contenido de ceniza ( $C_c$ ), donde  $M_c$  es la masa de ceniza y  $M_s$  es la masa seca de la muestra. Por su parte la ecuación 2 permite determinar el contenido de materia orgánica del suelo ( $C_{ma}$ ).

$$C_c \% = \frac{M_c}{M_s} * 100 \quad (1)$$

$$C_{ma} \% = 100 - C_c \quad (2)$$

La norma ASTM D 2974-14, define 2 procedimientos para determinar el contenido de humedad y ceniza. Para fines geotécnicos y de clasificación de las muestras se deben utilizar los métodos A y C respectivamente.

Los resultados obtenidos de las muestras que se analizaron y su correspondiente clasificación en base a lo establecido en la Tabla 1 se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4: Porcentajes de materia orgánica presente en las muestras de la Región de Los Lagos**

	Muestras Región de Los Lagos	% ceniza	% MO	Clasificación ASTM
1	Puerto Montt, población Las Camelias	55,91	44,09	SO
2	Puerto Montt, población Lucay calle Granito	88,38	11,62	Levemente Orgánico
3	Puerto Montt, población salvador allende	66,81	33,19	SO
4	Puerto Montt, humedal Cardonal Sur	42,32	57,68	SO
5	Puerto Montt, Alerce, población Volcán Calbuco	28,34	71,66	SO
6	Puerto Varas, calle Lago Llanquihue	63,96	36,04	SO
7	Ancud, calle 2 población Caicumeo	79,33	20,67	Levemente Orgánico
8	Rio Negro, puente peatonal	83,72	16,28	Levemente Orgánico
9	Fresia, sector Villa Esperanza	76,34	23,66	Levemente Orgánico
10	Dalcahue, calle 18 de Septiembre	76,42	23,58	Levemente Orgánico

Los materiales que contienen yeso (sulfato de calcio hidratado), u otros compuestos que tienen cantidades significativas de agua de hidratación, pueden presentar un problema especial debido a que este material se deshidrata lentamente a la temperatura normalizada de

secado (110 °C) y en ambientes cuya humedad relativa sea muy baja, formando un compuesto que no se encuentra normalmente presente en materiales naturales.

Con el fin de reducir el grado de deshidratación del yeso en los materiales que lo componen, o para reducir la descomposición de suelos orgánicos, puede ser deseable secar estos materiales a 60 °C, o en un desecador a temperatura ambiente. Cuando se utilice una temperatura de secado distinta de la temperatura de secado normalizada, el contenido de agua resultante puede ser diferente (NCh 1532.of 80).

### **3.1.2 Humedad natural de las muestras**

La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa, junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de éste, como por ejemplo cambios en la relación volumétrica. Los volúmenes de agua y aire que están presentes en el suelo se denominan índice de vacíos ( $e$ ), este parámetro indica cuanto espacio libre tiene un suelo, es decir, no ocupado por el esqueleto mineral, entregando información sobre la densidad del suelo. Si  $e = 1$  indica que el suelo posee igual volumen de sólidos que de vacío, si el suelo está saturado este vacío está ocupado por agua (Villalobos, 2014).

Se debe tener precaución al determinar la humedad natural de las muestras de acuerdo a lo establecido por la NCh 1515 of 79, donde se indica que el secado en horno a  $110 \pm 5$  °C no entrega resultados fiables en suelos que contienen yeso u otros minerales que pierden fácilmente el agua de hidratación, o en suelos que contienen cantidades significativas de materia orgánica. En estos casos se recomienda el secado en horno a aproximadamente 60°C o la desecación al vacío a una presión de aproximadamente 1333 Pa (10 mm Hg) y a una temperatura comprendida entre 23 y 60°C.

Se midió el contenido de humedad natural que presentó cada muestra inmediatamente después de ser recibida en el LGM para evitar pérdidas de humedad o alteración de las características in situ, de acuerdo a lo establecido en la NCh 1515 of 79, por medio de la ecuación 3.

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s - m_r} * 100 \quad (3)$$

Donde  $\omega$  es la humedad (%),  $m_h$  es la masa del recipiente más la muestra húmeda (g),  $m_s$  es la masa del recipiente más la muestra seca (g) y  $m_r$  es la masa del recipiente (g). Las muestras fueron secadas en el horno de una temperatura inferior a 60°C durante el tiempo necesario hasta encontrar el peso constante, el resultado de estas mediciones se muestra en la tabla 5.

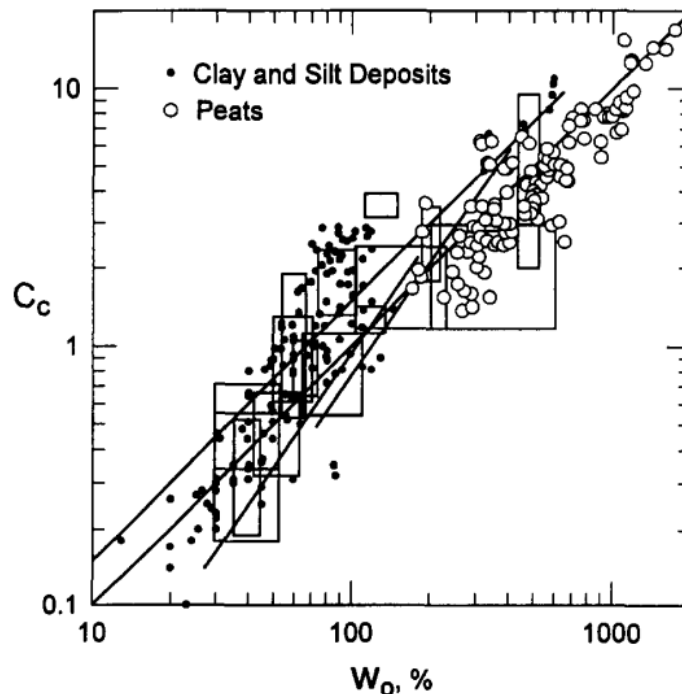
**Tabla 5: Humedad natural de las muestras extraídas en la zona de estudio**

muestra N°	$\omega$ (%)
1	124,8
2	40,1
3	109,9
4	197,3
5	227,1
6	74,2
7	71,50
8	51,4
9	55,1
10	74,5
11	40,6
12	61,6
13	28,8
14	16,6
15	36,9
16	138,5

Los suelos orgánicos poseen un alto índice de vacíos debido a que la materia vegetal que compone el suelo orgánico es de bajo peso y posee una cantidad considerable de agua. Mesri et al. (1997) indican que las partículas que componen el suelo orgánico o de turba son muy

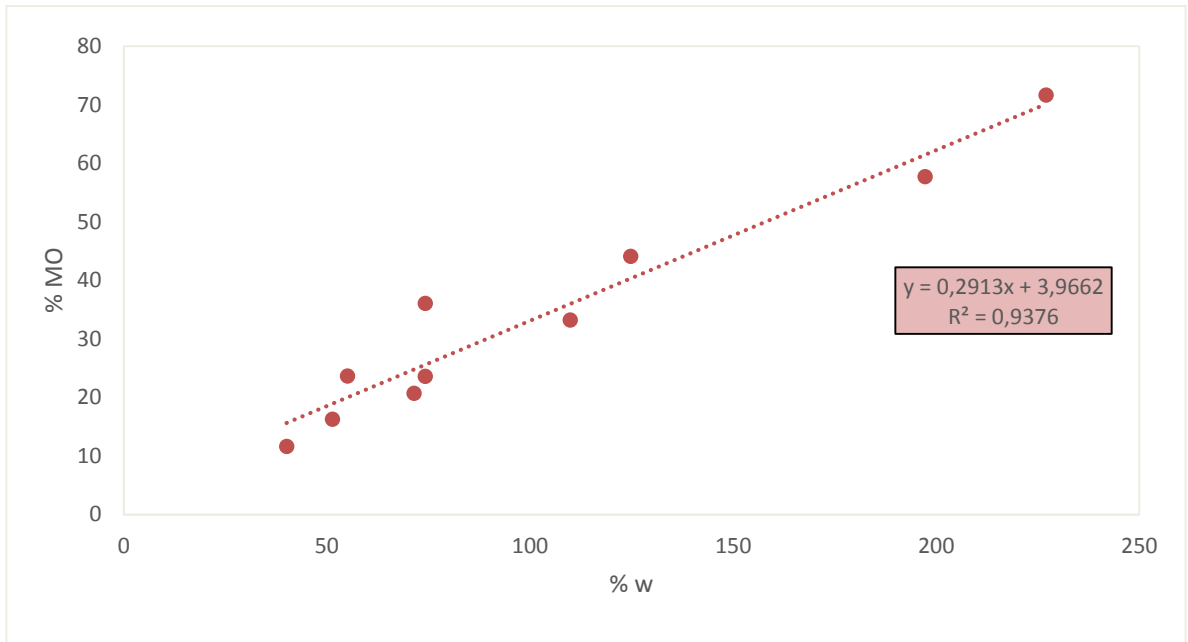
livianos debido a que su gravedad específica es relativamente pequeña (1.5 – 1.6) y puesto que las partículas de estos suelos son porosas.

Debido a la alta relación de vacíos, los depósitos de suelos orgánicos presentan altos valores de índice de compresión  $C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'_v$  donde  $e$  es el índice de vacíos y  $\sigma'_v$  es la tensión efectiva vertical. La figura 16 muestra la relación entre el contenido de humedad natural (asociado a una mayor cantidad de materia orgánica) e índices de compresión  $C_c$ , comparado con depósitos de turba, arcillas y limos, se observa que para suelos con humedad natural mayor al 100%, se presentan valores de  $C_c$  mayores a 1, lo cual se puede asociar a un alto contenido de materia orgánica y a suelos altamente compresibles.



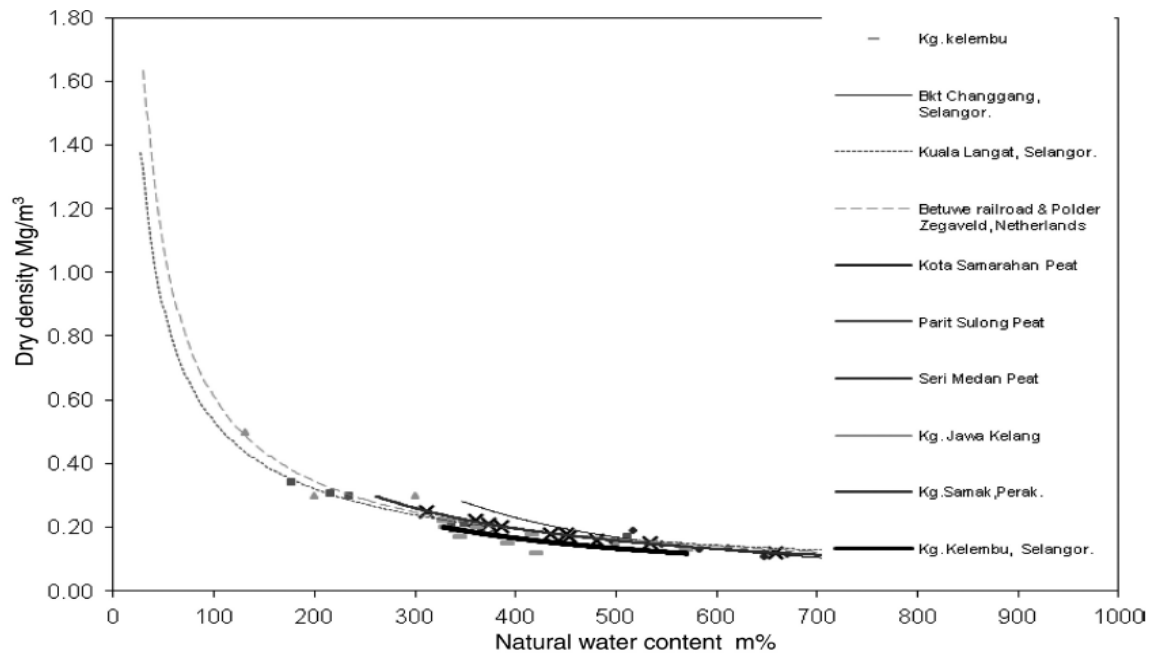
**Figura 16: Valores de humedad natural e índice de compresión de turbas en comparación con depósitos de arcillas y limos (Mesri et al., 1997).**

La figura 17 muestra la relación entre humedad natural vs el contenido de materia orgánica en muestras extraídas en la zona de estudio, donde se observa que los valores de humedad natural varían desde 50 a 250%, con un contenido de materia orgánica en un rango de 10 al 80 %. De la figura se puede establecer que el contenido de materia orgánica aumenta linealmente a medida que aumenta el porcentaje de humedad natural y viceversa.



**Figura 17: Relación entre los porcentajes de humedad natural y contenido de materia orgánica de las muestras ensayadas.**

Por otra parte la figura 18 muestra la variación de la densidad seca ( $\rho_d$ ) con respecto a la humedad natural del suelo, donde se observa que las densidades de suelos orgánicos y turbas son significativamente bajos comparados con suelos inorgánicos (minerales) o levemente orgánicos.



**Figura 18: Densidad seca vs humedad natural (Huat et al., 2014)**

### 3.1.3 Gravedad específica ( $G_s$ )

La gravedad específica  $G_s$  de las partículas minerales del suelo se define como la densidad de los sólidos en relación a la densidad del agua.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (4)$$

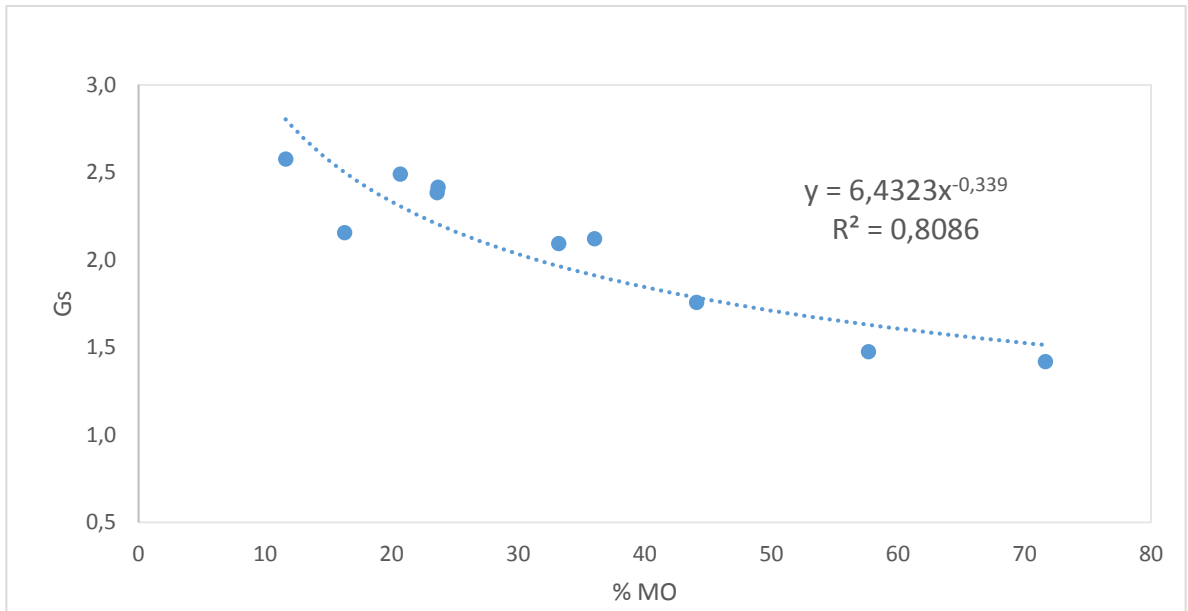
Como se mencionó anteriormente Mesri et al. (1997) indican que los valores de  $G_s$  para suelos orgánicos fluctúan entre un rango de valores de 1.5 – 1.6. Por su parte, Huat et al. (2014) indican que para los suelos inorgánicos como arenas, limos o arcillas el valor de  $G_s$  varía desde 2.6 hasta 2.8, en suelos orgánicos este valor se ve afectado por los constituyentes orgánicos que lo componen, entregando valores que fluctúan entre los 1.07 hasta los 1.77. Además indica que el valor de  $G_s$  debiese disminuir a medida que aumenta el porcentaje de materia orgánica.

Se realizaron ensayos a todas las muestras propuestas, siguiendo el procedimiento establecido en la NCh 1532.0f 80, los resultados se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6: Resultados ensayos Gravedad Específica**

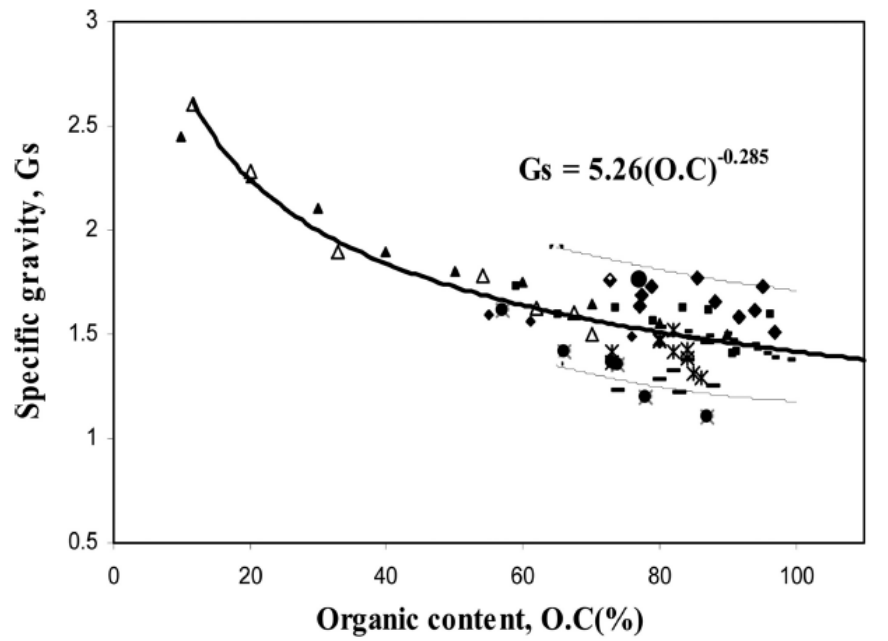
Muestra N°	G <sub>s</sub>
1	1,757
2	2,576
3	2,093
4	1,474
5	1,419
6	2,120
7	2,489
8	2,155
9	2,414
10	2,384
11	2,424
12	2,329
13	1,958
14	2,538
15	1,891
16	1,603

La figura 19 muestra la relación entre la gravedad específica con el contenido de materia orgánica a partir de los valores obtenidos en los ensayos realizados, donde se observa que a medida que aumenta el porcentaje de materia orgánica, se reduce el valor de G<sub>s</sub>.

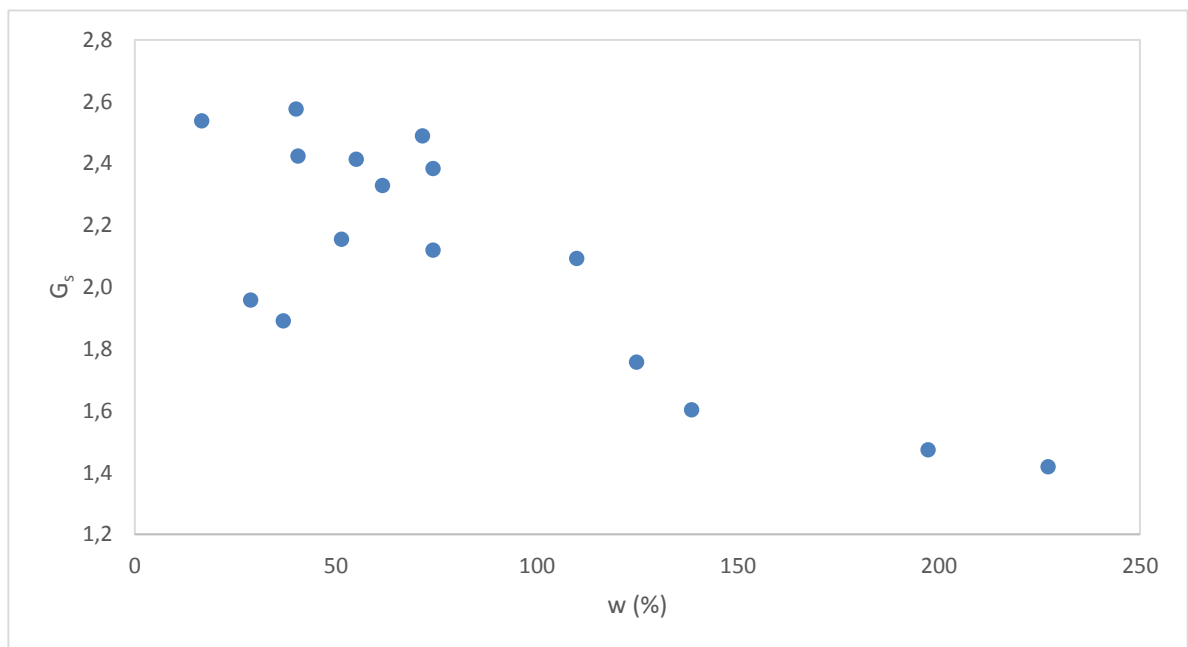


**Figura 19: relación entre  $G_s$  y contenido de materia orgánica de las muestras ensayadas.**

Los resultados de los ensayos entregan valores similares a los presentados por Huat et al. (2014) mostrados en la figura 20. Como es de esperarse los valores de  $G_s$  aumentan también a medida que se reduce el contenido de humedad del suelo puesto que se presenta una menor cantidad de materia orgánica, esta relación se muestra en la figura 21.



**Figura 20:  $G_s$  vs contenido de materia orgánica (Huat et al., 2014)**



**Figura 21: Relación entre humedad de las muestras ensayas y  $G_s$**

### 3.1.4 Límite líquido

Es necesario determinar los límites líquidos y plásticos de una muestra debido a que la plasticidad de los suelos finos tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas, como la resistencia al corte y la compresibilidad del suelo (Villalobos, 2014).

Existen dos métodos de determinación del límite líquido, el primero de ellos es con el cucharón de Casagrande, que se ha utilizado durante años como base para la clasificación de suelos. Este método puede generar un importante número de errores debido a la dificultad de realizar la ranura en ciertos suelos arenosos, la tendencia de los suelos de baja plasticidad de deslizarse por la cuchara en lugar de fluir, la sensibilidad de la técnica del operador en realizar el ensayo, etc. La combinación de todos estos factores deriva en pensar lo conflictivo del uso de este método ya que ensayos realizados sobre un mismo suelo pueden dar distintos resultados. El segundo método es el de la Caída de Cono, que es fundamentalmente más satisfactorio que la otra alternativa, debido a que la determinación del límite líquido es una medida de la resistencia de corte de un suelo blando cuya humedad se acerca al estado líquido (Leiva, 2013).

El método utilizado para determinar el límite líquido de las muestras fue mediante el ensayo de caída de cono, donde el procedimiento establecido para este ensayo se describe en la norma BS1377-90, el cual se evalúa mediante la determinación de la humedad del suelo en el punto que el cono penetra la muestra por 20 mm. El cono tiene un peso de 80 g y un ángulo de punta de 30°. Por lo general, el ensayo se repite para diferentes contenidos de agua, y se establece la relación entre la penetración y contenido de agua.

La figura 22 muestra el resultado de los ensayos realizados a la muestra número 8 obtenida de la localidad de Río Negro, donde se observa que para este suelo el límite líquido es de aproximadamente 55.5%. El resultado de los ensayos realizados al resto de las muestras ensayadas se muestra en la tabla 7.

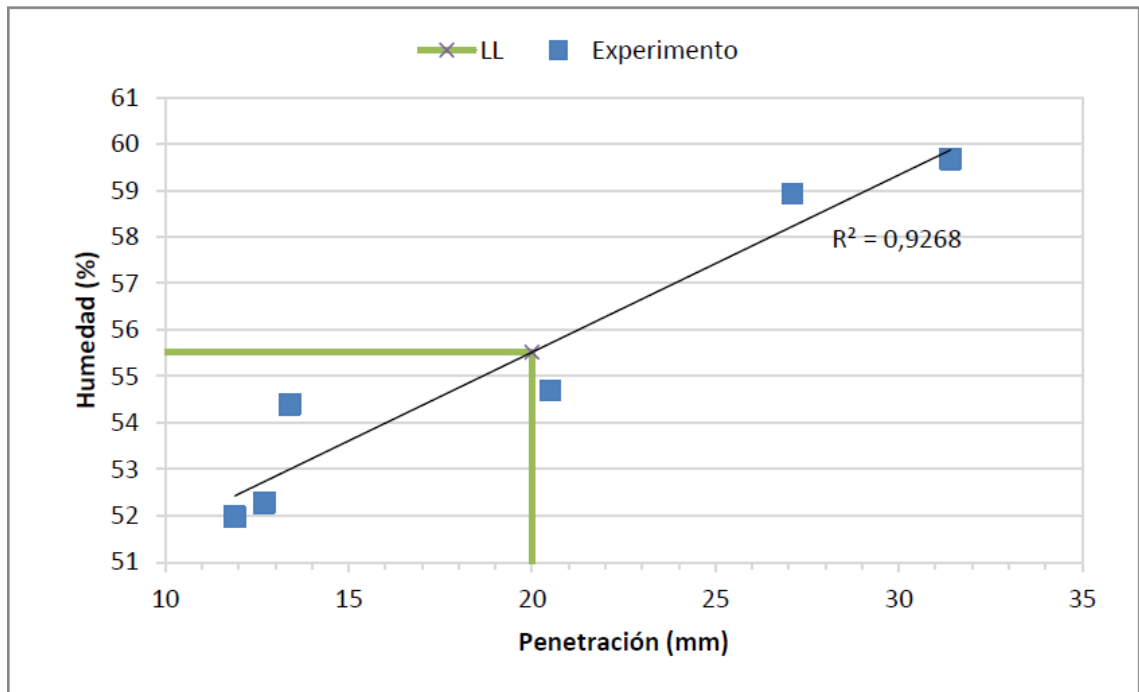


Figura 22: Ensayo de caída de cono para determinar límite líquido de la muestra N°8

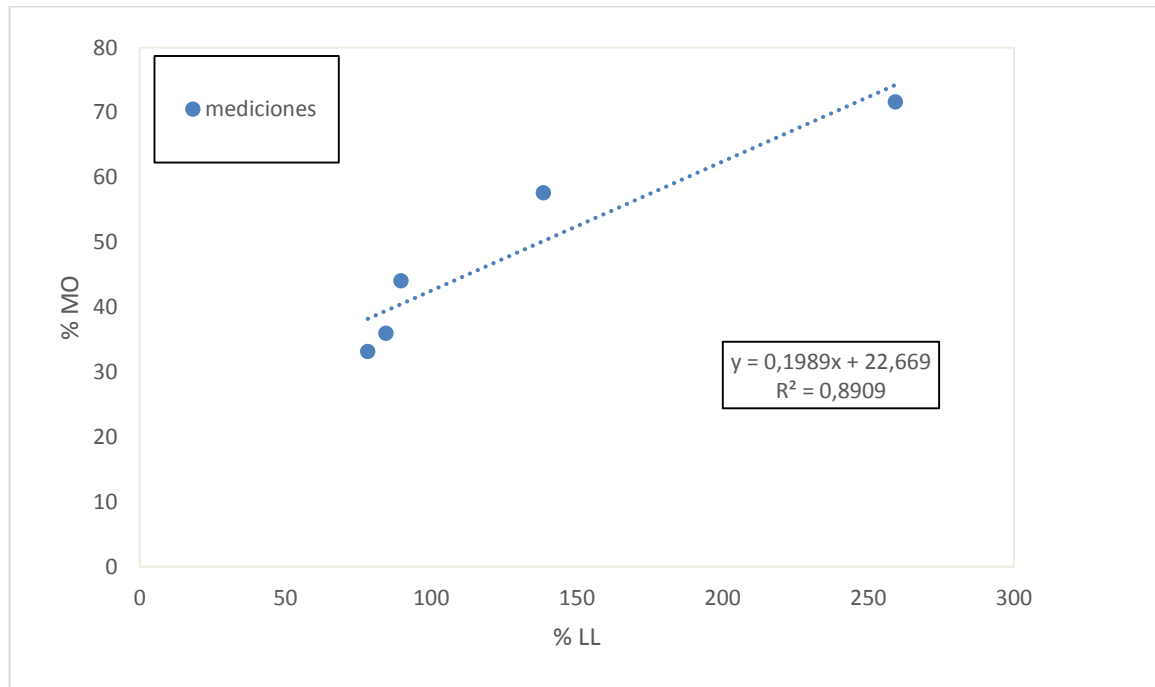
**Tabla 7: Resultados de ensayo de límite líquido a las muestras ensayadas**

muestra N°	LL (%)	R <sup>2</sup>
1	89,63	0.854
2	68,98	0.977
3	78,22	0.997
4	138,53	0.688
5	259,34	0.952
6	84,43	0.985
7	53,41	0.986
8	55,50	0.927
9	73,91	0.993
10	95,79	0.923
11	61,74	0.994
12	88,72	0.982
13	103,82	0.899
14	43,86	0.836
15	65,95	0.989
16	87,98	0.842

De los ensayos realizados se puede establecer que las muestras que mayor porcentaje de límite líquido presentan corresponden a las muestras N°4 y N°5, que también son las muestras con mayor porcentaje de materia orgánica. Se puede establecer una relación entre el valor de límite líquido de las muestras clasificadas como suelos orgánicos mostradas en la Tabla 4, para poder establecer de manera empírica el porcentaje de materia orgánica que presenta una muestra de suelo, a partir del valor de su límite líquido.

La figura 23 muestra la ecuación que relaciona ambos parámetros a partir de los resultados de los ensayos realizados solo en suelos que clasifican como orgánicos (muestras 1, 3, 4, 5 y 6), se observa que los datos ensayados se ajustan de buena manera con la ecuación presentada en la figura 25, lo cual indica que se puede determinar de forma empírica el porcentaje de

materia orgánica de un suelo, a partir del valor de límite líquido que éste presenta, por medio de la ecuación enmarcada en la figura 23.



**Figura 23: Relación entre LL y porcentaje de materia orgánica en suelos orgánicos ensayados.**

Las figuras 24 y 25 muestran el efecto de la materia orgánica en el límite líquido, donde se observa que en general, a medida que aumenta el contenido de materia orgánica, también aumenta el porcentaje de límite líquido. La figura 24 muestra las rectas que corresponden al resultado de muestras secadas a temperaturas de 60 y 110 °C, en la que se puede inferir que a una temperatura de secado de 60°C se obtienen valores de límite líquido más bajos en relación a una muestra secada a 100°C, esta figura presenta valores de ensayos realizados a muestras con contenido de materia orgánica hasta el 30%. Por otro lado, la figura 25 muestra la ecuación que relaciona estos dos parámetros, con porcentajes de ensayos de materia orgánica mayores a 50%.

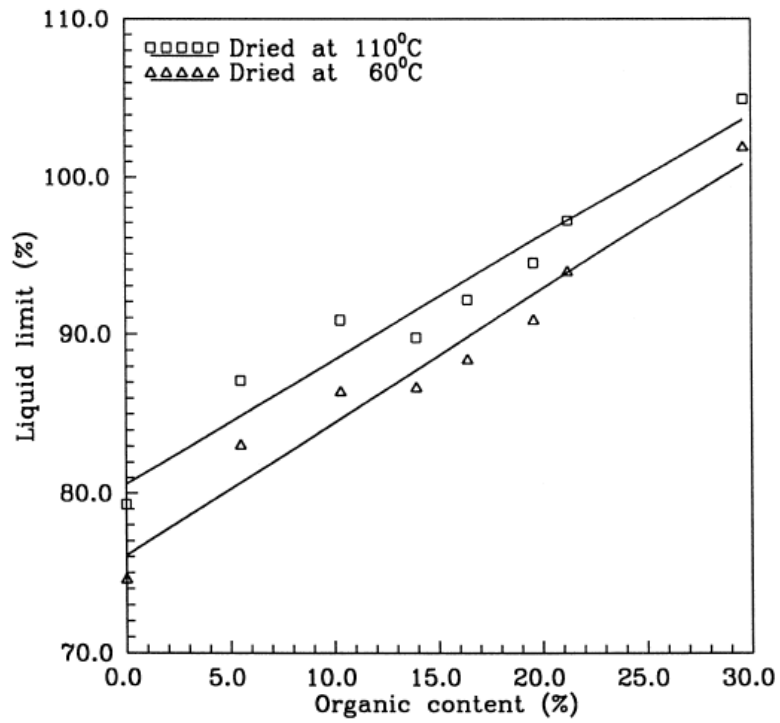


Figura 24: Límite líquido vs contenido de materia orgánica (Abdallah, 1999)

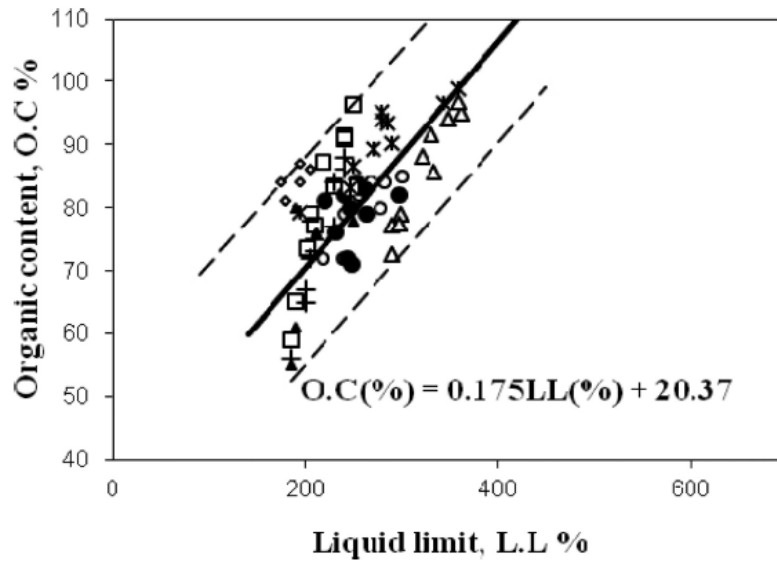


Figura 25: Contenido de materia orgánica vs límite líquido (Huat et al., 2014)

### **3.1.5 Ensayo de consolidación**

Se realizaron ensayos de consolidación edométrica siguiendo lo establecido en la norma ASTM D2435 (2011) sobre probetas inalteradas de las muestras N°4 y N°16 obtenidas en las localidades de Puerto Montt y Puerto Aysén respectivamente. La muestra N°4 fue seleccionada por contener un alto porcentaje de materia orgánica, con el objetivo de conocer el posible grado de consolidación que experimentará este material al ser sometido a una serie de incrementos de carga y descarga. Por su parte la muestra N°16 fue seleccionada debido a que fue extraída en un sector de humedales, según la indicación de las autoridades del SERVIU de esa región, la que tendría un alto porcentaje de materia orgánica, además de ser altamente compresible.

Para realizar el ensayo en ambas probetas se utilizó el equipo edométrico de consolidación unidimensional Humboldt del Laboratorio de GeoMateriales de la UCSC (figura 26). Los incrementos de carga se realizaron una vez estabilizadas las deformaciones.

Las figuras 27 y 28 muestran la secuencia de asentamientos que presentó la muestra N°4 y N°16 respectivamente en el ensayo de consolidación para cada ciclo de carga y descarga con respecto al tiempo. Como es de esperar el asentamiento aumenta en el tiempo con cada carga aplicada, y muestra hinchamiento al momento de la descarga.

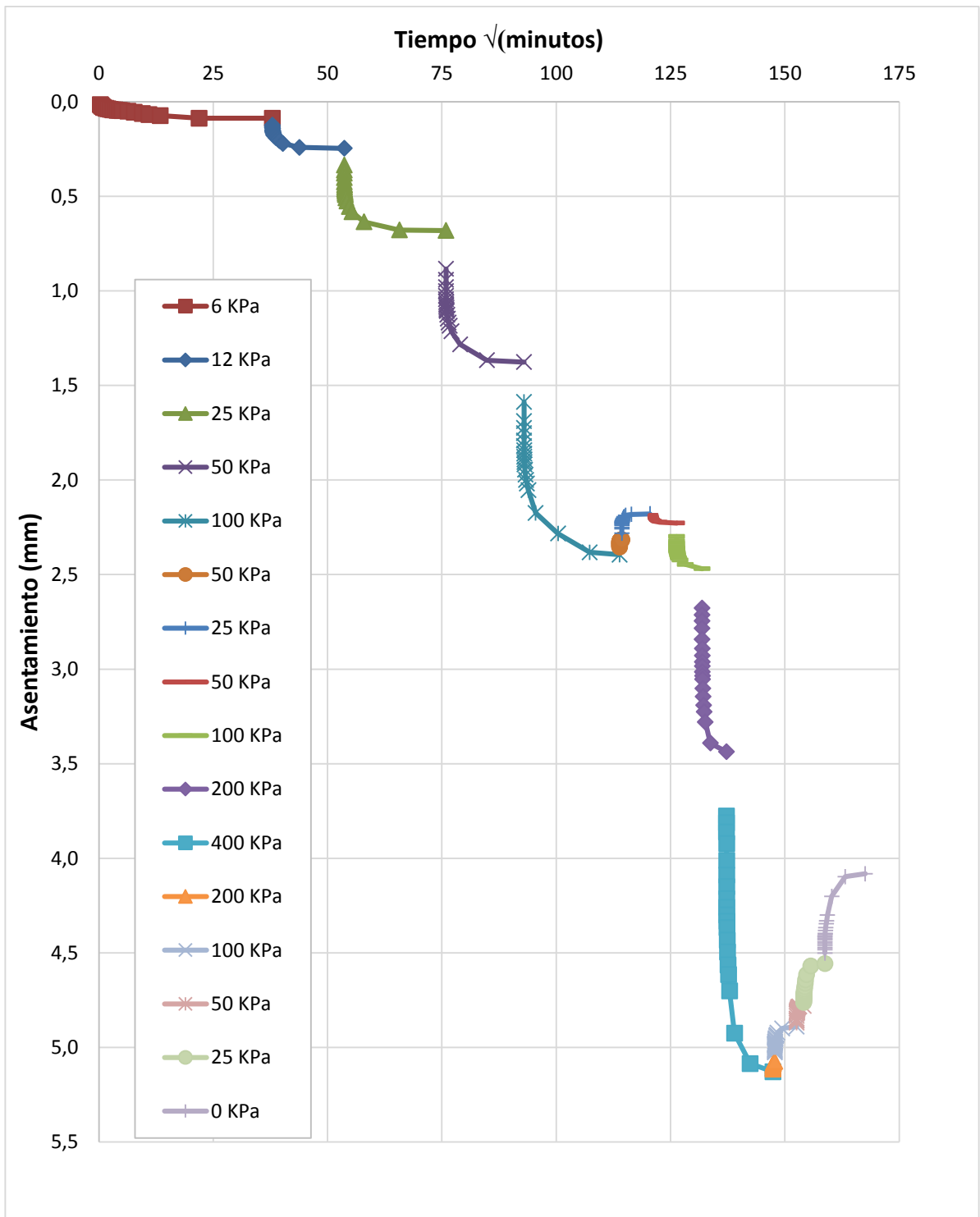


(a)

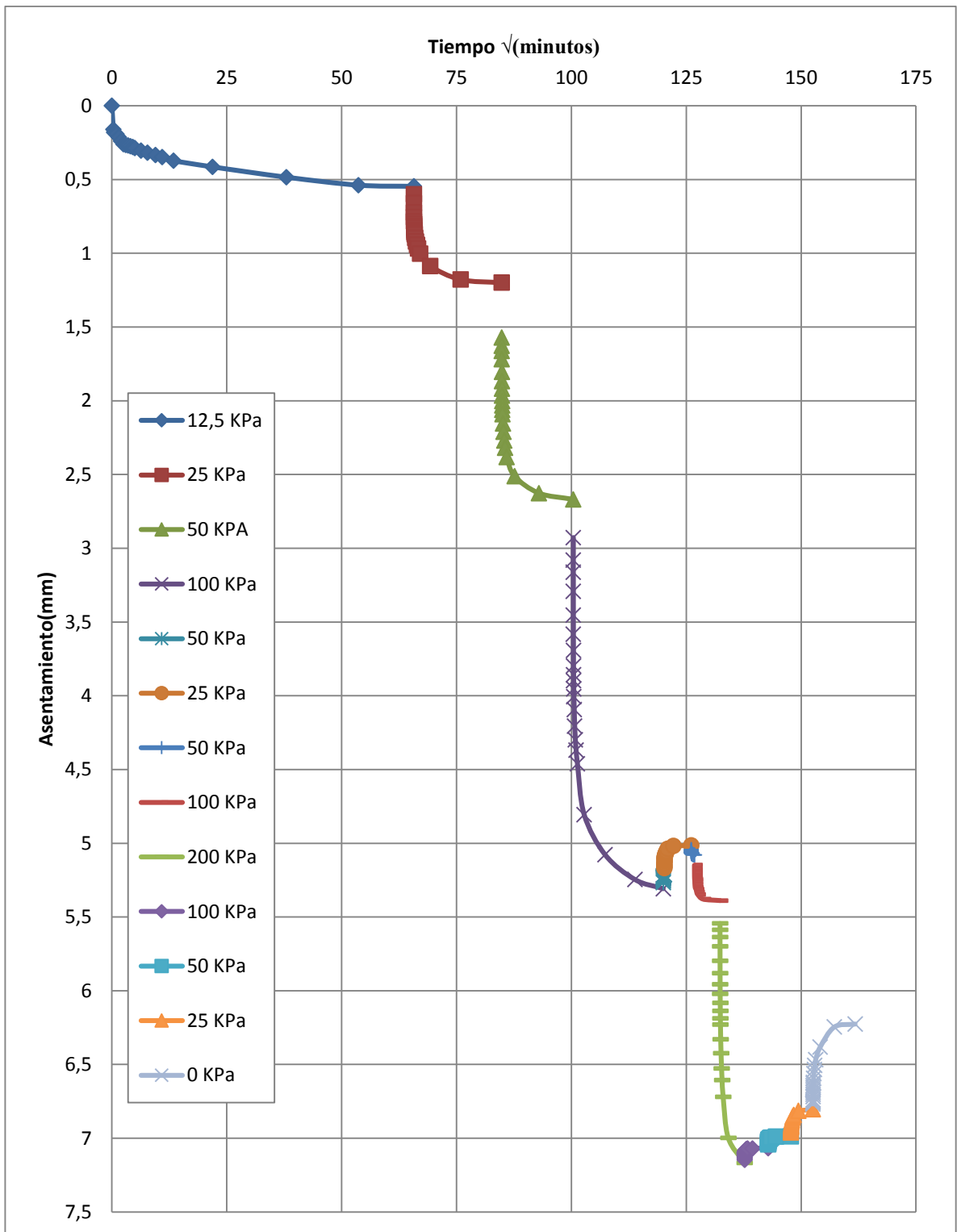


(b)

**Figura 26: Equipo edométrico de consolidación unidimensional. a) Consolidómetro; b) Piezas del consolidómetro. 1) Celda, 2) Anillo, 3) Piedra porosa, 4) Disco moldeador, 5) Bastidor rígido.**

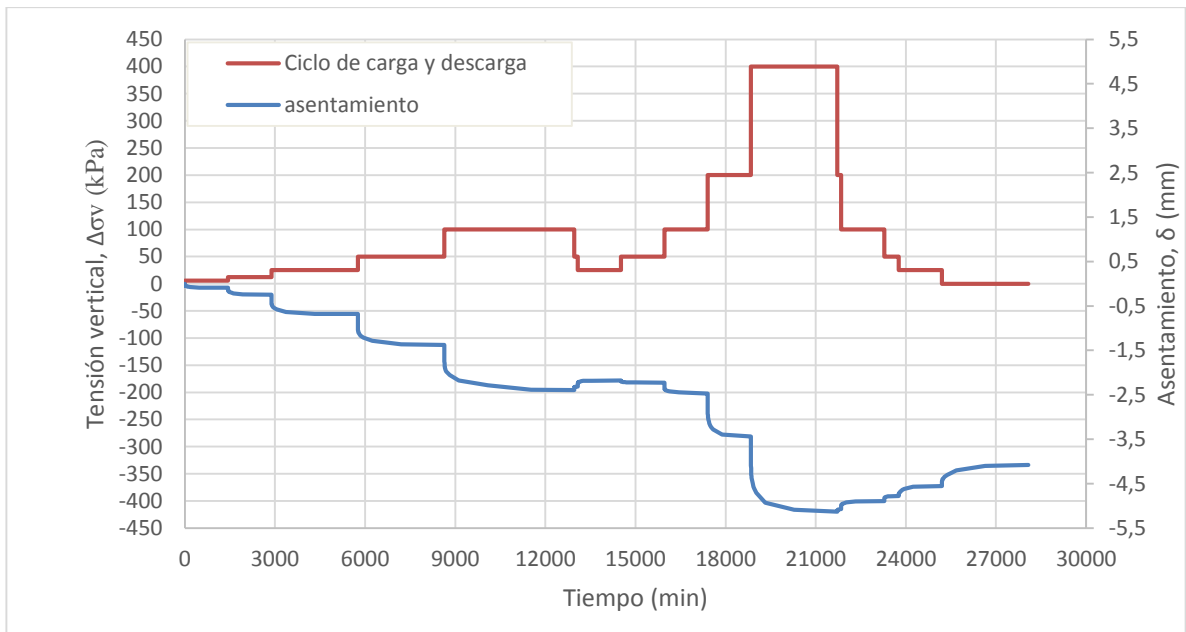


**Figura 27: Asentamiento vs  $\sqrt{\text{tiempo}}$  para cada ciclo de carga – descarga de la muestra N°4 de Puerto Montt.**



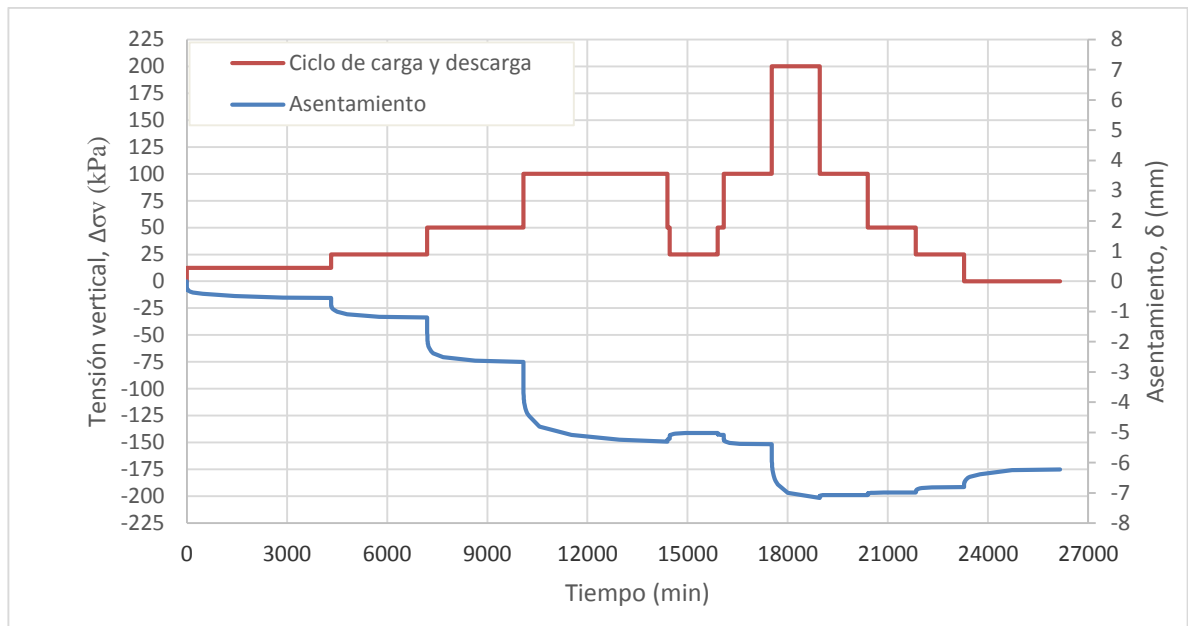
**Figura 28: Asentamiento vs  $\sqrt{\text{tiempo}}$  para cada ciclo de carga – descarga de la muestra N°16 de Aysén.**

La figura 29 muestra el ciclo de carga y descarga del ensayo de consolidación que se realizó sobre la probeta de la muestra N°4 de Puerto Montt, en el eje vertical principal se ven los incrementos de cargas proporcionados verticalmente, y en el eje secundario se muestra la deformación vertical registrada durante el tiempo de ensayo que perduró por 28080 minutos, aproximadamente 3 semanas. Se muestra en la figura que el suelo presentó un asentamiento máximo de aproximadamente 5 mm para una tensión vertical de 400 kPa.



**Figura 29: Ciclo de carga y descarga, deformación vertical vs tiempo para el ensayo de la muestra N°4**

De la misma manera, la figura 30 muestra el ciclo de carga y descarga del ensayo de consolidación de la muestra N°16 de Aysén, el tiempo consumido en esta probeta fue de 26160 minutos (3 semanas aproximadamente), donde se registró una deformación máxima de 7 mm aproximadamente para una tensión vertical de 200 KPa.

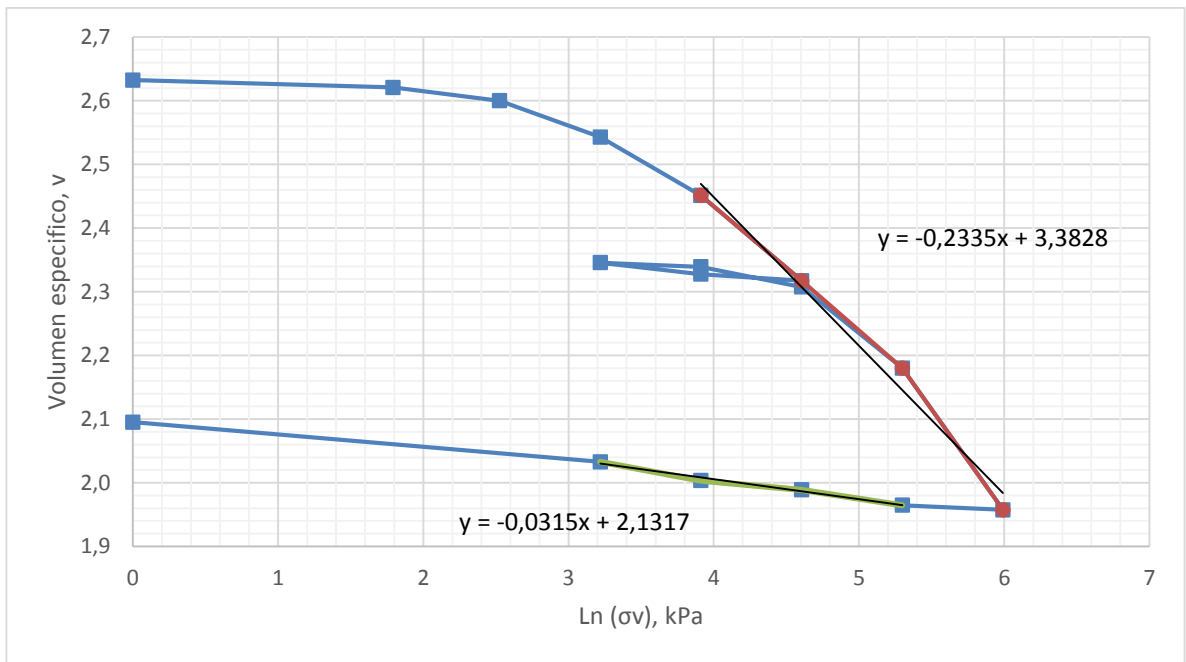


**Figura 30: Ciclo de carga y descarga, deformación vertical vs tiempo para el ensayo de la muestra N°16**

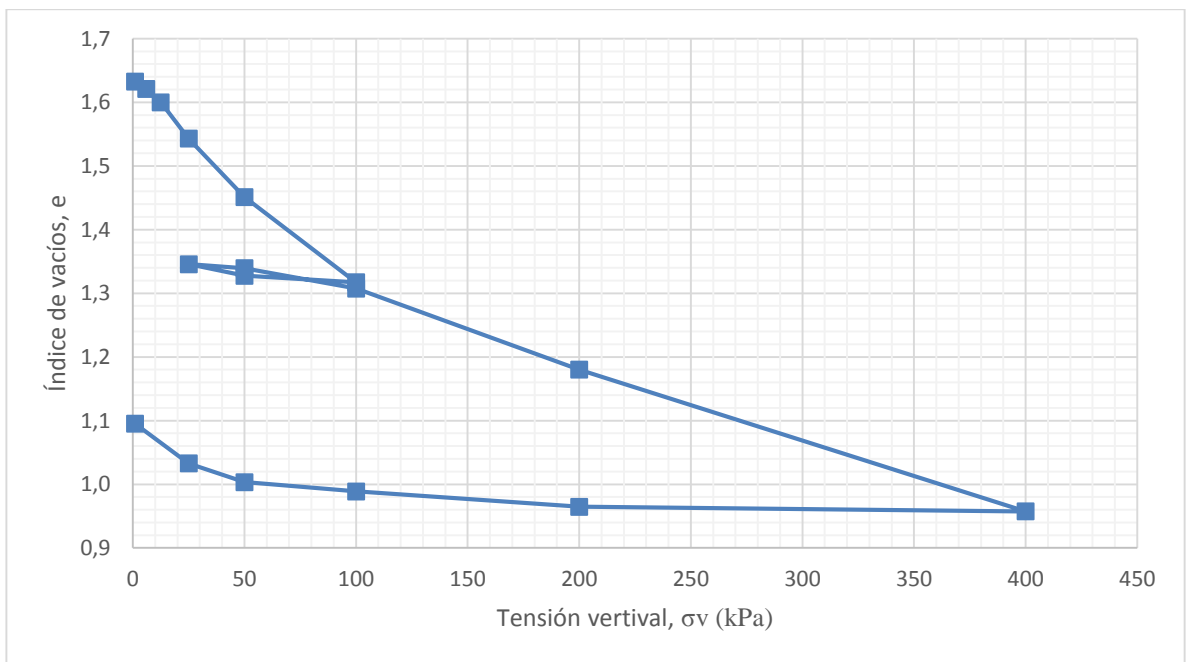
La muestra N°4 se describe como una arcilla orgánica de humedad alta y un contenido de materia orgánica de aproximadamente el 60%. En la figura 31 y 32 se presentan los resultados obtenidos del ensayo donde se observa que el suelo se comporta como una arcilla normalmente consolidada (NC). De la figura 30 se puede obtener los coeficientes de compresión ( $C_c$ ) e hinchamiento ( $C_s$ ) los que corresponden a 0,537 y 0,072 respectivamente.

La muestra N°16 de Puerto Aysén se describe como una arcilla orgánica de alta humedad natural y plasticidad, textura esponjosa, presencia de materia orgánica como raíces y trozos de madera en descomposición, olor característico orgánico y color gris a negro.

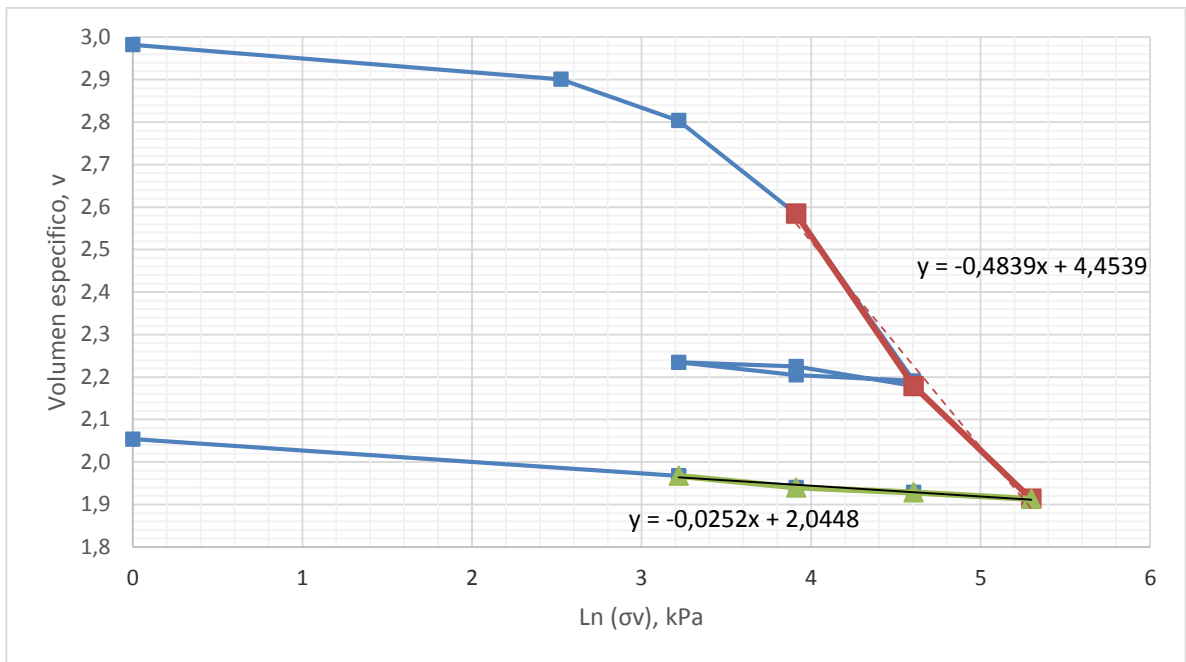
En las gráficas de las figuras 33 y 34 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de consolidación donde se observa el comportamiento del suelo como una arcilla normalmente consolidada (NC), además se tiene que  $C_c=1,112$  y  $C_s=0,058$ .



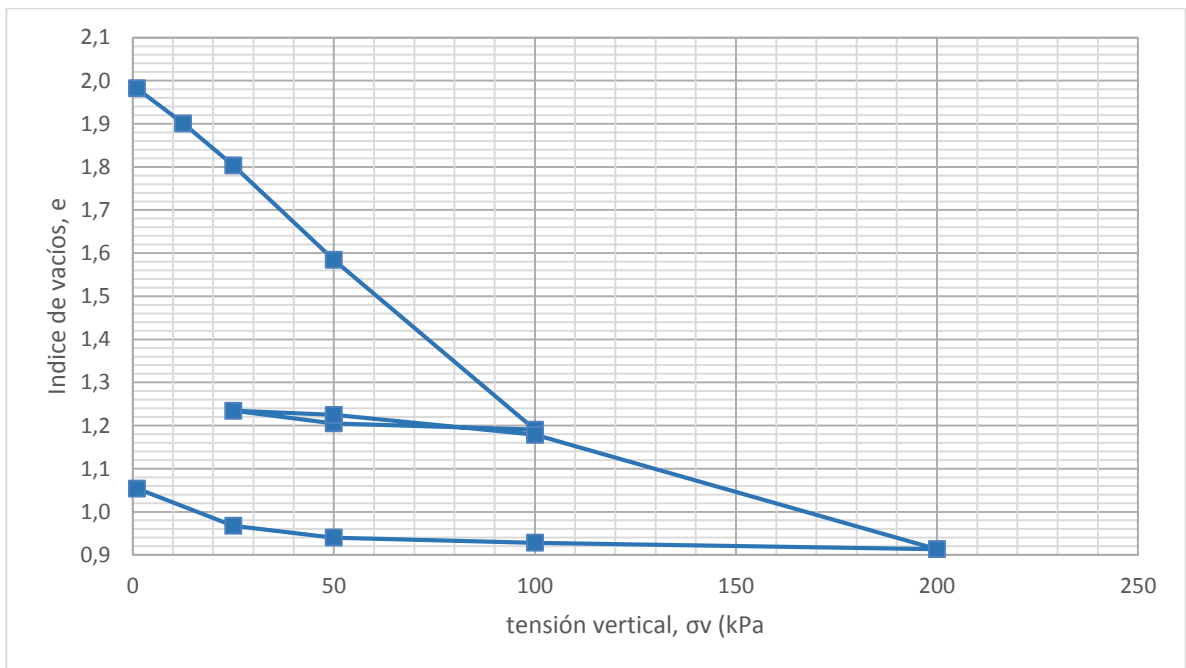
**Figura 31: Muestra N°4 Puerto Montt. Volumen específico vs tensión vertical en gráfico semilogarítmico natural.**



**Figura 32: Muestra N°4 Puerto Montt. Relación de vacíos vs tensión vertical en escala aritmética**

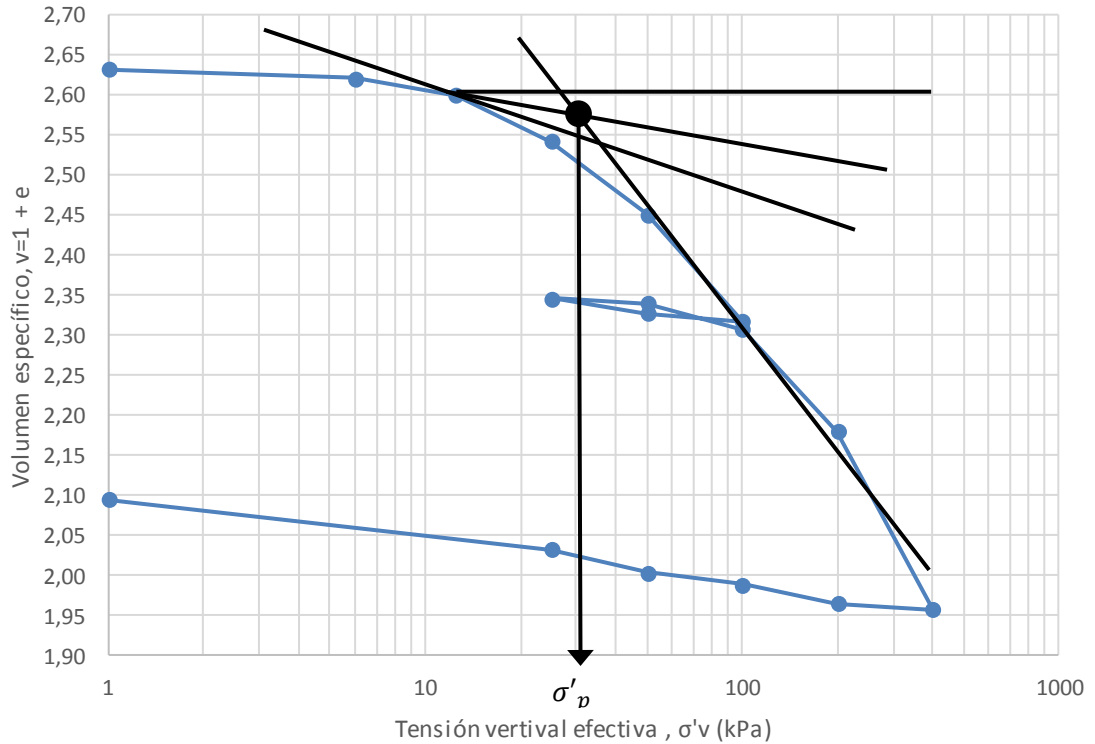


**Figura 33: Muestra N°16 Puerto Aysén. Volumen específico vs tensión vertical en gráfico semilogarítmico natural**

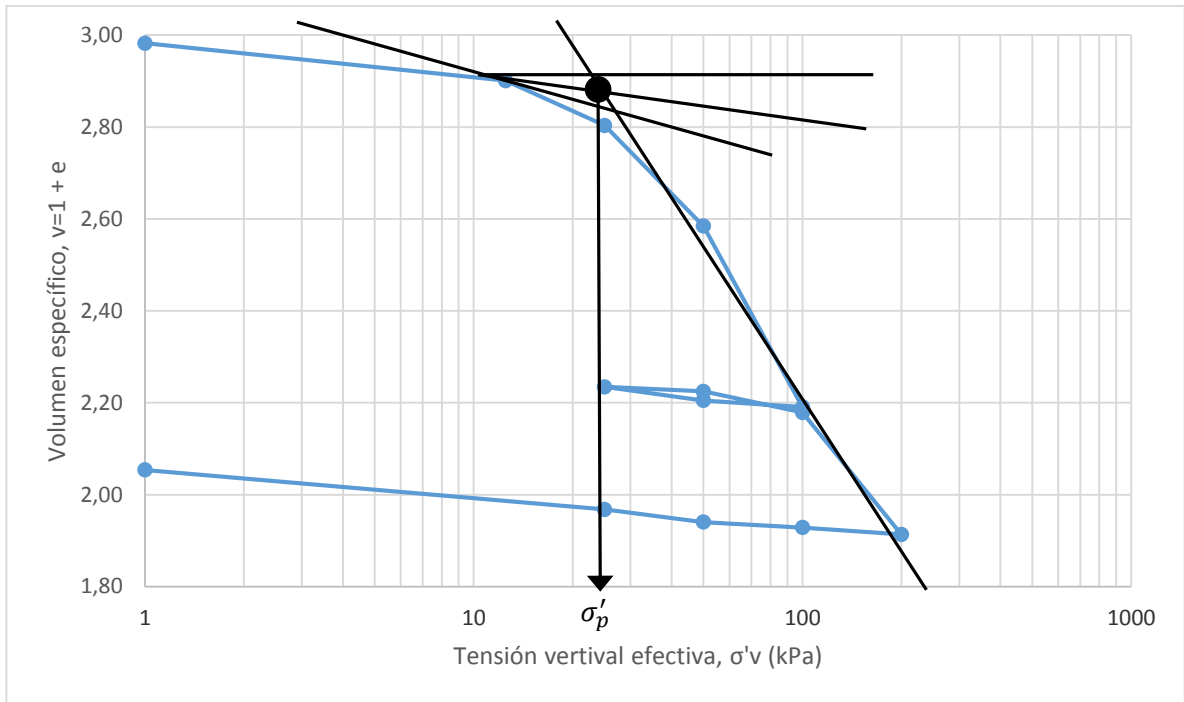


**Figura 34: Muestra N°16 Puerto Aysén. Relación de vacíos vs tensión vertical en escala aritmética**

En las gráficas de las figuras 35 y 36 se muestra la variación del volumen específico a medida que aumentan las presiones de consolidación, producto de la disipación de las presiones intersticiales de las muestras. Con ambas graficas se muestra la tensión de pre-consolidación ( $\sigma'_p$ ) mediante el método de Casagrande, obteniéndose un valor de  $\sigma'_p \approx 30$  kPa para la muestra N°4 y un valor de  $\sigma'_p \approx 25$  kPa Para la muestra N°16.



**Figura 35: Tensión de pre-consolidación muestra Puerto Montt.**



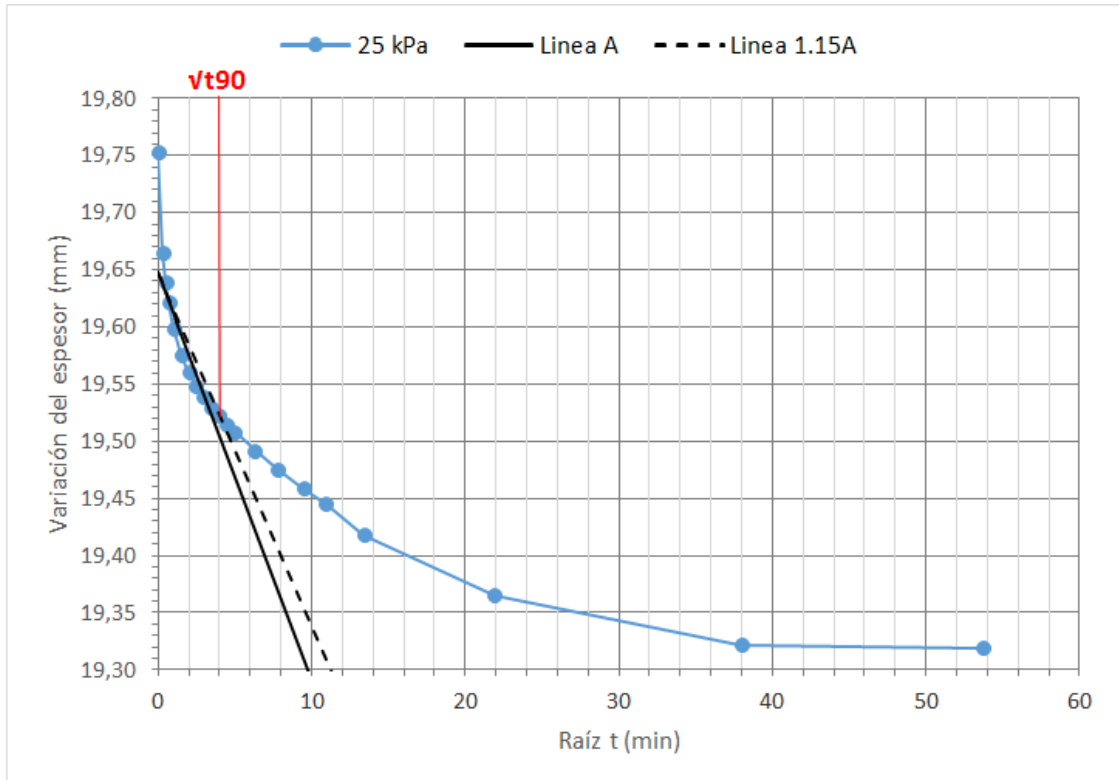
**Figura 36: Tensión de pre-consolidación muestra Aysén.**

Se determinó el índice de compresibilidad ( $C_v$ ) mediante el método de Taylor, este índice muestra la velocidad de asentamiento a un determinado esfuerzo y se trabaja mediante un gráfico de raíz del tiempo vs deformación en el eje de las abscisas y ordenadas respectivamente. A partir de la curva generada se prolonga el tramo recto de los puntos iniciales hasta interceptar el eje de las abscisas, por medio de una recta que mejor se ajuste a los datos, luego se traza otra recta ubicada 1.15 veces a la derecha de la línea recta. Esta segunda línea corta a la curva en un punto al que corresponde el 90% de consolidación primaria, luego es posible determinar el coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) mediante la ecuación 5.

$$C_v = \frac{T_v * d^2}{t_{90}} = \frac{0,848 * d^2}{t_{90}} \quad (5)$$

Donde  $T_v$  es el factor de tiempo adimensional para el 90% de la consolidación y corresponde a 0.848,  $d$  es la mitad de la altura de la probeta (en caso de doble drenaje), y  $T_{90}$  es el tiempo necesario para alcanzar el 90% de consolidación determinado gráficamente.

La figura 37 muestra el ejemplo de la gráfica utilizada para determinar  $C_v$  con el método de Taylor para una carga de 25 KPa en la muestra N°4, este procedimiento se realizó para cada carga aplicada y también en la descarga en ambas muestras ensayadas.



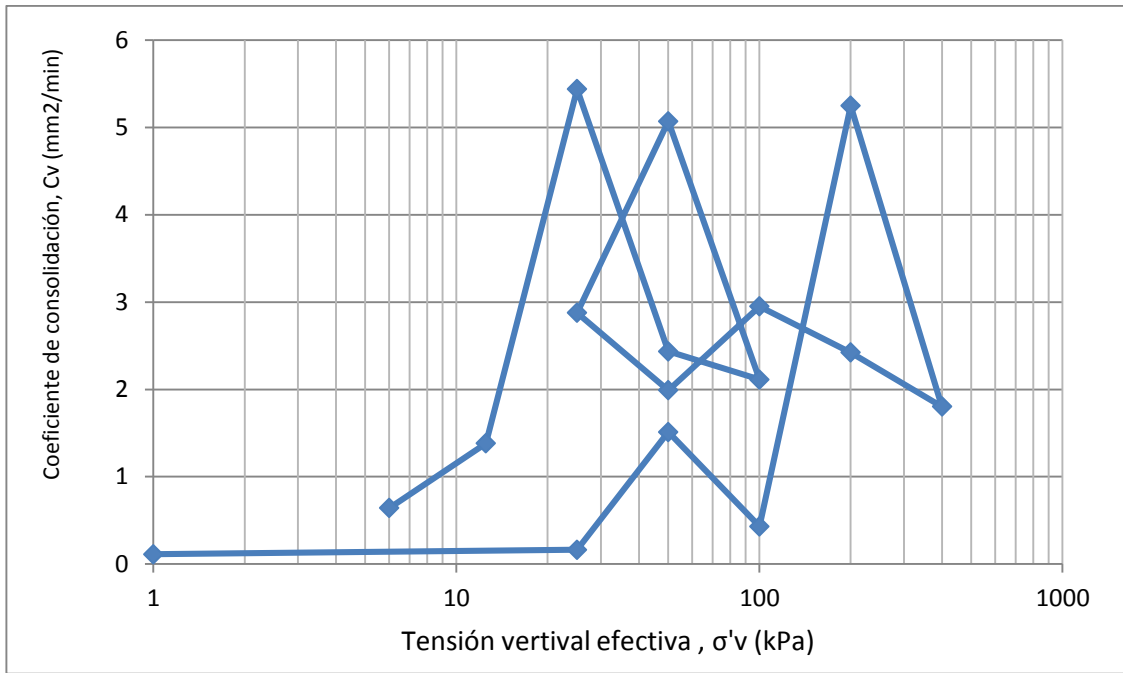
**Figura 37: Determinación de  $T_{90}$  mediante método de Taylor**

Los resultados obtenidos con el procedimiento descrito anteriormente para la obtención de  $C_v$  se muestran en el Anexo B, y sus valores se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8: Resultados de  $C_v$  por el método de Taylor para la muestra N°4**

	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\sqrt{t_{90}}$ ( $\sqrt{\text{min}}$ )	$C_v$ (mm <sup>2</sup> /min)
carga	6	11,5	0,641
	12,5	7,8	1,381
	25	3,9	5,438
	50	5,7	2,435
	100	5,9	2,112
descarga	50	3,6	5,069
	25	4,8	2,877
recarga	50	5,8	1,991
	100	4,7	2,949
	200	4,9	2,422
	400	5,1	1,802
descarga final	200	3,0	5,248
	100	10,6	0,430
	50	2,8	1,511
	25	17,6	0,163
	0	21,9	0,112

En la figura 38 se grafican los valores de  $C_v$  de la muestra N°4, donde se observa que en presiones entre 25 y 50 KPa se presentan altos valores del coeficiente de consolidación cercanos a los 6 mm<sup>2</sup>/min en el primer ciclo de carga y descarga, para luego disminuir notoriamente a valores menores a 3 mm<sup>2</sup>/min en el siguiente ciclo de recarga y descarga final.

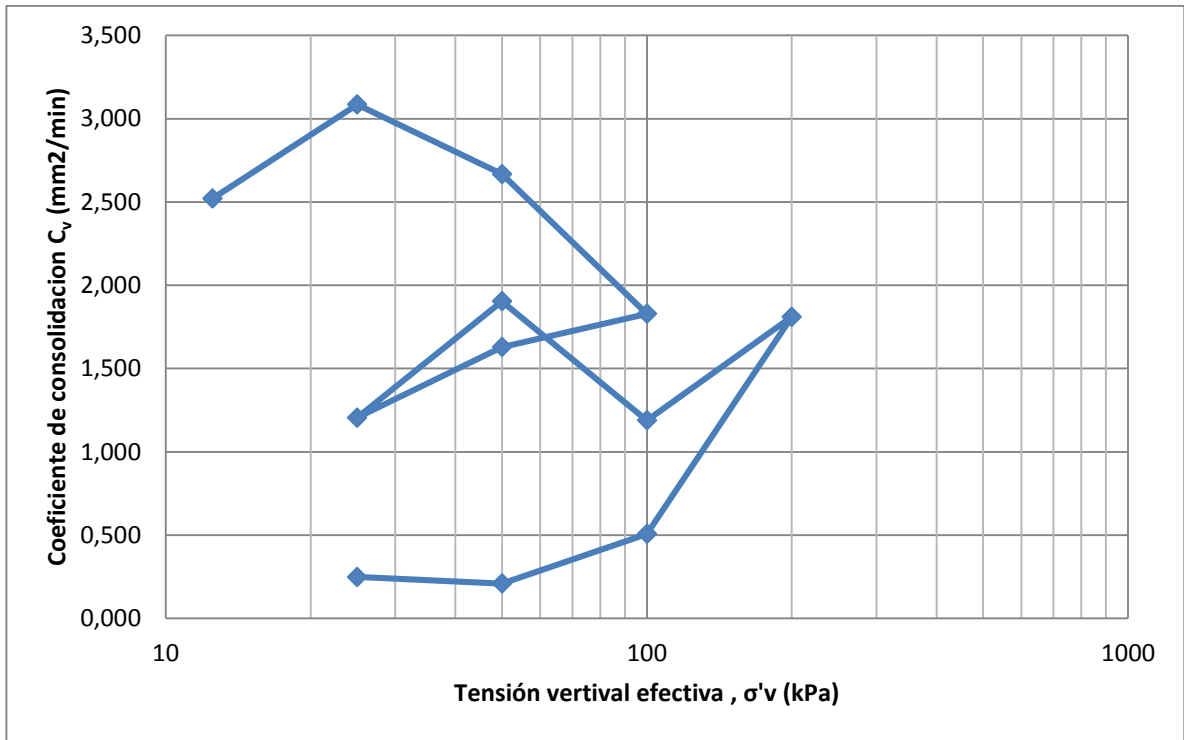


**Figura 38: Muestra N°4 Puerto Montt. Coeficientes de consolidación vs tensión vertical**

En la figura 39 el coeficiente de compresibilidad  $C_v$  muestra una tendencia a disminuir al aumentar la presión, se detalla que en las cargas menores que 50 kPa los valores no parecen afectarse y permanecen a una velocidad estables, sin embargo en la descarga estos valores tienden a disminuir a valores muy bajos menores a 1 (mm<sup>2</sup>/min).

**Tabla 9: resultados de  $C_v$  por el método de Taylor para la muestra N°16.**

	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\sqrt{t_{90}}$ ( $\sqrt{\text{min}}$ )	$C_v$ (mm <sup>2</sup> /min)
carga	12,5	5,8	2,521
	25	5,1	3,085
	50	5,3	2,668
	100	5,9	1,829
descarga	50	5,3	1,629
	25	6,2	1,206
recarga	50	5	1,904
	100	6,3	1,189
	200	5	1,810
descarga	100	8,3	0,507
final	50	13	0,210
	25	12	0,249
	0	12,8	0,225



**Figura 39: Muestra N°16 Aysén. Coeficientes de consolidación vs tensión vertical**

La relación entre el incremento de la tensión vertical efectiva y la deformación que se desarrolla en cada incremento de carga, permite obtener la compresibilidad del suelo a través del parámetro denominado módulo edométrico ( $E_{ed}$ ). Asumir un suelo como un material con un solo módulo edométrico es un error importante, pues se debe considerar la trayectoria de  $E_{ed}$  por cada tramo de tensiones. A medida que la tensión vertical aumenta,  $E_{ed}$  es cada vez mayor, por lo tanto el suelo se torna cada vez más rígido.

El módulo edométrico fue calculado para cada estado de carga-descarga en ambos ensayos, las tablas 10 y 11 muestran los resultados y los parámetros con los que fue calculado.

**Tabla 10: Parámetros de cálculo y módulo edométrico para ensayo de la muestra N°4.**

Intervalo [kPa]	Carga					Descarga	
	0 - 6	6 - 12.5	12.5 - 25	25 - 50	50 - 100	100 - 50	50 - 25
$\Delta\sigma_v$ [kPa]	6	6,5	12,5	25	50	-50	-25
$h_0$ [mm]	20	19,91	19,75	19,32	18,62	17,60	17,68
$\Delta h$ [mm]	0,088	0,159	0,434	0,696	1,019	-0,079	-0,137
$\Delta\varepsilon$	0,004	0,008	0,022	0,036	0,055	-0,004	-0,008
$e$	1,633	1,621	1,600	1,543	1,451	1,317	1,328
$v$	2,633	2,621	2,600	2,543	2,451	2,317	2,328
$\varepsilon_v$ (%)	0,44%	0,80%	2,20%	3,60%	5,47%	-0,45%	-0,78%
$E_{ed}$ [kPa]	1369	815	568	694	914	11179	3223
$\lambda$	-0,0064	-0,0285	-0,082	-0,1322	-0,1934	-	-
$k$	-	-	-	-	-	-0,015	-0,026

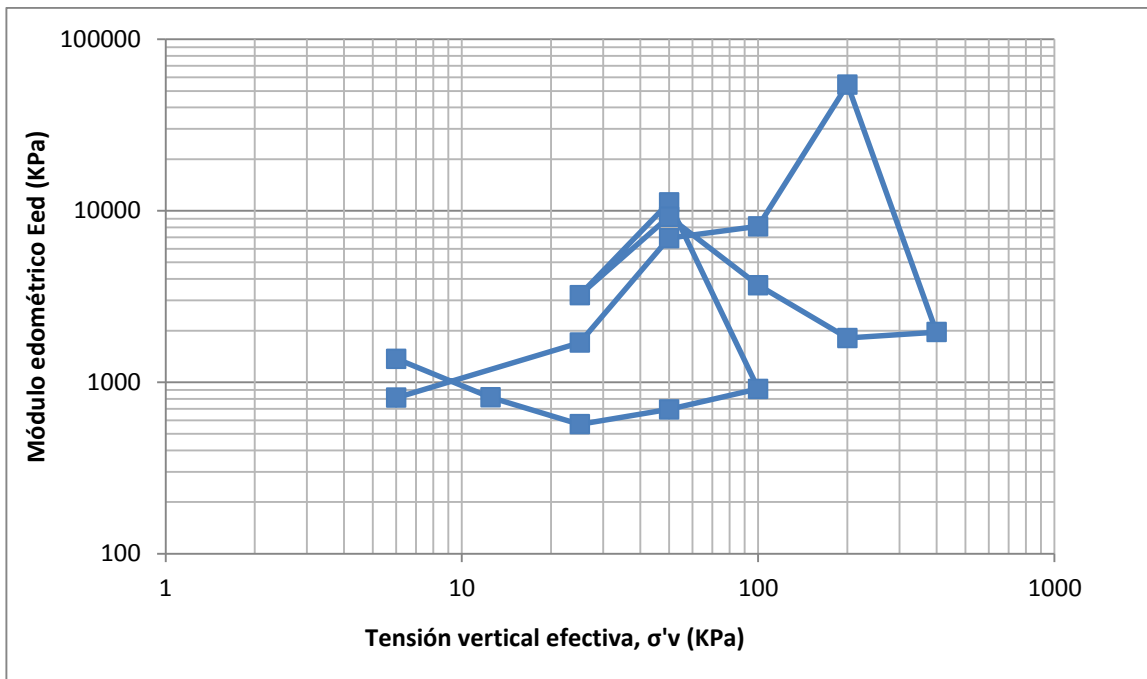
Intervalo [kPa]	Recarga				Descarga				
	25 - 50	50 - 100	100 - 200	200 - 400	400 - 200	200 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 0
$\Delta\sigma_v$ [kPa]	25	50	100	200	-200	-100	-50	-25	-25
$h_0$ [mm]	17,82	17,77	17,53	16,56	14,87	14,93	15,11	15,22	15,44
$\Delta h$ [mm]	0,048	0,241	0,968	1,692	-0,055	-0,184	-0,109	-0,224	-0,475
$\Delta\varepsilon$	0,003	0,014	0,055	0,102	-0,004	-0,012	-0,007	-0,015	-0,031
$e$	1,346	1,339	1,308	1,180	0,958	0,965	0,989	1,003	1,033
$v$	2,346	2,339	2,308	2,180	1,958	1,965	1,989	2,003	2,033
$\varepsilon_v$ (%)	0,27%	1,36%	5,52%	10,21%	-0,37%	-1,23%	-0,72%	-1,47%	-3,08%
$E_{ed}$ [kPa]	9232	3683	1812	1958	54465	8106	6917	1702	813
$\lambda$	-0,009	-0,046	-0,184	-0,321	-	-	-	-	-
$k$	-	-	-	-	-0,01	-0,035	-0,021	-0,042	-0,019

**Tabla 11: Parámetros de cálculo y módulo edométrico para ensayo de la muestra N°16**

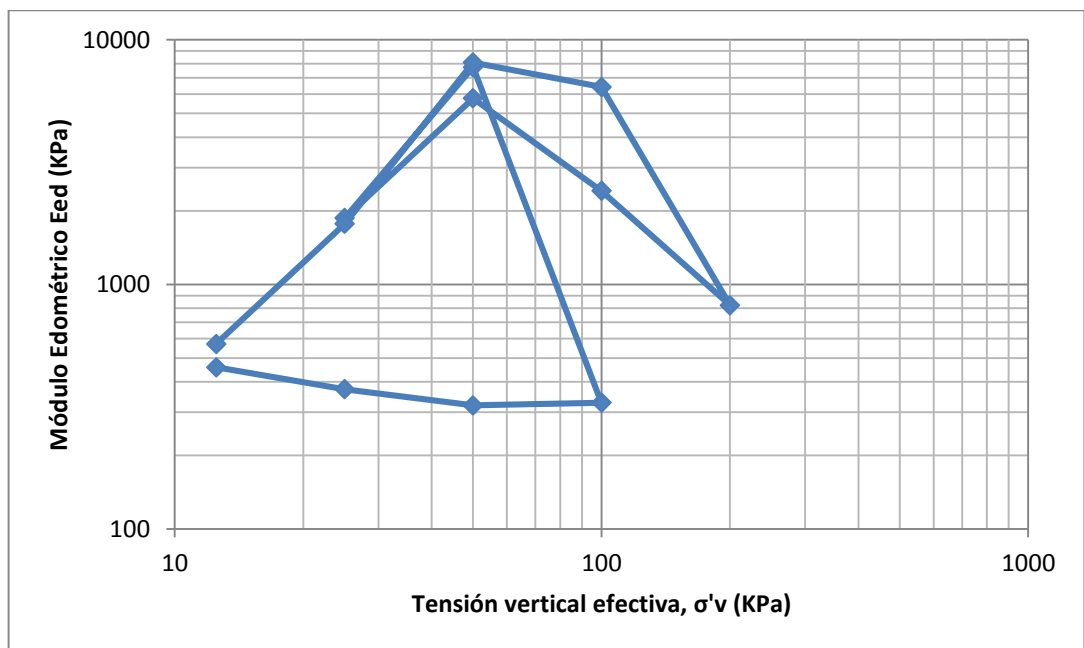
Intervalo [kPa]	Carga				Descarga	
	0 - 12,5	12,5 - 25	25 - 50	50 - 100	100 - 50	50 - 25
$\Delta\sigma_v$ [kPa]	12,5	12,5	25	50	-50	-25
$h_0$ [mm]	20	19,45	18,80	17,33	14,69	14,79
$\Delta h$ [mm]	0,546	0,653	1,470	2,639	-0,095	-0,198
$\Delta\varepsilon$	0,027	0,034	0,078	0,152	-0,006	-0,013
$e$	1,982	1,901	1,803	1,584	1,191	1,205
$v$	2,982	2,901	2,803	2,584	2,191	2,205
$\varepsilon_v$ (%)	2,73%	3,36%	7,82%	15,23%	-0,65%	-1,34%
$E_{ed}$ [kPa]	458	372	320	328	7733	1867
$\lambda$	-0,032	-0,1405	-0,3162	-0,5677	-	-
$k$	-	-	-	-	-0,0204	-0,0426

Intervalo [kPa]	Recarga			Descarga			
	25 - 50	50 - 100	100 - 200	200 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 0
$\Delta\sigma_v$ [kPa]	25	50	100	-50	-50	-25	-25
$h_0$ [mm]	14,99	14,92	14,61	12,83	12,93	13,01	13,20
$\Delta h$ [mm]	0,065	0,309	1,779	-0,100	-0,080	-0,184	-0,578
$\Delta\varepsilon$	0,004	0,021	0,122	-0,008	-0,006	-0,014	-0,044
$e$	1,234	1,225	1,179	0,913	0,928	0,940	0,968
$v$	2,234	2,225	2,179	1,913	1,928	1,940	1,968
$\varepsilon_v$ (%)	0,43%	2,07%	12,18%	-0,78%	-0,62%	-1,41%	-4,38%
$E_{ed}$ [kPa]	5763	2414	821	6416	8083	1768	571
$\lambda$	-0,014	-0,0665	-0,3827	-	-	-	-
$k$	-	-	-	-0,0215	-0,0172	-0,0396	-0,0268

Con los resultados obtenidos fue posible graficar la variación del módulo edométrico con la aplicación de la tensión vertical cuyos resultados se muestran en las figuras 40 y 41 para las muestras N°4 y N°16 respectivamente, en donde se ve claramente que a medida que la tensión vertical aumenta  $E_{ed}$  es cada vez mayor, lo que se traduce a que el suelo es cada vez más rígido.



**Figura 40: Muestra N°4 Puerto Montt. Coeficientes de consolidación vs tensión vertical.**



**Figura 41: Muestra N°16 Puerto Aysén. Coeficientes de consolidación vs tensión vertical.**

### 3.1.6 Veleta de corte

La veleta de corte es un instrumento utilizado para obtener la resistencia al corte no drenada del suelo ( $S_u$ ), consiste en determinar la fuerza de torsión necesaria para lograr que la superficie de suelo falle, obteniendo la resistencia al corte de dicha superficie. Se utiliza para suelos cohesivos (arcillosos, particularmente de arcillas blandas), tiene la ventaja de poder ser aplicado directamente en terreno, lo que evita el transporte de muestras al laboratorio.

Las veletas están conformadas por cuatro aspas perpendiculares entre sí (figura 42), en que la altura de las aspas es el doble del diámetro. El equipo posee tres veletas de distintas dimensiones, las que dependiendo de su tamaño, miden distintos rangos de resistencia al corte. Para el cálculo de  $S_u$  se asume que tanto el manto cilíndrico como los extremos de las aspas (superior e inferior) generan resistencia. Al respecto si bien considerar la totalidad del área superior es discutible, esta hipótesis es conservadora en el cálculo de  $S_u$  respecto a no considerarla. En caso de utilizar el torque máximo del ensayo, se obtendrá el valor de  $S_u$  máximo. Asimismo, si se utiliza el torque residual o remodelado, se obtendrá el correspondiente valor residual de  $S_u$  (Olguín & Ortúzar, 2015). La Tabla 12 muestra las principales características de este instrumento.



**Figura 42: Veleta de corte (www.controls-group.com)**

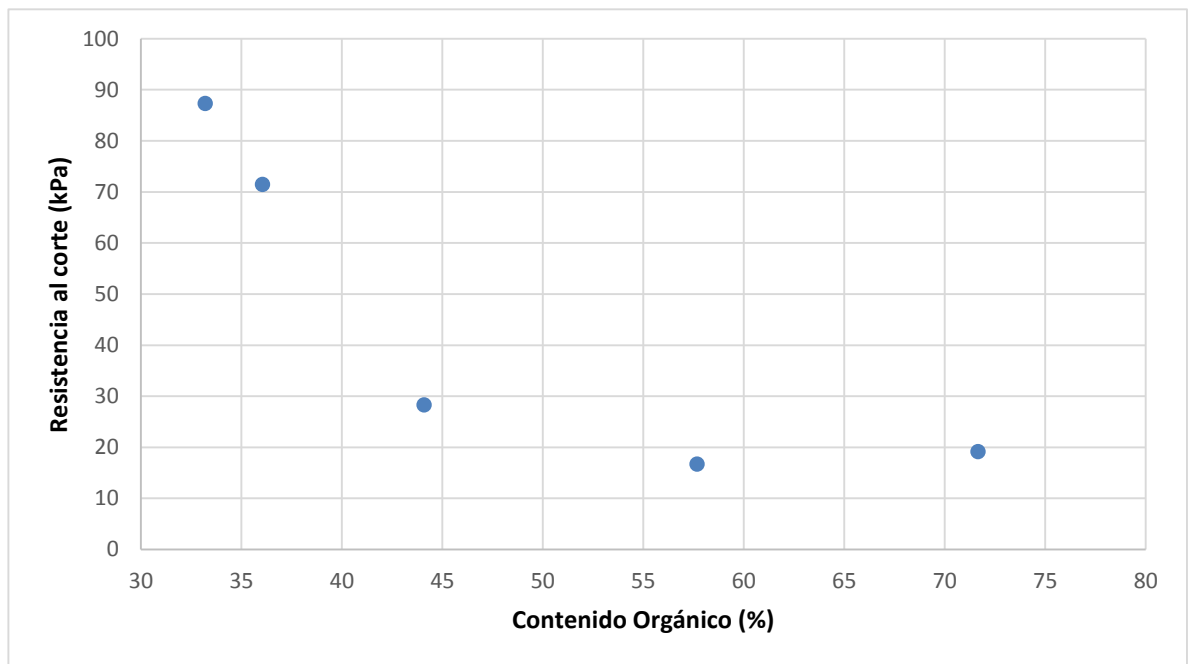
**Tabla 12: Dimensiones y rango de mediciones de la veleta de corte**

Veleta	Dimensiones (altura x diámetro) (mm)	Medición (kPa)
Pequeña	32 x 16	240
Mediana	40 x 20	120
Grande	50.8 x 25.4	60

La tabla 13 muestra las mediciones de resistencia al corte no drenada máxima del suelo, en las muestras con porcentaje de materia orgánica que clasifican al suelo como orgánico. Se observa que las muestras 4 y 5 presentan los valores más altos de contenido orgánico y por consecuencia los valores más bajos de resistencia al corte.

**Tabla 13: Resistencia al corte de suelos orgánicos**

Muestra	Humedad	Contenido orgánico	Límite líquido	Resistencia al corte
Nº	(%)	(%)	(%)	Su (kPa)
1	124,8	44,09	89,63	28,3
3	109,9	33,19	78,22	87,3
4	197,3	57,68	138,53	16,7
5	227,1	71,66	259,34	19,1
6	74,2	36,04	84,43	71,5



**Figura 43: Resistencia al corte máxima medido con veleta vs. Contenido orgánico**

La figura 43 muestra de manera gráfica el comportamiento de la resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ), con respecto al contenido de materia orgánica del suelo, donde se observa que a medida que aumenta el porcentaje de materia orgánica, se reducen los valores de resistencia al corte.

Mitchell (1993), indica que el efecto de la materia orgánica en el módulo edométrico del suelo (rigidez) depende en gran medida de si la materia orgánica está descompuesta, o se presenta en el suelo por medio de fibras vegetales, que pueden actuar como elementos de refuerzo. Él investigó el efecto de la materia orgánica en el suelo, donde concluyó que a medida que decrecen los valores de humedad o materia orgánica, se presenta un comportamiento ascendente de la resistencia al corte no drenada.

### **3.2 Análisis y discusión de los resultados**

Se encontró que los suelos orgánicos son demasiado susceptibles a la temperatura de secado, pues se obtuvieron resultados de mediciones de humedad en un horno de 110°C que se vieron alterados, entregando valores demasiado altos comparados con los obtenidos a una temperatura inferior a 60°C, esto se debe a que parte de la materia orgánica presente en la muestra se calcina al ser puesta en el horno de 110°C, por lo tanto la muestra no solo pierde masa de agua, sino también masa del componente sólido del suelo, en este caso compuesta por la materia orgánica. Se descartaron los valores obtenidos mediante secado al horno de 110°C y se trabajó solamente con muestras secadas en horno con temperaturas inferior a 60°C.

En cuanto al comportamiento del coeficiente de consolidación  $C_v$ , en general se tiene que para incrementos de carga menores al esfuerzo de pre-consolidación ( $\sigma'_{pc}$ ), la consolidación ocurre relativamente rápida y los valores de  $C_v$  son altos, sin embargo una vez que se supera este esfuerzo, se aprecia un rápido decrecimiento de  $C_v$  alcanzando valores muy bajos. En ambas muestras se observa que superado el esfuerzo de 30 kPa los valores de  $C_v$  presentan una disminución, por lo que se puede inferir que estos suelos han sido precargados históricamente a este nivel de presión.

Se debe tener en cuenta que estos valores de  $C_v$  pudiesen estar sobredimensionados, ya sea por algún grado de perturbación en la toma de muestras o en la ejecución del ensayo, o por el método utilizado para el cálculo de este parámetro, donde quizás sea más apropiado utilizar el método de Casagrande para obtener el valor de  $C_v$ .

En ambas muestras se observó que a partir de la aplicación de la carga de 50 kPa, se presentaron grandes asentamientos en el suelo, puesto que a esta presión ya se superaban los

esfuerzos de pre-consolidación entrando a la etapa normalmente consolidada. También se observó que una vez aplicada la tensión vertical de 50 kPa, en ambas muestras se presentaron asentamientos constantes, que demandaron una gran cantidad de tiempo en estabilizarse.

En las mediciones de resistencia al corte no drenada máxima de los suelos se puede observar una clara disminución de este parámetro a medida que aumenta el contenido de materia orgánica, esto se debe principalmente a que la resistencia al corte en suelos orgánicos depende del grado de humificación del suelo (Proceso de transformación de materia orgánica en humus), cuanto mayor sea el grado de humificación del suelo, menor será la resistencia al corte del suelo. Otros factores que influyen son el contenido de humedad natural y el contenido mineral del suelo, a mayor contenido de humedad menor será la resistencia al corte; y cuanto mayor sea el contenido de minerales, más alta será la resistencia al corte del suelo (Huat et al., 2014).

## 4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS ORGÁNICOS

---

En este capítulo se presenta la simulación numérica de suelos orgánicos en problemas de fundaciones. El trabajo de análisis y modelación numérica fue desarrollado en colaboración con el Dr. William Fuentes, quien aportó con el uso del modelo constitutivo ISA-Clay (Fuentes et al., 2015), para simular el comportamiento mecánico del suelo orgánico a partir de los parámetros obtenidos en la realización de los ensayos, y la información recopilada de suelos orgánicos en la zona de estudio.

Se consideran una simulación con elementos finitos de una viga de fundación de una vivienda, donde a partir del análisis de elementos finitos se simulan varios casos, uno de ellos analizando el comportamiento de una viga apoyada sobre una columna de grava. Los resultados indican como los asentamientos de esta estructura disminuyen drásticamente al apoyar la viga de fundación sobre una columna de grava. También se incluye unas recomendaciones para la selección del modelo constitutivo que simula el suelo orgánico. También se considera dos tipos de perfiles estratigráficos, uno con estrato de suelo orgánico de manera homogénea y otro con suelo orgánico sobre arena.

### 4.1 Definiciones y notación

En la modelación de problemas geotécnicos con elementos finitos se denominan *análisis estáticos* aquellos que solucionan la ecuación de balance de momento lineal sin considerar la aceleración del material. Así mismo, se denominan análisis *quasi-estático* si además del momento lineal, se resuelve de manera acoplada el balance de masa para simular el comportamiento de las presiones de poros en condiciones saturadas del material. Con este acople se puede simular en los suelos saturados los excesos de presiones de poros debido al efecto de consolidación y su disipación según las condiciones de contorno y otros parámetros. Por último, se denominan *análisis dinámicos* cuando no se ignoran las aceleraciones del material. Si no hay acople entre los desplazamientos y las presiones de poros, entonces se ignoran los efectos de consolidación en el análisis.

Las variables escalares se representan con letras cursivas (por ejemplo  $a, b$ ), vectores con minúscula negrilla ( $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ ) y tensores de segundo y cuarto orden con negrilla mayúscula (por ejemplo  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ ). El doble punto entre tensores, por ejemplo  $\mathbf{A}:\mathbf{B}$  denota doble contracción. El tensor de tensiones efectivas se denota con  $\boldsymbol{\sigma}$  y el tensor de deformaciones con  $\boldsymbol{\varepsilon}$ . El tensor de tensiones totales del suelo se denota con  $\boldsymbol{\sigma}^{\text{tot}}$ . Componentes en compresión del tensor de tensiones o de deformación son negativos. La relación de vacíos se denota con  $e$ . Un asterisco de superíndice extrae el componente desviador de un tensor (por ejemplo  $\mathbf{A}^*, \boldsymbol{\sigma}^*$ ). El símbolo  $\|\cdot\|$  extrae la norma euclidiana del tensor (por ejemplo  $\|\boldsymbol{\sigma}\|$ ). Una flecha por encima de un tensor, por ejemplo  $\vec{\mathbf{A}}$ , significa normalización del tensor  $\vec{\mathbf{A}} = \mathbf{A}/\|\mathbf{A}\|$ . La presión media se denota con  $p = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma})/3$ , donde el operador “tr” extrae la traza de un tensor. La tensión desviadora se denota con  $q = \sqrt{3/2}\|\boldsymbol{\sigma}^*\|$ .

## 4.2 Recomendaciones para el modelo del material con elementos finitos

En esta sección se presentan las recomendaciones para simular el material orgánico con elementos finitos. Para tal, se necesita seleccionar un modelo constitutivo que relaciona las tensiones con las deformaciones. Estos modelos constitutivos están disponibles en las librerías del software de elementos finitos. Ejemplos de estos son modelos Mohr-Coulomb, modelos elásticos, modelo Modified Cam-Clay, etc. Con estos modelos se simulan los materiales presentes en el problema.

Para problemas en elementos finitos que incluyan suelos orgánicos bajo análisis estáticos o quasi-estáticos se recomienda simular este material con modelos constitutivos que presenten las siguientes características:

- 1) En compresión isotrópica o edométrica, el modelo constitutivo selecto debe tener en cuenta algunas relaciones básicas que simulan la compresibilidad de las arcillas. En general, se acepta que la rigidez de la arcilla depende de la presión media (efectiva)  $p$  del material. El modelo debe distinguir entre la rigidez de carga y de descarga. Algunas alternativas para compresión isotrópica o edométrica se presentan a continuación:

- El módulo de Young  $E$  es proporcional a la presión  $p$  elevada a un exponente  $n$ ,  $E \sim p^n$ . Para arcillas se puede asumir  $n=1$ . Ejemplo de estas relaciones con  $n=1$  es la ley de compresión del modelo Cam-Clay (Roscoe y Burland, 1968) en donde la relación de vacíos  $e$  se relaciona linealmente con el logaritmo natural de las presiones media  $p$ :

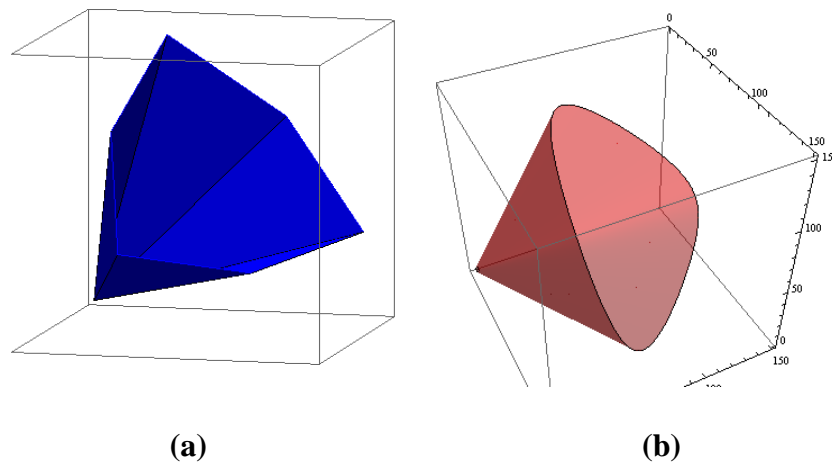
$$e = e_0 - \lambda \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (6)$$

En donde  $e_0$ ,  $\lambda$  son parámetros del material y  $p_0=1$  kPa es un esfuerzo de referencia.

- El módulo de Young  $E$ , es consistente con algunos modelos de compresión de arcilla. Por ejemplo Butterfield (1979) propuso para compresión isotrópica u edométrica la relación:

$$\log(1 + e) = \log(1 + e_0) - \lambda_B \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (7)$$

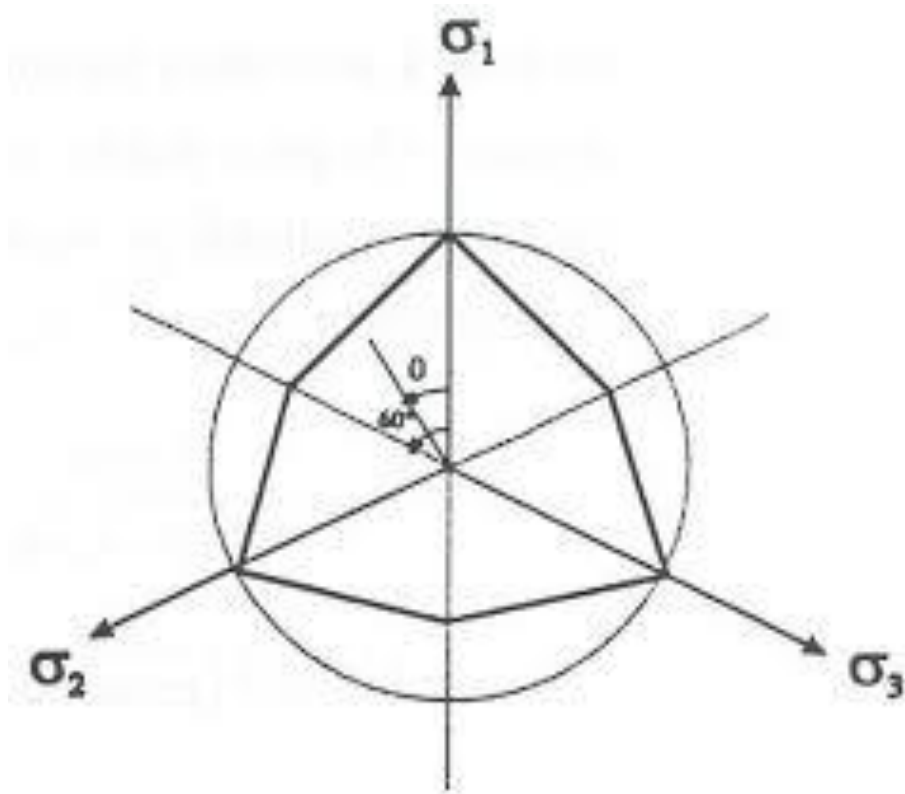
En donde  $\lambda_B$  es una constante del material distinta a la del Cam-Clay. A pesar que el modelo de Butterfield no es tan conocido como el del Cam-Clay, las ventajas son muy claras, por ejemplo contrario al modelo Cam-Clay, el modelo de Butterfield no permite la existencia de relaciones de vacíos negativas ante grande presiones. Esta ventaja es muy útil cuando se quiere simular problemas con grandes profundidades (mayor a 30 m). Algunos modelos constitutivos para arcillas ya emplean la ley de compresión de Butterfield, por ejemplo Masin (2006).



**Figura 44: Superficies de fluencia en el espacio 3D de tensiones. a) Superficie de Mohr-Coulomb y b) superficie de Matsuoka-Nakai.**

- 2) Cuando el material se descarga bajo condiciones isotrópicas o edométricas, la rigidez es más alta que la de compresión. Esta rigidez de descarga introduce un parámetro adicional. Durante la recarga el modelo debe tener en cuenta los efectos de memoria debido a la sobreconsolidación del material.
- 3) El modelo debe incorporar el concepto del estado crítico con una superficie en el espacio de tensiones que dependa del ángulo de Lode. Esta última dependencia se debe introducir con el fin de obtener una forma de la superficie parecida a la de Mohr-Coulomb en el plano desviador de tensiones como se muestra en la Figura 44.a. Algunas relaciones existentes se pueden utilizar, por ejemplo: Lade-Duncan (1975), Gudehus (1973), Argyris (1974) o Matsuoka-Nakai (1977). El efecto del ángulo de Lode es fundamental en los problemas de deformación plana (en inglés “plane strain”) porque puede disminuir la resistencia del material considerablemente. La Figura 45 muestra algunos ejemplos de superficies en el espacio de tensiones que incorporan la dependencia con el ángulo de Lode.
- 4) Bajo corte triaxial ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), el modelo debe simular contractancia para el estado normalmente consolidado NC. Para estados altamente preconsolidados  $OCR > 2$ , el modelo ISA CLAY puede simular dilatancia (expansión volumétrica de las deformaciones plásticas).

Algunos ejemplos de modelos constitutivos existentes que simulan el comportamiento del material en condiciones estáticas y quasi-estáticas se presentan en la tabla 14. En la misma tabla se mencionan algunos softwares comerciales de elementos finitos (Plaxis, Sigma/w, Abaqus, Flac, Tochnog) que ofrecen estos modelos constitutivos en su librería interna de materiales o como subrutina adicional.



**Figura 45: Influencia del ángulo de Lode en la superficie de fluencia visto en el plano.**

**Tabla 14: Ejemplos de modelos constitutivos capaces de simular los suelos orgánicos bajo condiciones estáticas y quasi-estáticas. Se marca con “x” aquel software que lo ofrezca.**

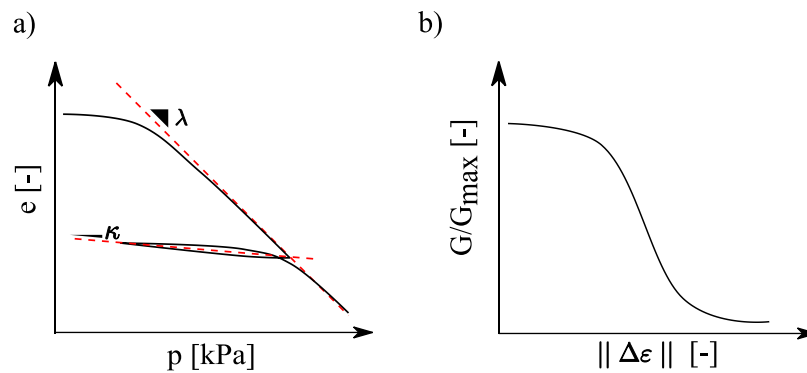
Modelo constitutivo	Plaxis	Sigma/W	Abaqus	Flac	Tochnog
Soft-Soil	x				
Soft-Soil-Creep	x				
Haredning soil	x				
Modified Cam-Clay	x	x	x	x	x
Visco-hipoplasticity			x (user*)		
ISA-Clay	x (user*)		x (user*)		

\*Subrutina de usuario

Para análisis dinámicos, es decir, con aceleraciones distintas a cero, se recomienda emplear un modelo constitutivo para los suelos orgánicos que conserve las características anteriores pero que simule el efecto de pequeñas deformaciones durante cargas cíclicas. El modelo debe tener en cuenta las siguientes características adicionales:

- 1) La rigidez aumenta al experimentar un cambio de la dirección de la tasa de deformaciones.
- 2) La rigidez se degrada a medida que la amplitud de la deformación aumenta, véase la Figura 46.b.
- 3) La acumulación plástica depende de la amplitud de las deformaciones. Ciclos de carga con amplitudes pequeña de deformación causan pequeñas acumulaciones plásticas.

Algunos ejemplos de estos modelos se mencionan en la Tabla 15. También se mencionan algunos softwares comerciales de elementos finitos que proporcionan estos modelos en su librería interna o como subrutina adicional.



**Figura 46: Simulaciones esperadas por el modelo constitutivo para suelos orgánicos a) para análisis estáticos, curva isotrópica o edométrica y b) para análisis dinámicos, curva de degradación de la rigidez.**

**Tabla 15: ejemplos de modelos constitutivos capaces de simular los suelos orgánicos bajo condiciones dinámicas. Se marcan con “x” aquel software que lo ofrezca**

Modelo constitutivo	Plaxis	Abaqus
Hardening soil model for small strains	x	
Visco-hipoplasticity with intergranular strain		x (user*)
ISA-Clay	x (user)	x (user)

\*Subrutina de usuario

### 4.3 Recomendaciones para calibrar los parámetros del modelo Modified Cam-Clay MCC con suelos orgánicos

La literatura ofrece una gran variedad de modelos constitutivos que consideran tener buenas capacidades en la simulación del comportamiento mecánico de las arcillas. Afortunadamente muchos de estos modelos comparten parámetros que presentan la misma definición. Por ejemplo, el índice de vacíos es un parámetro que comparte la mayoría de los modelos constitutivos para arcilla, así como el coeficiente de compresión y razón de Poisson. Probablemente los parámetros más utilizados para la simulación del comportamiento

mecánico de las arcillas corresponden a los introducidos originalmente por el modelo Modified Cam-Clay (MCC), que corresponden al coeficiente de compresión  $\lambda$ , coeficiente de expansión  $\kappa$ , módulo de Poisson  $\nu$  y relación de vacíos de referencia  $e_0$ . Estos parámetros se deben determinar con algunos ensayos de laboratorios. Se recomienda la realización de un ensayo de consolidación con un ciclo de carga y descarga. La Tabla 16 muestra un resumen de los parámetros del modelo MCC, con un rango aproximado de los valores y el ensayo de laboratorio recomendado para su determinación. También se indica si el parámetro varía con el contenido de la influencia orgánica.

**Tabla 16: Parámetros del modelo MCC**

Símbolo	Descripción	Rango aprox.	Ensayos	Influencia materia orgánica
$\lambda$ [-]	Índice de compresión	$10^{-6}$ -1	Consolidación	Si
$\kappa$ [-]	Índice de expansión	$10^{-6}$ -1	Consolidación	No
$e_0$ [-]	Relación de vacíos de referencia	0.5-2	Consolidación	Si
$\nu$ [-]	Módulo de Poisson	0-0.5	Triaxial CU	No

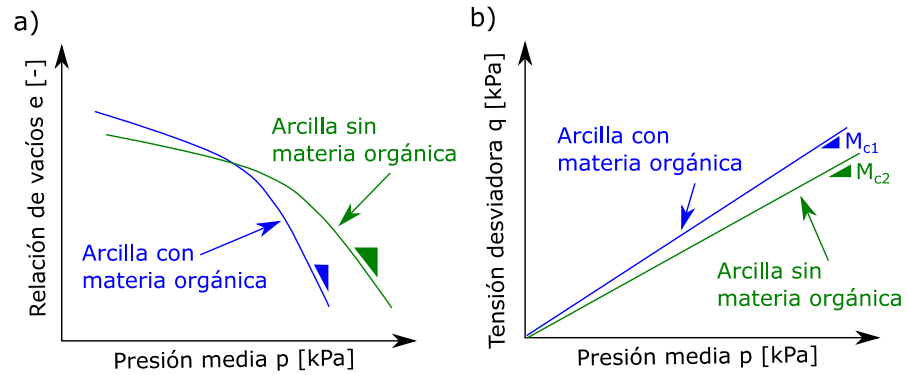
A continuación se describen los parámetros del modelo MCC y se explica la influencia de la materia orgánica sobre ellos:

- **Coficiente de compresión  $\lambda$ :** parámetro que controla la compresibilidad del suelo y se calibra con un ensayo de consolidación (compresión edométrica). El ensayo de consolidación debe alcanzar tensiones por encima de la tensión de preconsolidación para alcanzar el estado de normal consolidación. Puntos del ensayo que estén sobre el estado de normal consolidación se pueden correlacionar mediante la relación semilogarítmica del modelo MCC  $e = e_0 - \lambda \log(p/p_0)$ , en donde  $p_0=1$  kPa y  $e_0$  son valores de referencia y  $\lambda$  corresponde

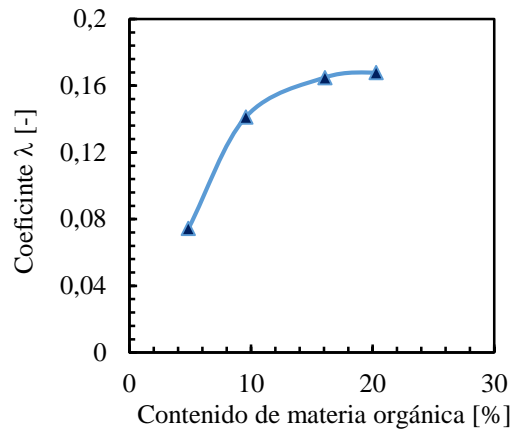
al coeficiente de compresión que se debe calibrar. Nótese que el operador “log” corresponde al logaritmo natural y no en base 10. La Figura 46.a muestra esquemáticamente el ajuste del parámetro  $\lambda$  en una curva de consolidación. Los experimentos muestran que este parámetro puede estar afectado por el contenido de materia orgánica. A mayor contenido orgánico, mayor es el valor de este parámetro. La figura 48 muestra la variación del coeficiente de compresión con el porcentaje de materia orgánica de una arcilla específica reportada por Thiyyakkandi y Annex (2011). Esto se debe a la mayor compresibilidad que presentan las arcillas orgánicas, tal como se muestra en la figura 47. Nótese que la correlación entre estas dos variables no es lineal.

- **Coefficiente de expansión  $\kappa$ :** parámetro que controla la rigidez elástica del suelo en una descarga. Este parámetro se puede ajustar por medio de un ensayo de consolidación. Para tal, se debe realizar una descarga después de haber alcanzado el estado de normal consolidación. La descarga se puede correlacionar mediante la relación semilogarítmica del Cam-Clay  $e = e_1 - \kappa \log(p/p_1)$ , en donde  $e_1$  y  $p_1$  corresponde a un punto sobre la curva de descarga y  $\kappa$  es el coeficiente de expansión que se debe calibrar. La Figura 46.a muestra esquemáticamente el ajuste del parámetro  $\kappa$  en una curva de consolidación. Este parámetro controla las propiedades elásticas del suelo, y por lo tanto se asume que tiene poca o nula influencia del contenido de materia orgánica.
- **Razón de Poisson  $\nu$ :** este parámetro controla la rigidez elástica del material. Se puede ajustar con la rigidez inicial de un triaxial no drenado. Este parámetro describe las propiedades elásticas del material y por lo tanto se asume que no está influenciado por el contenido de materia orgánica.
- **Relación de vacíos de referencia  $e_0$ :** este parámetro representa la relación de vacíos máxima que se obtiene para una presión media de  $p=1$  kPa. Se obtiene con la proyección de la línea de normal consolidación a la tensión de  $p=1$  kPa. Para determinarlo, se puede emplear el mismo ensayo de consolidación realizado

para la determinación del coeficiente de compresión y coeficiente de expansión. Según algunos experimentos, este parámetro aumenta para mayores contenidos orgánicos.



**Figura 47: Esquema de la influencia de la materia orgánica en el comportamiento mecánico. A) ensayo de consolidación. B) Ensayo triaxial. (Thiyyakkandi y Annex, 2011).**



**Figura 48: Influencia de la materia orgánica en el coeficiente de compresión de la arcilla de Kuttanad. (Thiyyakkandi y Annex, 2011).**

#### 4.4 Análisis de las fundaciones superficiales con elementos finitos

En esta sección se presenta un análisis por medio de elementos finitos una fundación superficial de una vivienda. Se construyó un modelo de elementos finitos para simular el comportamiento de una viga de fundación. La geometría del problema no representa ninguna situación particular, pero se basa en las dimensiones típicas de algunas fundaciones y

estratigrafía encontradas en la población de volcán Calbuco, Puerto Montt. Para simular el comportamiento mecánico del suelo orgánico, se empleó el modelo constitutivo ISA-Clay (Fuentes et al., 2015). Este modelo incorpora los parámetros del modelo Modified Cam Clay para cargas monotónicas e incluye parámetros adicionales para mejorar las simulaciones ante cargas cíclicas. En la próxima sección se explican los parámetros seleccionados para el modelo. Posteriormente se muestran los resultados con su respectivo análisis.

#### 4.4.1 Selección de parámetros del modelo y simulaciones de *element test*

Los parámetros seleccionados son los obtenidos mediante los ensayos de suelos orgánicos presentados en la sección 3, particularmente los resultados del ensayo de consolidación realizada a la muestra N°4. Estos parámetros simulan un suelo orgánico de alta compresibilidad y representa a algunos suelos orgánicos del sur de Chile. Se asumirá un límite líquido LL=140% para la estimación de algunos parámetros como se muestra en las siguientes líneas.

Para calibrar el índice de compresión  $\lambda$  y de expansión  $\kappa$  se emplean los valores obtenidos en el ensayo de consolidación de la muestra N°4 mostrados en la sección 3.1.5, puesto que es la muestra más representativa y de la cual se tienen mayor cantidad de datos.

La relación de Poisson se fija con el valor propuesto por Das (2001) para arcillas blandas  $\mu = 0.2$ .

**Tabla 17: Valores representativos de la relación de Poisson, Das (2001).**

Tipo de suelo	Relación de Poisson, $\mu$
Arena suelta	0.2 – 0.4
Arena media	0.25 – 0.4
Arena densa	0.3 – 0.45
Arena limosa	0.2 – 0.4
Arcilla blanda	0.15 – 0.25
Arcilla media	0.2 – 0.5

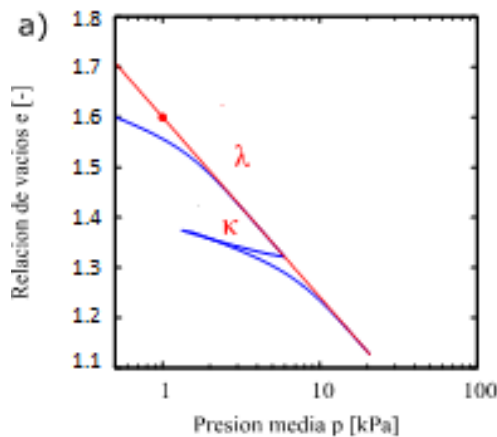
La relación de vacíos de referencia es aquella que se encuentra sobre la línea de normal de consolidación a una presión media de  $p=1$  kPa. Este parámetro puede variar de acuerdo con el tipo de suelo orgánico. En este caso se adopta un valor  $e_0 = 1.6$  que representa un suelo orgánico de acuerdo a los ensayos de consolidación realizados. En caso de ser un suelo altamente poroso, se pueden obtener valores mayores a este.

Por último se calibra el factor  $f_{b0}$  que controla las tensiones admisibles por el modelo  $q/p = M_c f_{b0}$ . Cabe recordar que el modelo Modified Cam-Clay sobreestima las tensiones para suelos normalmente consolidados, como el caso de los suelos orgánicos. Sin embargo, el modelo ISA-Clay logra simulaciones más realistas de este estado debido a la introducción de este parámetro. Los detalles de la forma de la superficie bounding (superficie que define las tensiones máximas) se encuentran en Fuentes et al. (2015). Los valores de los parámetros están resumidos en la Tabla 18.

Algunas simulaciones “Element test”, es decir, de ensayos de rutinas como lo son ensayos de compresión isotrópica, se realizaron con el modelo ISA-Clay para analizar su desempeño con los parámetros selectos. Las simulaciones del ensayo de compresión isotrópica se presentan en la Figura 49. Esta simulación se compone de una carga, seguido con ciclo de carga y descarga. El modelo simula en compresión isotrópica una rigidez que se acerca asintóticamente a la rigidez de la línea de normal de consolidación (línea estado crítico). Durante el ciclo de carga-descarga, el modelo simula el cambio del módulo edométrico como lo muestran las arcillas y guarda memoria para simular el efecto de sobreconsolidación.

**Tabla 18: Parámetros de suelo orgánico usado en las simulaciones.**

Símbolo	Valor
$\lambda$ [-]	0.233
$\kappa$ [-]	0.025
$\varepsilon_0$ [-]	1.6
$\nu$ [-]	0.2
$f_{bo}$ [-]	1.25

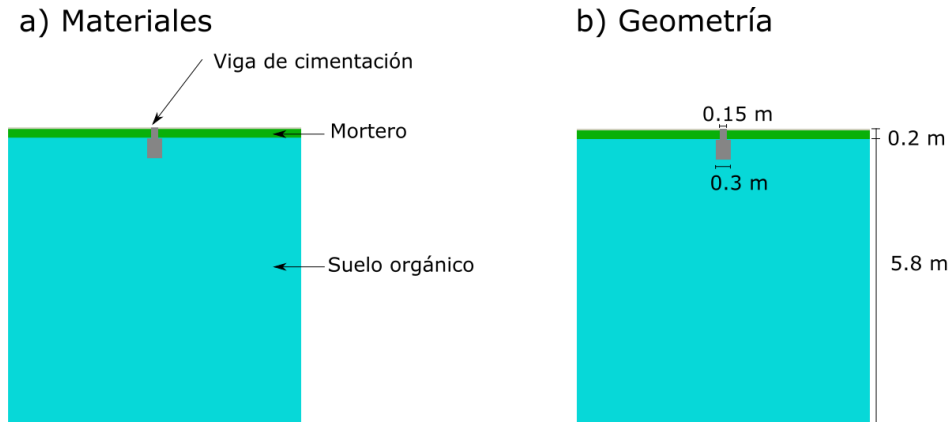


**Figura 49: simulaciones con el modelo ISA-Clay. Ensayo isotrópico (carga y descarga).**

#### 4.4.2 Descripción del problema de valor de contorno en elementos finitos

En esta sección se describe el problema de elementos finitos que simula una viga de fundación de una vivienda. Los materiales y la geometría del problema se presentan en la Figura 50. Se considera una viga de fundación que soporta un muro de 0.15 m de ancho que le transmite una sobrecarga de 100 kPa. Esta carga se espera en viviendas de aproximadamente 2 pisos, pero puede variar según el tipo de muro, tipo de vivienda y otras condiciones. La viga de fundación tiene 0.3 m de ancho en su parte inferior, y está situada

a una profundidad de 0.2 (m) para representar el piso de la vivienda, se considera un material superficial de rigidez mayor al suelo que representa al ripio, el mortero y el baldosín típicos de esta vivienda. En la Tabla 19 este material está indicado como “Mortero”. El problema simula 6 m de profundidad de suelo.



**Figura 50: Caso 1: Materiales y geometría de viga de fundación sobre suelo homogéneo**

Las condiciones de borde son como se describen a continuación. En los bordes laterales existe restricción del movimiento horizontal, mientras que en el borde inferior existe restricción del movimiento vertical. Estas son típicas condiciones de bordes “edométricas”. Por encima de la viga de fundación se aplica una sobrecarga de 100 kPa. Sobre el material que representa el conglomerado de baldosín + mortero + ripio no se tuvo en cuenta alguna sobrecarga aparte de su peso propio.

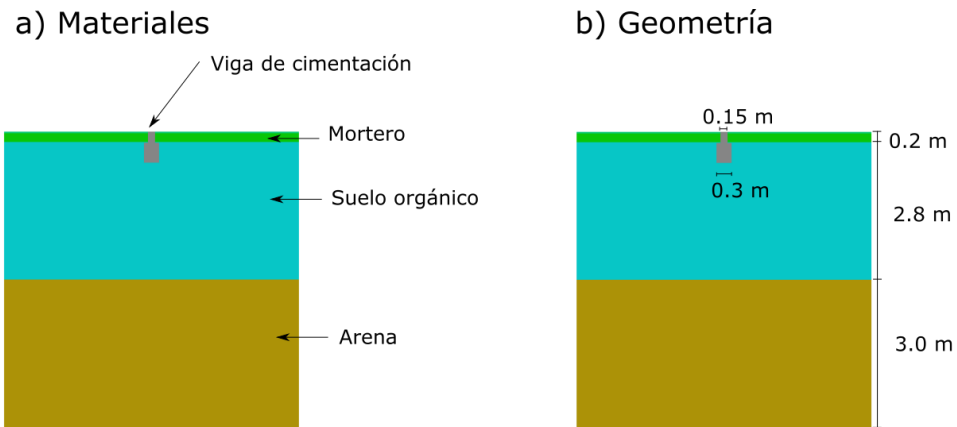
El suelo orgánico es simulado con el modelo ISA-Clay (Sección 4.3), con los parámetros descritos en la Sección 4.4.1, que simulan un suelo orgánico de alta compresibilidad. Los demás materiales son simulados con un modelo elástico lineal con parámetros típicos de estos materiales. El modelo elástico lineal requiere la definición de dos parámetros que corresponden al módulo de Young  $E$  y la razón de Poisson. Para el hormigón de la viga de fundación se adoptaron valores típicos del hormigón de  $E=27000$  MPa y  $\nu=0.2$ . Para el material Baldosín + Mortero + Ripio se adoptaron valores de  $E=100$  MPa y  $\nu=0.2$ . Para la arena se adoptaron valores típicos de una arena con un densidad relativa media con  $E=70$

MPa y  $\nu=0.2$ . Para la columna de grava se adoptaron valores de  $E=100$  MPa y  $\nu=0.2$ . Los parámetros se muestran en la Tabla 24.

**Tabla 19: Parámetros del modelo elástico lineal para los distintos materiales**

Material	E [MPa]	$\nu$ [-]
Hormigón (viga)	27000	0.2
Baldosín + Mortero + Ripio	100	0.2
Arena	70	0.2
Columna de grava	100	0.2

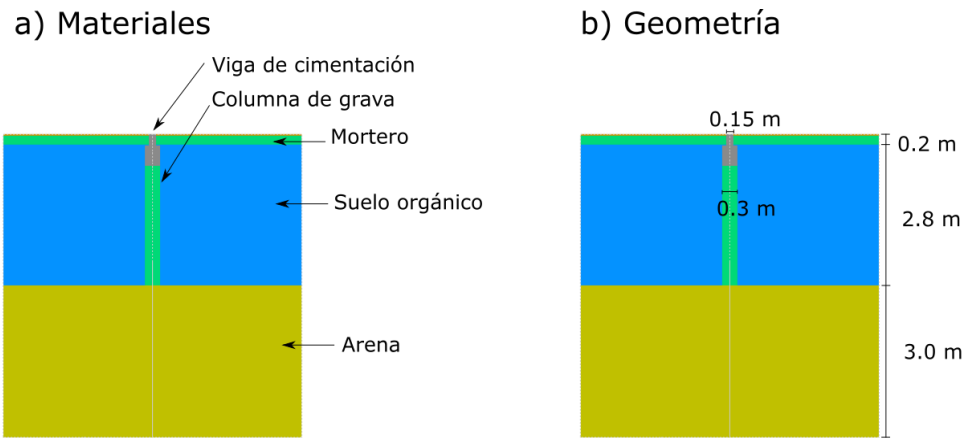
Se consideró un segundo caso con la misma geometría que el problema descrito anteriormente pero con una arena por debajo del suelo orgánico a 3 m de profundidad, véase Figura 51. Los demás componentes del problema (viga de fundación, material rígido superficial) se mantienen con la misma geometría. La sobrecarga y las condiciones de bordes son las mismas que en el caso anterior. Los detalles de la geometría y los materiales se muestran en la Figura 51.



**Figura 51: Caso 2: Materiales y geometría de viga de fundación sobre suelo con dos estratos**

Un tercer caso considera los dos estratos igual al caso 2, pero la viga de fundación está apoyada sobre una columna de grava de 3 m de profundidad que termina donde inicia el estrato de arena. Este escenario se evaluó para predecir el comportamiento de este tipo de mejoramiento que puede ser recomendable para construcción sobre suelos orgánicos. Los detalles de la geometría y los materiales se muestran en la Figura 52. Los tres casos están resumidos en la Tabla 20.

Para cada caso se consideraron tres distintos escenarios que afectan el comportamiento del suelo por debajo de la viga de fundación. En el primer escenario se consideraron condiciones secas el material. En el segundo escenario, se consideraron condiciones saturadas drenadas con nivel freático en la superficie del terreno. Por último, se consideró suelo saturado igual que en el segundo escenario, pero bajo condiciones no drenadas en el caso del suelo orgánico. Para la arena, se consideraron condiciones drenadas dada su alta permeabilidad en comparación con el suelo orgánico.



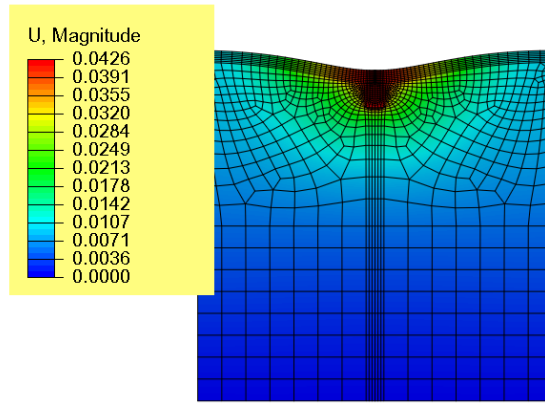
**Figura 52: Caso 3: Materiales y geometría de viga de fundación apoyada con columna de grava sobre suelo con dos estratos**

Teniendo en cuenta que el modelo constitutivo ISA-Clay requiere de la inicialización de las tensiones efectivas  $\sigma'$ , la relación de vacíos  $e$  y otras variables de estado, (deformación intergranular  $h$ , y centro de la superficie de fluencia  $c$ , se asumieron las siguientes condiciones iniciales para el problema: el esfuerzo efectivo vertical sigue una distribución hidrostática para condiciones secas y saturadas con pesos unitario seco  $\gamma_d=15 \text{ kN/m}^3$  y peso unitario boyante  $\gamma'=10 \text{ kN/m}^3$  respectivamente. Las presiones de poros se inicializaron siguiendo una distribución hidrostática con peso unitario del agua igual a  $\gamma_w=9.8 \text{ kN/m}^3$ . Para el caso seco las presiones de poros son igual a cero en todo el estrato. La deformación intergranular  $h$  y el centro de la superficie de fluencia  $c$  se inicializaron con su máximo valor en condiciones edométricas, es decir, sus componentes en la dirección vertical adoptan el máximo valor posible para cada uno.

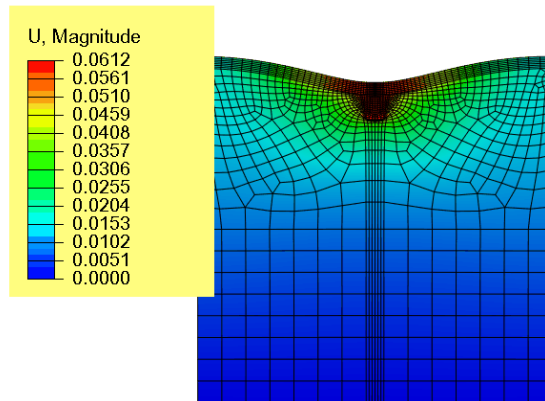
Para simular la condición no drenada, se añade a los esfuerzos efectivos, la evolución de la presión de poros. En este caso, los cambios de volumen del material son prácticamente despreciables debido a la baja compresibilidad del agua.

A continuación se presentan los resultados de las modelaciones para cada caso de análisis.

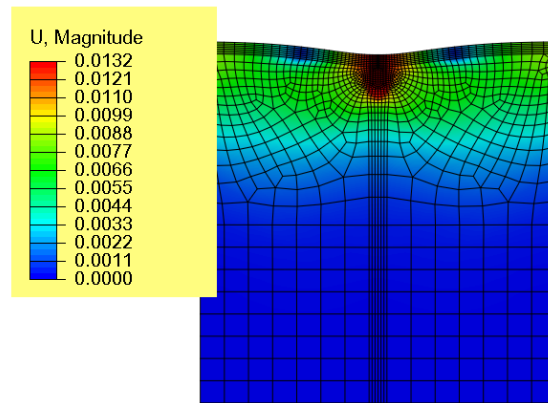
1 Estrato, suelo seco. Malla deformada a 10x:



1 Estrato, suelo saturado drenado. Malla deformada a 10x:

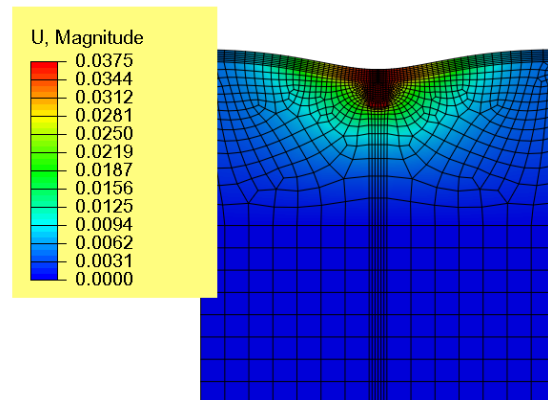


1 Estrato, suelo saturado no drenado. Malla deformada a 10x:

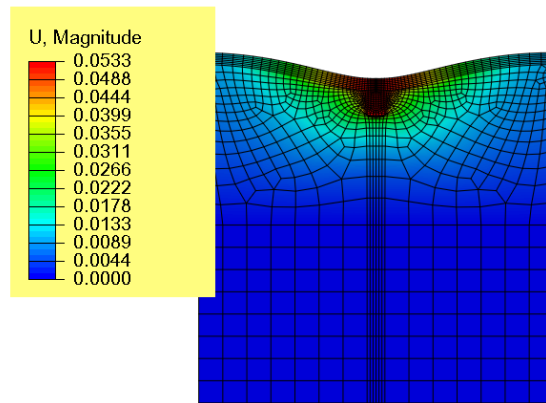


**Figura 53: Viga de fundación con un solo estrato. Magnitud de los desplazamientos en metros.**

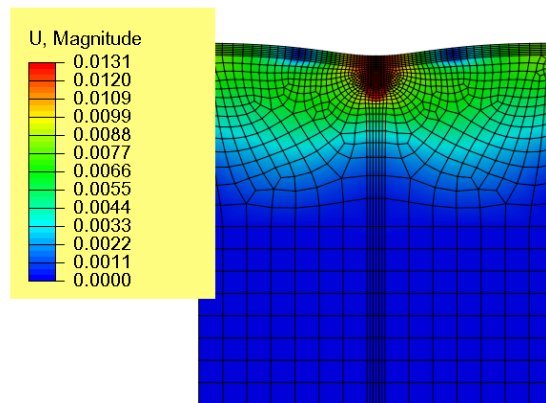
2 Estratos, suelo seco. Malla deformada a 10x:



2 Estratos, suelo saturado drenado. Malla deformada a 10x:

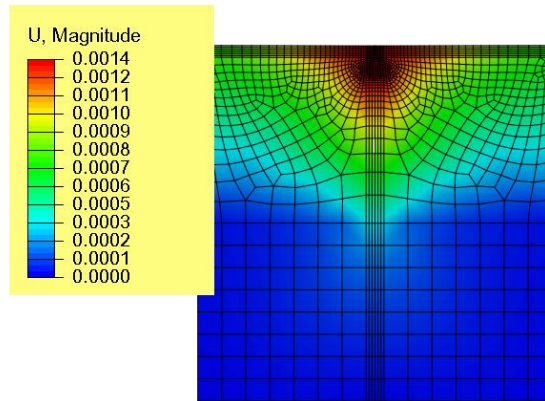


2 Estratos, suelo saturado no drenado. Malla deformada a 10x:

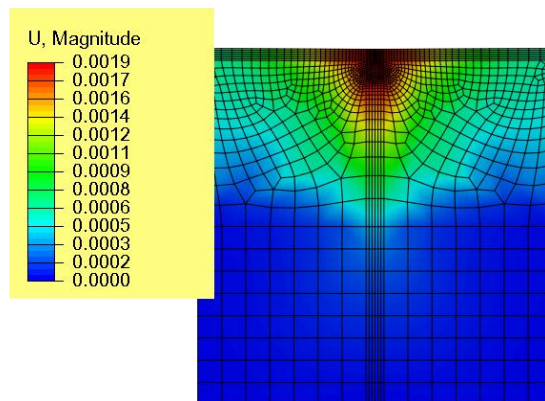


**Figura 54: Viga de fundación con dos estratos. Magnitud de los desplazamientos en metros.**

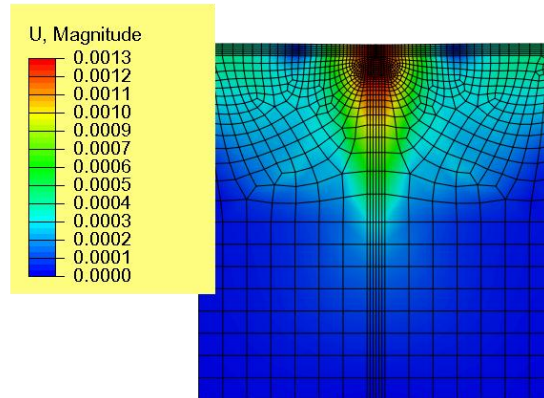
2 Estratos con columna de grava, suelo seco. Malla deformada a 10x:



2 Estratos con columna de grava, suelo saturado drenado. Malla deformada a 10x:



2 Estratos con columna de grava, suelo saturado no drenado. Malla deformada a 10x:



**Figura 55: Viga de fundación apoyada sobre columna de grava. Dos estratos. Magnitud de los desplazamientos en metros.**

**Tabla 20: Casos considerados en el problema de la viga de fundación**

Casos	Descripción
1	Viga de fundación sobre suelo orgánico. El suelo orgánico es el único estrato que se considera en el análisis. Se analiza el suelo en condiciones secas, saturadas drenadas y saturadas no drenadas.
2	Viga de fundación sobre suelo orgánico. Debajo del suelo orgánico yace un estrato de arena. Este estrato se encuentra a 3 m de profundidad por debajo de la superficie. Se analizan en condiciones secas, saturadas drenadas y saturadas no drenadas. La arena siempre está bajo condiciones drenadas.
3	Viga de fundación sobre suelo orgánico por encima de la arena. La viga está apoyada con columna de grava que se apoya en el estrato de arena. Se analizan en condiciones secas, saturadas drenadas y saturadas no drenadas. La arena se encuentra siempre en condición drenada.

#### **4.4.3 Resultados de las simulaciones con la viga de fundación**

Los resultados de la viga de fundación con elementos finitos se presentan en las figuras 79, 80 y 81. La tabla 21 resume los resultados de los desplazamientos máximos obtenidos en las simulaciones de los distintos casos y escenarios.

Los resultados de la figura 53 muestran el caso 1 donde la viga de fundación se apoya en un estrato homogéneo de suelo orgánico. En la condición seca, los desplazamientos máximos son de 4.2 cm. Para la condición saturada drenada aumentan a 6.1 cm mientras que para la condición saturada no drenada disminuyen a 1.3 cm debido a la reacción del agua para garantizar que el volumen general del suelo no cambie (implicación de la condición no drenada). Aquí es importante señalar que estos desplazamientos dependen de la magnitud de la sobrecarga que el usuario imponga. Para este problema, el muro que se apoya en la viga de fundación le transmite una sobrecarga de 100 kPa. Nótese también que en el escenario de suelo no drenado, el volumen debido al asentamiento de la viga es compensado por la expansión experimentada por la superficie del terreno al margen izquierdo y derecho del problema. Estos resultados indican por lo tanto que los mayores asentamientos se obtienen a largo plazo, es decir, al final del proceso de consolidación como es de esperarse.

El caso 2 se muestra en la figura 54, con la viga de fundación apoyada sobre suelo orgánico y por debajo un estrato de arena. Se consideraron el escenario seco, saturado drenado y saturado no drenado. Los resultados no difieren mucho del primer caso, lo que indica que la mayor parte de la compresión del suelo orgánico ocurre en los primeros 3 m. Esto se debe a al ancho de la viga de fundación igual a 0.3 m. Según Bowles (1997), la profundidad del estrato que se comprime debido a una sobrecarga es de aproximadamente 5 veces el ancho de la fundación. En este caso, solo corresponde a 1.5 m por debajo de la fundación. En la condición saturada drenada, los desplazamientos obtenidos en el caso 1 y 2 son también muy similares.

El caso 3 (figura 55) muestra una posible solución al problema. Se simula una viga de fundación que se apoya con una columna de grava hasta el estrato de arena. La columna de grava conecta la base de la viga de fundación con la parte superior del estrato de arena.

Nótese que las rigideces de la columna de grava y de arena son mucho más altas. Los asentamientos que muestra el modelo de elementos finitos con esta solución disminuyen drásticamente en todos los escenarios considerados. De hecho, el escenario más crítico que corresponde al suelo saturado drenado se obtiene un desplazamiento máximo de 2 mm, lo cual es completamente admisible en cualquier obra de ingeniería. Estos resultados soportan la recomendación de la columna de grava como remedio al problema de los asentamientos.

**Tabla 21: resumen de los desplazamientos máximos obtenidos con las simulaciones de elementos finitos de la viga de fundación**

Caso	Escenario	Desplazamiento máximo [mm]
1- suelo homogéneo	1- suelo seco	42.6
1 - suelo homogéneo	2 - suelo saturado drenado	61.2
1 - suelo homogéneo	3 - suelo saturado no drenado	13.2
2 - suelo con 2 estratos	1 - suelo seco	37.5
2 - suelo con 2 estratos	2 - suelo saturado drenado	53.3
2 - suelo con 2 estratos	3 - suelo saturado no drenado	13.1
3 - suelo con 2 estratos y columna de grava	1 - suelo seco	1.4
3 - suelo con 2 estratos y columna de grava	2 - suelo saturado drenado	1.9
3 - suelo con 2 estratos y columna de grava	3 - suelo saturado no drenado	1.3

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

Para abordar el estudio de suelos orgánicos en una zona de estudios tan amplia y de tal variedad de ambientes lacustres y humedales, se ha optado por buscar un enfoque único a partir de la caracterización de muestras representativas en sectores urbanos de las regiones de Los Lagos, Los Ríos y Aysén. Principalmente en la localidad de Puerto Montt, que es la localidad donde más antecedentes se tienen de daños causados a viviendas producto de asentamientos, esto como objeto de dar soluciones realistas a los problemas planteados por el desarrollo urbanístico de la zona.

Cabe señalar que los valores de los parámetros geotécnicos aquí presentados no deben ser utilizados sino como una primera guía para el diseño de fundaciones, el que deberá apoyarse siempre en prospecciones y ensayos de los depósitos del subsuelo del lugar específico en que se encuentre localizada el área de urbanización.

De los ensayos de consolidación se obtuvo que las muestras presentan gran capacidad de deformación, esto debido a los altos índices de vacíos iniciales que presenta el suelo orgánico, además los estados de carga a los que fue sometido en el laboratorio sobrepasaron los esfuerzos de preconsolidación entrando a la zona normalmente consolidada o virgen, donde con pequeños aumentos en la tensión vertical efectiva se presentaron grandes deformaciones.

Existe una respuesta común en el comportamiento geotécnico de los suelos orgánicos ensayados, donde se observa que, en general, son altamente compresibles y generarán por lo tanto asentamientos que deben ser controlados. Por el contrario los suelos que presenten índices de vacíos menores, resultaran menos compresibles y más resistentes.

Se puede concluir en general que en mayor o menor medida, todas las regiones presentan problemas similares cuando se trata de fundar sobre suelos orgánicos. La única diferencia es la magnitud de estos problemas que claramente dependerá del contenido de materia orgánica que presente cada proyecto y de la cantidad de suelo orgánico involucrado. Esto último se manifestará en el espesor y ubicación de los estratos de suelo orgánico en cada proyecto. De esta forma, los nombres con que la comunidad reconoce los suelos orgánicos en las diferentes regiones (Mallín, Mazacote, Hualves, etc.), identifican el mismo tipo de problema.

Para el análisis de elementos finitos en condiciones estáticas o quasi-estática se recomienda emplear para la simulación de suelos orgánicos modelos constitutivos que tengan en cuenta las leyes que describen la compresibilidad de la arcilla en condiciones isotrópicas y edométricas, el apropiado comportamiento de dilatación-contractancia, el concepto del estado crítico, con dependencia del ángulo de lode, los efectos de sobreconsolidación, y algunos otros detalles que se describieron en la sección 4.2.

Para análisis de elementos finitos en condiciones dinámicas, el modelo constitutivo empleado para simular el comportamiento mecánico del suelo orgánico debe estar en capacidad de simular algunos aspectos del comportamiento del suelo para pequeñas amplitudes de deformaciones, como lo son el aumento de rigidez y la disminución de la acumulación plástica. Los detalles de estos requerimientos se detallan en la sección 4.3.

Los análisis con elementos finitos de una viga de fundación de una vivienda arrojaron que el suelo orgánico puede asentarse en más de 3 cm al aplicarse una carga de 100 kPa. Los casos más críticos corresponden a un suelo orgánico de 3 o más metros de espesor en condiciones saturadas drenadas. En condiciones no drenadas, estos asentamientos disminuyen notablemente. Esto es de esperarse debido a que los asentamientos totales son aquellos que resultan de la suma de los asentamientos inmediatos (no drenados) más aquellos debido a la consolidación primaria (drenados). Los análisis que consideraron una viga de fundación apoyada sobre una columna de grava de 3 m de profundidad que alcanza a tocar el estrato de arena localizado también a 3 m de profundidad reducen de manera considerable los asentamientos observados anteriormente. Los asentamientos obtenidos bajo estas condiciones son menores a 2 mm, lo cual es admisible en cualquier tipo de obra de ingeniería. Estos resultados soportan la recomendación de la utilización de columnas de gravas para evitar los asentamientos debido a la compresión del material.

Debido a lo anterior es que existe una clara diferenciación en el comportamiento del suelo al fundar sobre columnas de grava, donde se presentaron asentamientos menores a 2 (mm). Este tipo de mejoramiento es una solución para reducir los asentamientos en viviendas que sean fundadas sobre suelos orgánicos, ya que trabajan por fuste y aumentan el drenaje vertical, acelerando los asentamientos, que es el principal problema asociado a este tipo de suelo.

Debido a las altas deformaciones a las que se ven expuestos los suelos orgánicos, uno de los problemas frecuentes son los asentamientos en las fundaciones de las viviendas. Debido a esto no se recomienda la turba como suelo de fundación. Grandes depósitos de material se encuentra en condiciones saturadas y tienen el riesgo de sufrir asentamientos diferenciales, siendo aún más crítico, si subyacen depósitos de arcillas blandas.

Para evitar esto se recomienda la excavación del suelo orgánico y el remplazo del material por relleno de mejores propiedades mecánicas. Este relleno debe ser compactado con el fin de evitar nuevos asentamientos. Las normas generales para excavaciones se encuentran descritas en la Norma Chilena NCh 349. Para excavaciones de más de un metro de profundidad en suelos orgánicos se deben realizar entibaciones o reforzamientos.

En caso de viviendas deterioradas que estén fundadas sobre suelos orgánicos y que deban ser reparadas, se recomienda utilizar el manual de terreno elaborado por la Corporación del Desarrollo Tecnológico (CDT, 2012). Donde a partir de la evaluación del daño que presente una vivienda construida en “tierra cruda”, se entregan soluciones y técnicas constructivas adecuadas para detener o reparar el daño.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

Abdallah, I. H., Ahmed, S. A., Osama, T. A. (1999). Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay Science* 14, 257-278.

Arenas, M.; Jara, C.; Milovic, J.; Pérez, Y.; Troncoso, R.; Behlau, J.; Hansich, F. (2005). Geología para el ordenamiento territorial: Área de Valdivia, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No 8, 71 p., 6 mapas escala 1:100.000 y 1 mapa escala 1:25.000

Argyris, J., Faust, G., Szimmat, J., Warnke, E., Willam, K. (1974). Recent developments in the finite element analysis of prestressed concrete reactor vessels. *Nucl. Eng. Des.* Volumen 28, serie 1, pp. 42-75.

ASTM D 2435-03: "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading". ASTM International, West Conshohocken,

ASTM D2974-14: Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils. ASTM International, West Conshohocken

ASTM D4427-13: Standard classification of peat samples by laboratory testing. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken

Bowles, J.E. (1997). *Foundation Analysis and Design*, fifth edition Ed. McGraw-Hill

Buduba, C. G. (2006). Modificaciones en el pH y contenido de materia orgánica en suelos del ecotono estepa/bosque andino-patagónico por implantación de pino ponderosa. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Butterfield, R. A natural compression law for soils. *Geotechnique*. (1979). Volumen 29, Serie 4, pp. 469-480.

Central Kalimantan Peatland Project (CKPP). (2008). *Questions & Answers: Facts about peatland degradation in Southeast Asia in a global perspective*. Wageningen, Wetlands International.

Collantes, M., & Faggi, A. M. (1999). Los humedales del sur de Sudamérica. Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. ORCYT, Montevideo, Uruguay, 15-25.

- CONAF. (2006). Catastro de Uso del Suelo y Vegetación, Región de Magallanes y Antártica Chilena. Periodo 1996-2005.
- CONAF. (2012). Monitoreo de Cambios, Corrección Cartográfica y Actualización del Catastro de Bosque Nativo en la XI Región de Aisén. Periodo 1996-2011. Valdivia, Chile.
- CONAF. (2014a). Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de recursos Vegetacionales Nativos de la Región de Los Lagos. Periodo 2006-2013. Valdivia, Chile.
- CONAF. (2014b). Monitoreo de Cambios, Corrección Cartográfica y Actualización del Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de la región de Los Ríos. Periodo 2006-2013. Valdivia, Chile.
- Contreras C. (2003). Producción de praderas en mallines drenados. Boletín INIA N°107:5-7.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT). (2012). Manual de terreno N°32, Evaluación de Daños y Soluciones para Construcciones en Tierra Cruda.
- Correa, A. F., Urrutia, J., & Figueroa, R. (2011). Estado del conocimiento y principales amenazas de los humedales boscosos de agua dulce de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 84(3), 325-340.
- Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning Latin Am.
- Davies, B. E. (1974). Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 38(1), 150-151.
- Fabre, V. E., Bizzotto, M. B., & Tirner, J. C. (2010). Comportamiento resistente de suelos orgánicos estabilizados con tanino. *Información tecnológica*, 21(2), 103-112.
- Fuentes, W and Triantafyllidis, T. (2015). ISA Model: A constitutive model for soils with yield surface in the intergranular strain space. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Volumen 39, serie 11, pp. 1235–1254.
- Fuentes, W. and Triantafyllidis, T. (2015). Holistic Simulation of Geotechnical Installation Processes. Constitutive Model for Clays under the ISA Framework. Ed: Triantafyllidis, T. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*. Volumen 80. ISBN: 978-3-319-23158-7. Pp: 115-129. Springer Berlin Heidelberg.
- Gandullo, R., & Schmid, P. (2001). Análisis ecológico de mallines del Parque provincial Copahue, Neuquén, Argentina. *Agro sur*, 29(2), 83-99.

- González, M., Hauenstein, E., Peña-Cortés, F., García, M., & Urrutia, O. (2003). Comentarios sobre bosques pantanosos, humedales importantes del Centro-Sur de Chile. *Gestión Ambiental*, 9, 3-13.
- Gudehus, G. (1973). Elastoplastische Stoffgleichungen für trockenen Sand. *IngenieurArchiv*. Volumen 42, serie 3, pp. 151-169.
- Huat, B. B., Prasad, A., Asadi, A., & Kazemian, S. (2014). *Geotechnics of organic soils and peat*. CRC Press.
- Hwang, J., Humphrey, A., Bobet, A., & Santagata, M. C. (2005). Stabilization and improvement of organic soils.
- Jackson, M.L. (1976). *Análisis Químico de Suelos*. Ed. Omega, Barcelona. 662 pp.
- La Manna, L., Buduba, C., Alonso, V., Davel, M., Puentes, C., & Irisarri, J. (2007). Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelos de la región Andino-Patagónica: efectos de la vegetación y el tipo de suelo. *Ciencia del suelo*, 25(2), 179-188.
- Lade, P. and Duncan, J. (1975). Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil. *J. Geotech. Engrg.* Volumen 101, serie 10, pp. 1037-1053.
- Larraín F.I. (2011). Evaluación y propuesta de clasificación de los bosques pantanosos de mirtáceas (hualves), presentes en la xiv región de los ríos, Chile.
- Leiva, E. (2013). Caracterización Geotécnica de la Zeolita proveniente de las tobas de Quinamávida, Colbún, Región del Maule, Chile.
- León Valdebenito C., Forestier, J. D., Mora, A. B., Sánchez, O. V., & Aliste, S. B. (2012). Taller las turberas como recurso educativo. Guía para profesores. Disponible en [http://www.turberas.cl/pdf/GUIA\\_TALLER\\_PROFESORES\\_CHILOE\\_final.pdf](http://www.turberas.cl/pdf/GUIA_TALLER_PROFESORES_CHILOE_final.pdf)
- Manzari M, Dafalias Y. (1997). A critical state two-surface plasticity model for sands. *Géotechnique*. Volumen 47, serie 2, pp. 255-272.
- Martínez Cortizas, A., Pontevedra Pombal, X., Nóvoa Muñoz, J. C., Rodríguez Fernández, R. & López-Sáez, J. A., (2009). Turberas ácidas de esfagnos. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 64 p.

- Masin, D. (2006). A hypoplastic constitutive model for clays. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. Volumen 29, serie 4, pp. 311–336.
- Matsuoka, H. and Nakai, T. (1977). Stress-strain relationship of soil based on the smp. In *Constitutive equations of soils*. Conf. Soil. Mech. Found. Eng. Session 9. Tokyo, Japón.
- Mesri, G., Stark, T. D., Ajlouni, M. A., & Chen, C. S. (1997). Secondary compression of peat with or without surcharging. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 411-421.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2012). Resolución Exenta N° 9020, Itemizado técnico de construcción para proyectos del programa fondo solidario de elección de vivienda, Chile
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, New York.
- Montoya, Jorge Ignacio. (2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. *Revista EIA*, vol. 14, p. 75-84.
- NCh 1515 of79: Mecánica de suelos – determinación de la humedad.
- NCh 1517 of 79: Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia- Parte 1 “Determinación del Límite Líquido”.
- NCh 1517 of 79: Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia- Parte 1 “Determinación del Límite Plástico”.
- NCh 1532 of80: Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia- Parte 1 “Determinación de Densidad de Partículas Sólidas”.
- Olguín, R., & Ortúzar, M. (2015). Desarrollo e implementación de una veleta de corte a alta revolución para sondajes. *Obras y proyectos*, (17), 89-95.
- Porter S. C. (1981). Pleistocene glaciation in the southern Lake District of Chile. *Quaternary Research* 16: 263-292.
- Promis, A. (2010). Humedales anegadizos de la Patagonia chilena. *Medio Ambiente* 5: 6-16.

- Raffaele, E. (1999). Mallines: aspectos generales y problemas particulares. *Temas sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. ORCYT, Montevideo, Uruguay, 27-33.
- Ramírez C., San Martín C. (2008). Ecosistemas dulceacuícolas. In: CONAMA. *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos*. Ocho Libros Editores, Santiago de Chile. pp. 106-116.
- Ramírez, C., Ferriere, F., & Figueroa, H. (1983). Estudio fitosociológico de los bosques pantanosos templados del sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 56(1), 11-26.
- Roscoe, K. and Burland, J. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clays. *Engineering plasticity*. J. Heyman, F.A. Leckie ed. Cambridge University Press. Pp. 535-609.
- Rosell, R.A.; J.C. Gasparoni and J.A. Galantini, (2001). Soil organic matter evaluation. In *Assessment Methods for Soil Carbon* (Ed. R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett y B.A. Stewart). Serie *Advances in Soil Science*, Chapter 21, pp. 311-322
- Secretaría de la Convención de Ramsar, (2006). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*, 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Soil Science Society of America (SSSA). (1997). *Glossary of soil science terms*. Rev. Ed. SSSA, Madison, WI. <https://www.soils.org/>
- Thiyyakkandi, S. y Annex, S. (2011). Effect of organic content Geotechnical Properties of Kuttanad Clay. *EJGE*. Vol 16. pp. 1653-1663.
- Uribe P. (1982). *Geología y consideraciones geotécnicas para el estudio de los suelos de fundación de la ciudad de Punta Arenas*. Informe taller de título II. Departamento de Geología Universidad de Chile.
- Vásquez Díaz, A. (2012). *Suelos de Fundación de la Ciudad de Punta Arenas, Región de Magallanes y Antártica Chilena*.
- Venegas Sepúlveda, A. (2008). *Caracterización de la materia orgánica de suelos de praderas naturales y cultivadas de la IX región*.
- Villalobos, F. (2014) *Mecánica de suelos*. Editorial Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción, Chile.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

## 7. ANEXOS

### Anexo A: Tabla de observaciones en informes de mecánica de suelos en la zona de estudio, relacionado con suelos orgánicos.

Región	Proyecto/ Comité	Comuna/ zona	Observación
Los Ríos	El Rehue	La unión	Primer estrato de suelo orgánico con espesores entre 0.2 y 1.7 m, posteriormente limos inorgánicos de alta compresibilidad, finalmente limos inorgánicos de baja compresibilidad. Población Daiber, año 2010.
Los Ríos	Huellehue	Valdivia	tres unidades estratigráficas, el estrato superficial corresponde una capa vegetal y relleno no apto para fundar, espesores entre 0.15 hasta 1.5 m.
Los Ríos	Mi casa propia	La Unión	La estratigrafía muestra 2 unidades, la primera es de un limo de mediana a alta compresibilidad, color café, olor terreo, resistencia seca baja, plasticidad media, húmedo, consistencia blanda, estructura homogénea, en ciertos lugares se encuentra la presencia de materia orgánica (raicillas). Este estrato se extiende desde los 0,0 hasta 1.5 m. Se clasifica como ML - MH en el sistema USCS.
Los Ríos	Nuestro futuro	Futrono	Se presentan dos unidades estratigráficas, la primera es un Limo orgánico, de un espesor promedio de 1.0 m, color café, con presencia de gravas de hasta 6" aisladas en algunos sectores.
Los Lagos	Evaluación estructural	Puerto Montt, localidad de Alerce, población	10 viviendas presentan asentamientos en antejardin, inclinación de pilares y panderetas, cercos y postes de alumbrado público, así como también asentamientos de pavimentos.

		Volcán Calbuco	<p>Algunas viviendas han experimentado asentamientos, agrietamiento de muros de albañilería, grietas en radiers y problemas en el cierre de puertas y ventanas.</p> <p>4 calicatas dentro de la población, presencia de suelos orgánicos en el tercer estrato de suelo en calicatas 1, 2 y 3 de aproximadamente 2.5 m de espesor, entre las profundidades 1.5 y 4.0 m.</p> <p>Resultados de ensayos de contenido de materia orgánica, superior al 60 %.</p>
Los Lagos	Loteo cardonal, etapa 6	Puerto Montt	Primer horizonte de materia vegetal orgánico, color café oscuro de consistencia blanda, de origen natural y artificial, de espesores entre 0.6 y 1.6 m.
Los Lagos	Viviendas sociales localidad de Quellón.	Chiloé	13 calicatas. Se aprecia un horizonte de limos orgánicos e inorgánicos color café, olor terreo, consistencia blanda y humedad media, de espesores variables de entre 0.2 y 3.5 m, este estrato está presente en todas las calicatas.
Los Lagos	Construyendo futuro	Puerto Montt, sector cardonal, camino Tepual	8 calicatas. Se apreció un primer horizonte compuesto de material orgánico de limos, con presencia de materia orgánica, color café oscuro y origen natural, este estrato lo subyace uno de limo inorgánico, color café claro, saturado, consistencia blanda, estructura homogénea, origen natural, mediana presencia de materia orgánica, no se indica el espesor de dicho estrato.
Los Lagos	Loteo 138 viviendas	Dalcahue	11 calicatas. Se aprecia un primer horizonte compuesto por un material vegetal, color café de consistencia blanda y origen natural, de espesores entre 0.5 y 1.7 m. Luego se encuentra un horizonte

			de arenas limosas, de graduación fina, sin presencia de gravas.
Los Lagos	Las Camelias	Puerto Montt	Horizonte de material limoso, orgánico, de consistencia blanda, color café oscuro, con presencia de escombros y basura en algunos sectores, humedad alta, resistencia seca baja y origen no definido, espesores desde los 0.2 hasta los 1.1 m.
X Los Lagos	Viviendas Esperanza unidad las Camelias	Puerto Montt	Primer horizonte compuesto por capa de material orgánico de limos con presencia de materia orgánica, color café oscuro y origen natural, este estrato lo subyace un estrato de limo inorgánico, color café claro, saturado, consistencia blanda, mediana presencia de materia orgánica, de espesor entre 0.7 y 0.9 (m). Finalmente un estrato de material granular, compuesto de gravas en matriz arenosa.
X Los Lagos	150 viviendas comité Futahuillmapu	Puerto Montt	Horizonte 1 suelos compuestos por limos con presencia de materia orgánica, color café oscuro y café claro de origen natural, de espesores entre los 0.5 y 1.2 (m). Finalmente un horizonte de material granular, compuesto de gravas en matriz arenosa, de compacidad medianamente densa.
X Los Lagos	Vivienda Las Amapolas	Río Negro	Primer estrato de arena limosa, orgánica, color negro, con un 25% aproximado de material bajo 0.08 (mm), presencia de raicillas, olor terreo, resistencia seca muy baja, plasticidad baja, estado húmedo, compacidad suelta, origen natural, abundante presencia de materia orgánica, espesor promedio de 1.8 (m).
X Los Lagos	Loteo René Rebolledo	Osorno	Primer horizonte compuesto por dos limos de consistencia blanda, color café, con indicios de

			materia orgánica, humedad alta y origen natural, presenta espesores desde los 0.5 a los 1.5 (m).
X Los Lagos	Salvador allende, cardonal 255	Puerto Montt	Primer horizonte de limos con presencia de materia orgánica, color café oscuro y café claro, en algunos sectores se observa material de relleno no controlado, este horizonte se considera para el proyecto material de escarpe y presenta espesores desde 0.5 hasta 1.2 (m).
X Los Lagos	250 viviendas sociales Fresia	Fresia	Primer estrato de material compuesto por limo orgánico, color café, resistencia seca muy baja, plasticidad media, estado humedad saturado, origen excedente de escarpes, alta presencia de materia orgánica, espesores entre 0.8 y 1.4 (m).
XI Aysén	Arroyo el divisadero	Coyhaique, sector galpón municipal	9 calicatas, se identificaron en todas ellas un primer estrato de suelo vegetal entre 0.70 m y 1.00 m de espesor.
XI Aysén	Loteo escuela agrícola	Coyhaique	15 calicatas, se identificaron en todas ellas dos estratos bien definidos, en primer lugar, una capa de suelo vegetal de espesor variable entre 0.80 m y 1.10 m y posteriormente, estratos alternados de suelo fino conformados por limos, arcillas y arenas limo arcillosas con presencia de arenas, gravas y bolones.
XI Aysén	Golpeando puertas por un futuro hogar	Puerto Aysén	Informe solicitado por el SERVIU de esta región debido a que 24 casas presentan asentamientos verticales y diferenciales. Las principales viviendas afectadas por estos asentamientos son las ubicadas en las manzanas B y C de esta población (informe indica un asentamiento máximo de 44 cm). La manzana B presenta 10 casas afectadas, mientras que en la manzana C son

			14 viviendas. El estudio indicó que estas viviendas están constituidas principalmente por un relleno superficial gravo arenoso, de profundidad variable entre 1.3 y 2.7 (m). Posterior a él, se encuentra un suelo natural, el cual está compuesto por un estrato de limo con presencia de materia orgánica (mayor a 12%).
XI Aysén	Comités La alborada, los Álamos y sueños de un hogar	Puerto Aysén	10 calicatas, en las N°6, N°7 y N°8 se detectaron dos horizontes, el primero una potente capa vegetal de hasta 1.00 m de espesor y finalmente un limo arcilloso de consistencia blanda, con presencia de raicillas y troncos.
XI Aysén	Villa horizonte	Puerto Aysén	Se identificaron claramente 3 estratos bien definidos, en primer lugar, una capa de suelo vegetal con ramas, troncos y de un espesor entre 1.30 y 1.70 m respecto del NTN; posteriormente, se observó un suelo fino limoso de consistencia blanda y finalmente, una arena limosa saturada de compacidad suelta.
XI Aysén	Nuevo horizonte	Puerto Cisnes	10 calicatas, donde se observó en la mayoría de ellas un primer estrato de espesores entre 0.60 m y 2.70 m, compuesto de suelo vegetal y turbas. Posteriormente, se pudo apreciar un estrato de arena con presencia de finos y compacidad suelta.
XI Aysén	Río Cisnes	Puerto Cisnes	Presencia variable de suelo vegetal y turba de espesores entre los 1.50 m y 2.7 m de espesor.
XII Magallanes	Enrique Abello chacra 17	Punta arenas	Presencia de turba bajo estratos arcillosos, alcanzando profundidades entre 1.1 y 2.3m.

XII Magallanes	Arturo Pratt	Punta Arenas	9 calicatas, se detectó un potente estrato de relleno heterogéneo, compuesto de escombros, suelo orgánico, bolsas plásticas, etc. Dicho relleno, tiene un espesor variable entre 3.50 y 5.60 m, sólo en las calicatas N°1, N°2, N°3, y N°9, se observó el suelo natural, correspondiente a una arena limo arcillosa color gris.
XII Magallanes	Estudio de terreno lote A-1X-2	Punta Arenas	Presencia de un relleno heterogéneo y turba, con un espesor variable entre 0.40 m y 2.70 m
XII Magallanes	Prolongación Enrique Abello lote A2	Punta Arenas	7 calicatas, se detectó relleno en algunos sectores de material heterogéneo, en las calicatas N°5 y N°6, se encontró un estrato de turba a partir de los 2.70 m de profundidad.

## Anexo B: Curvas variación de espesor vs raíz de tiempo

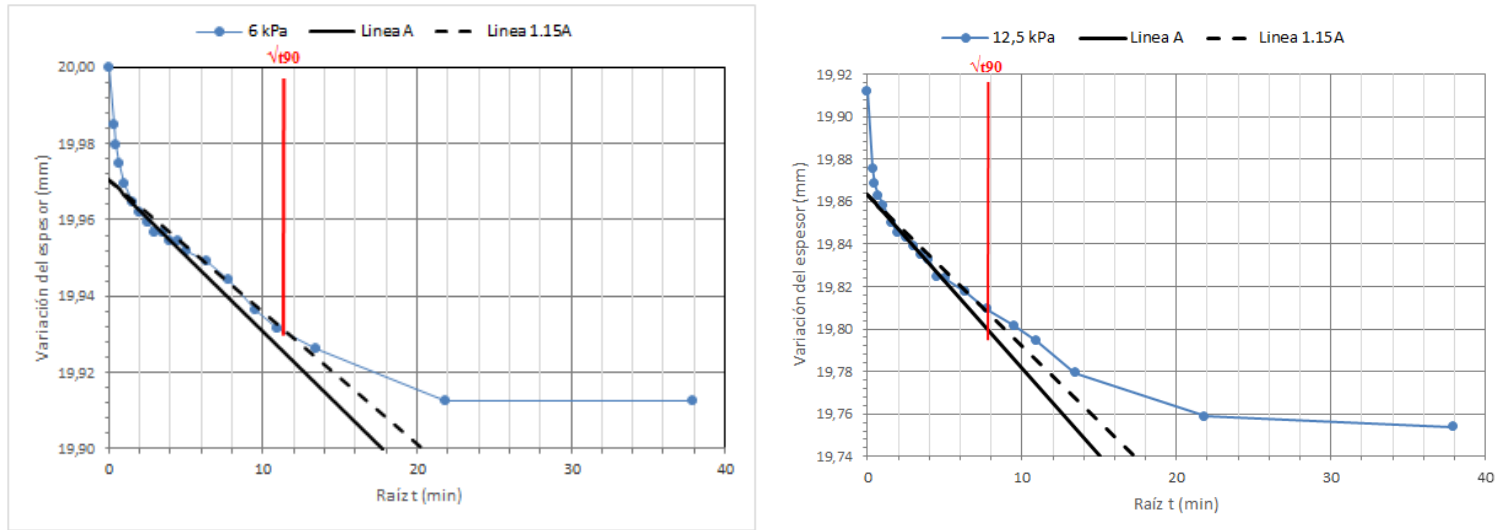


Figura A.1: Muestra N°4 Puerto Montt. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

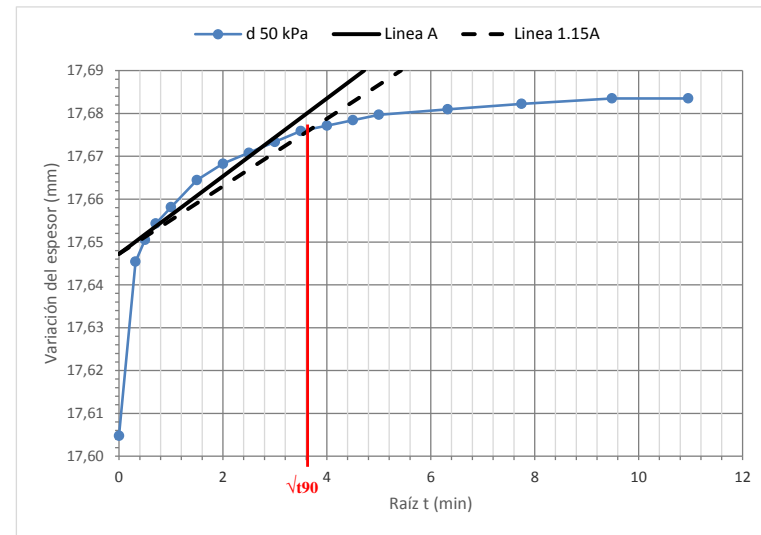
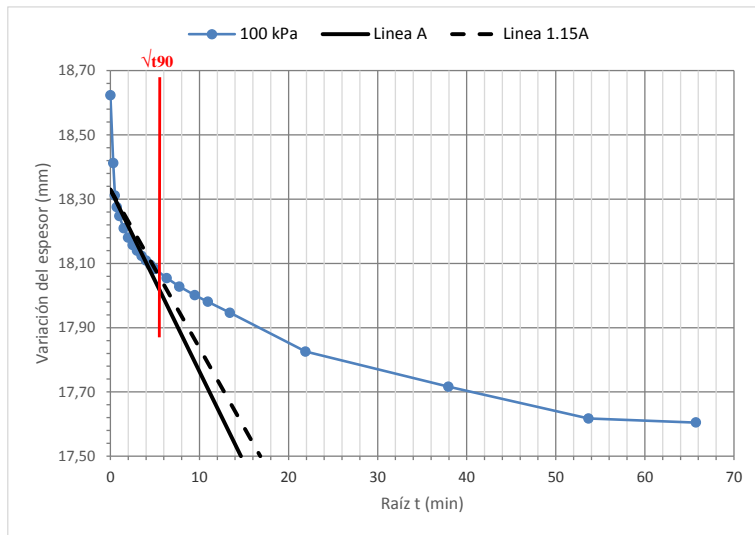
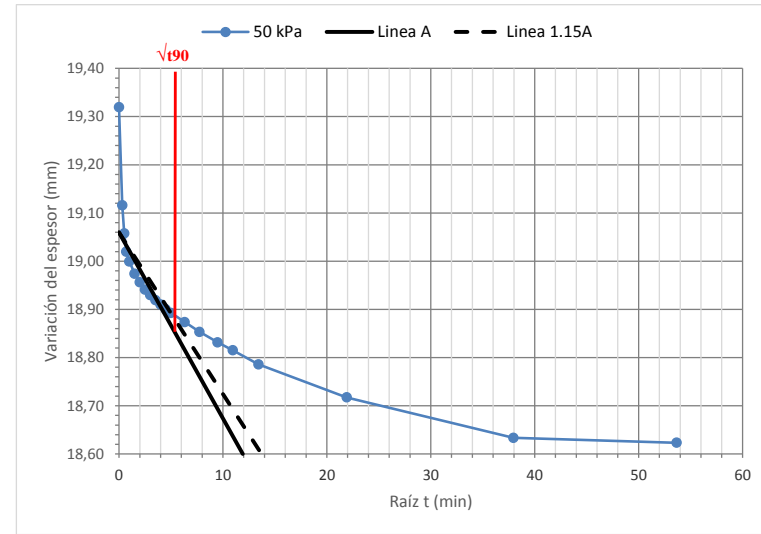
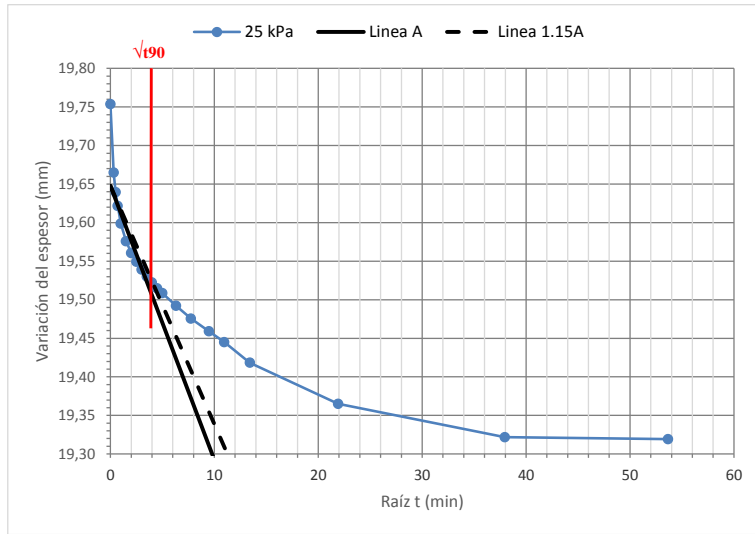


Figura A.2: Muestra N°4 Puerto Montt. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

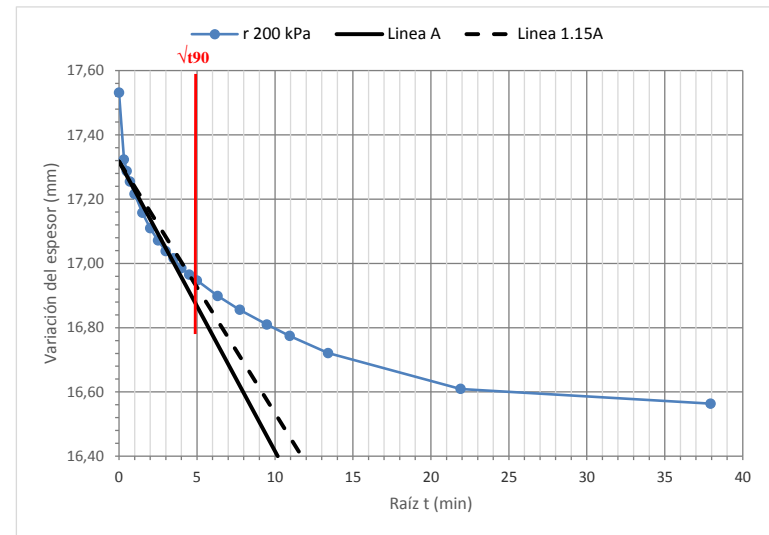
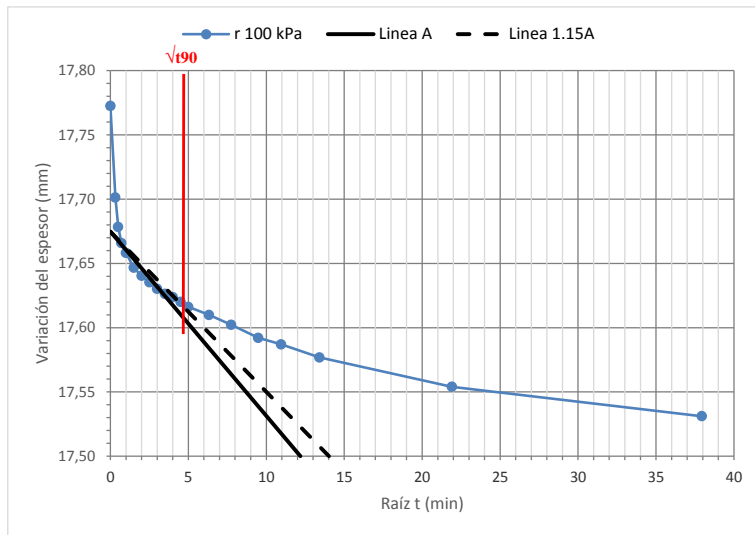
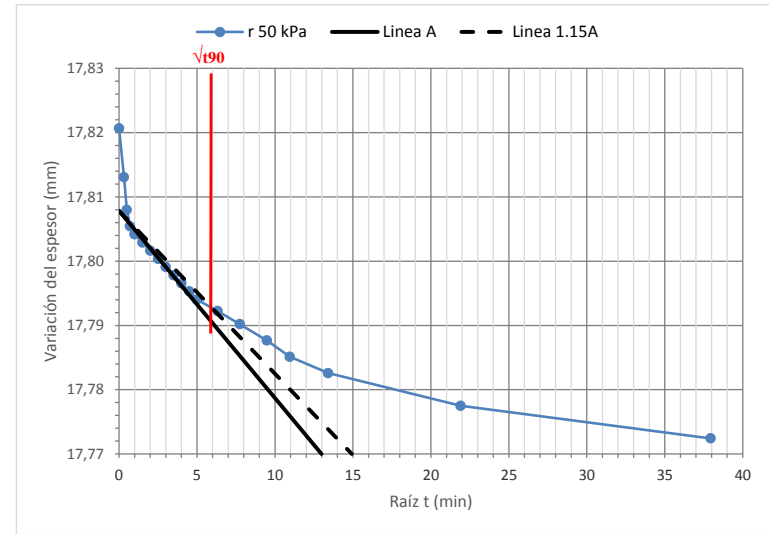
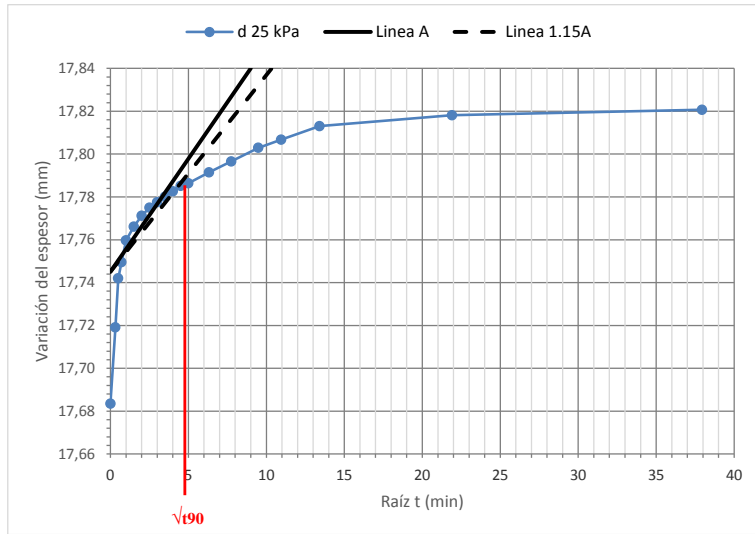


Figura A.3: Muestra N°4 Puerto Montt. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

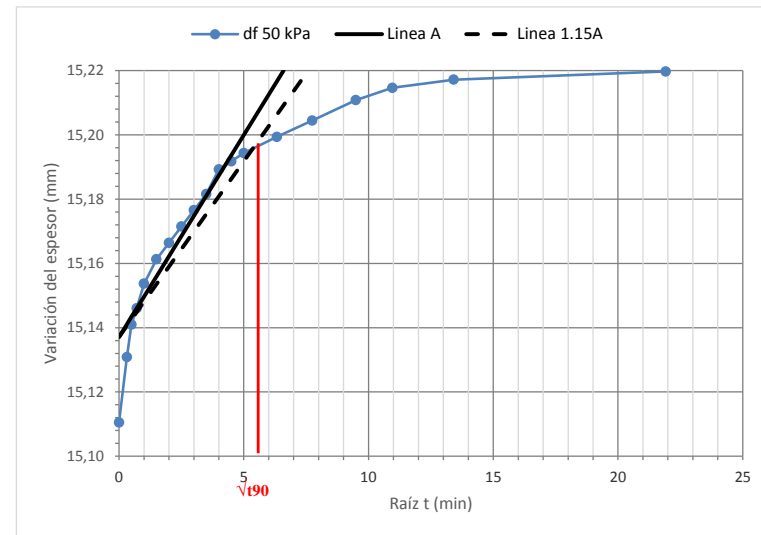
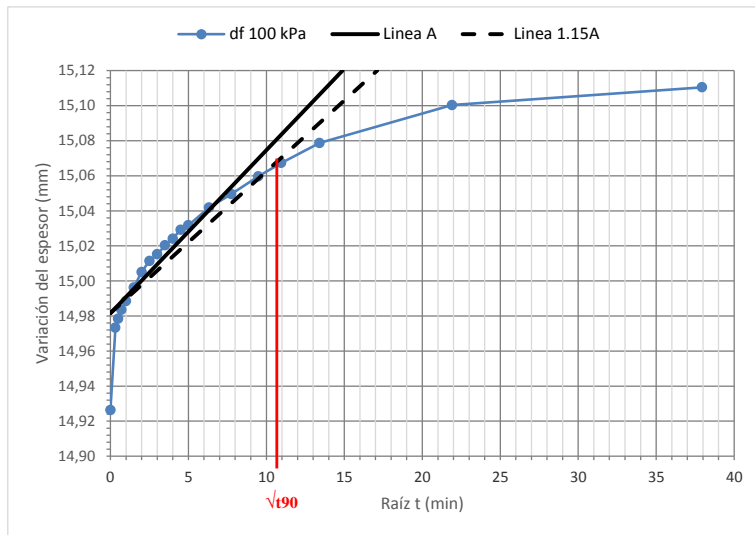
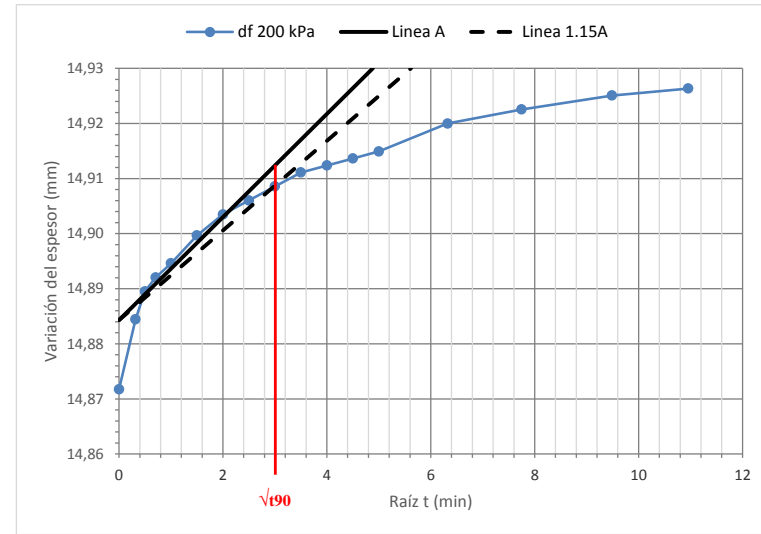
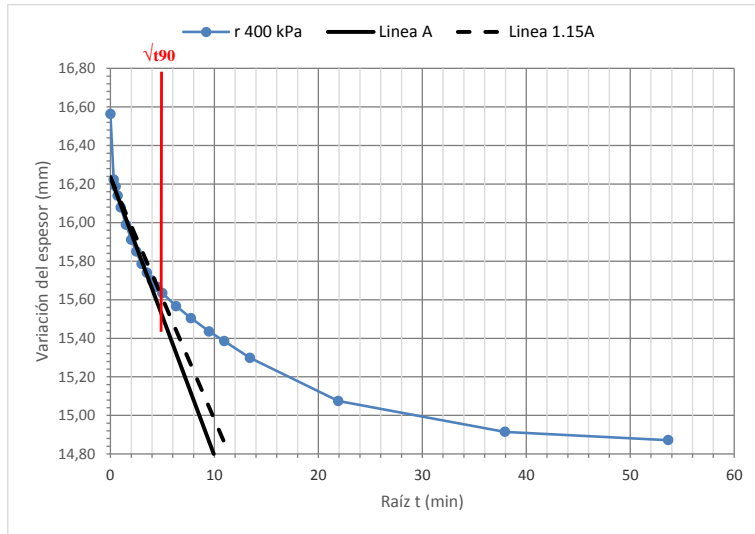


Figura A.4: Muestra N°4 Puerto Montt. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

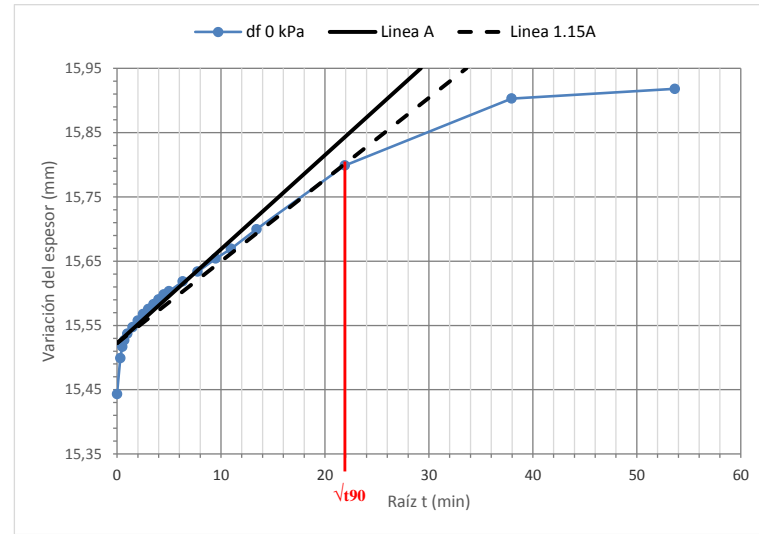
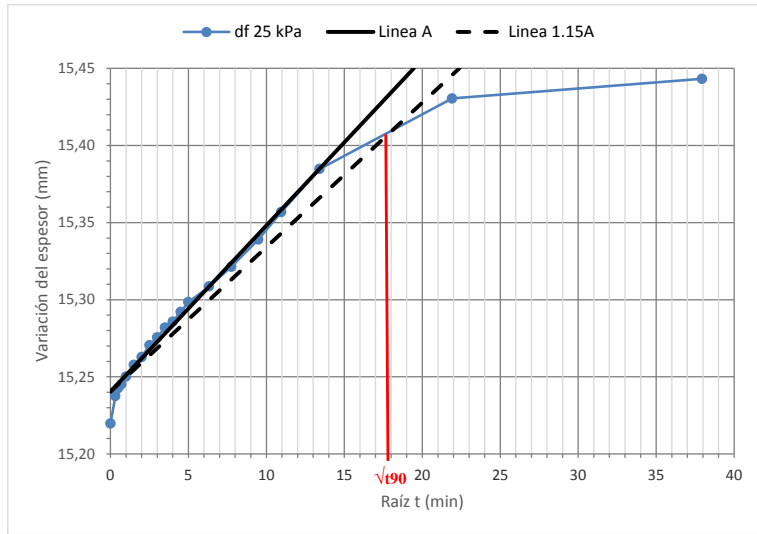


Figura A.5: Muestra N°4 Puerto Montt. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

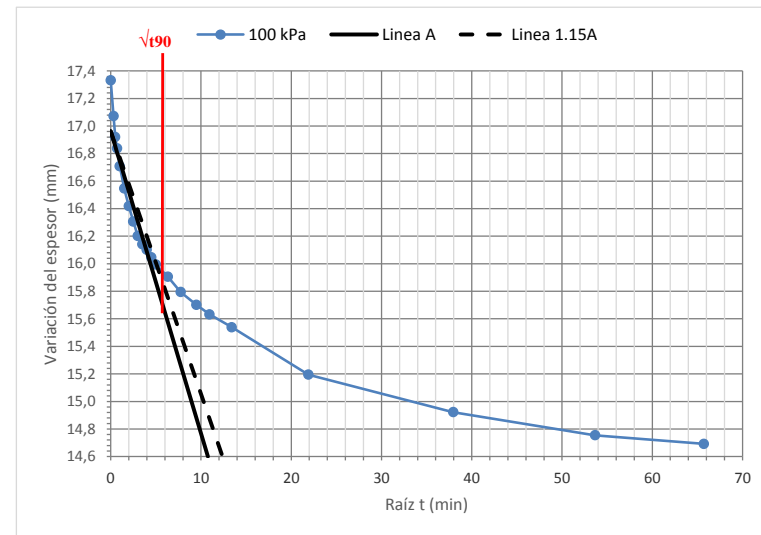
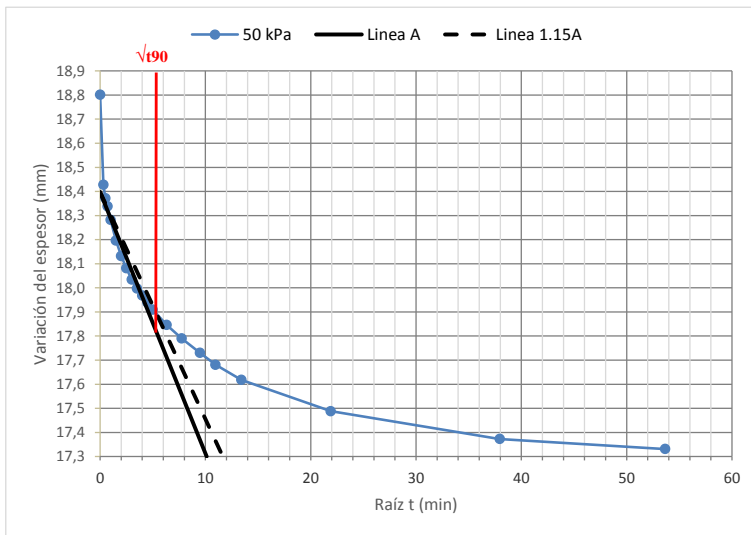
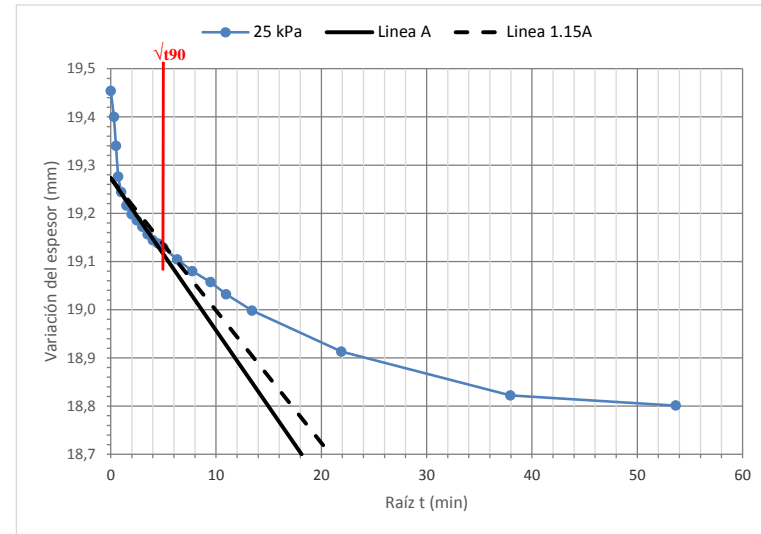
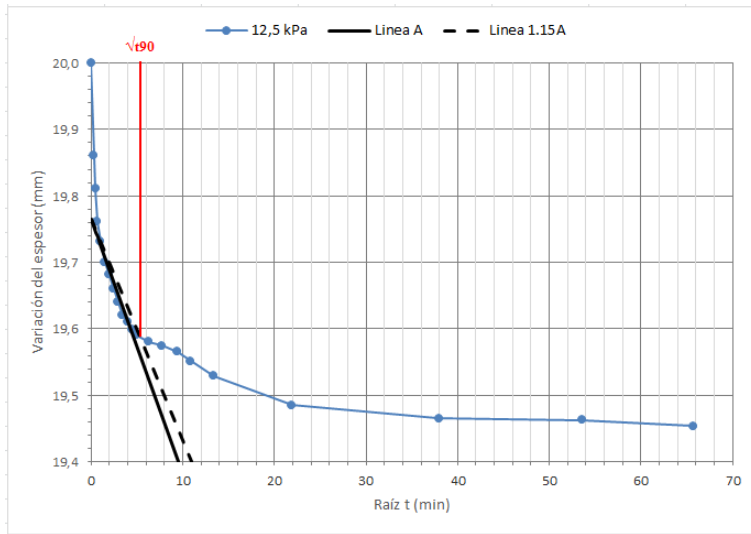


Figura A.6: Muestra N°16 Aysén. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

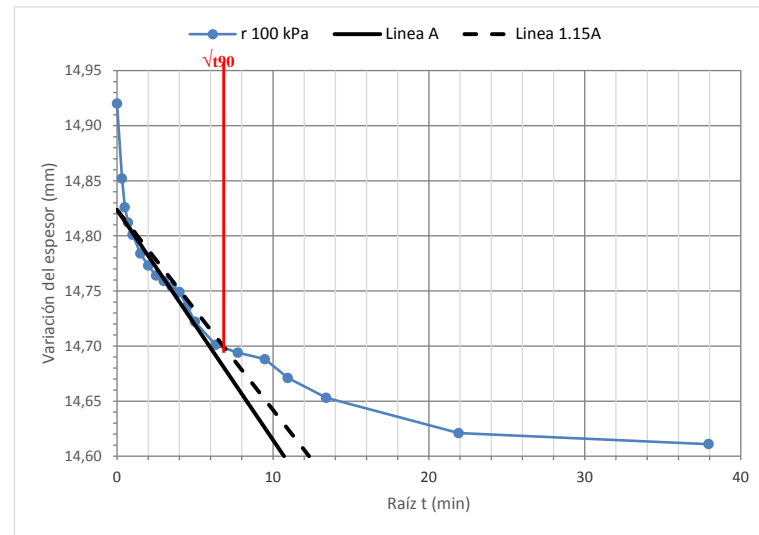
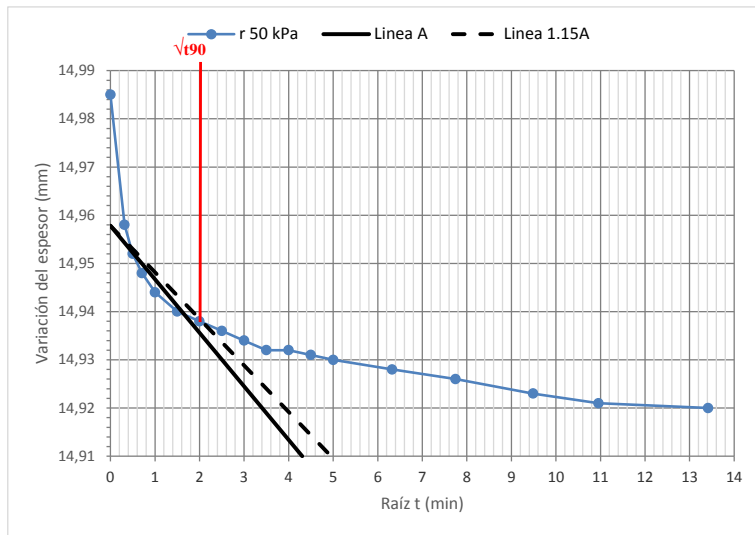
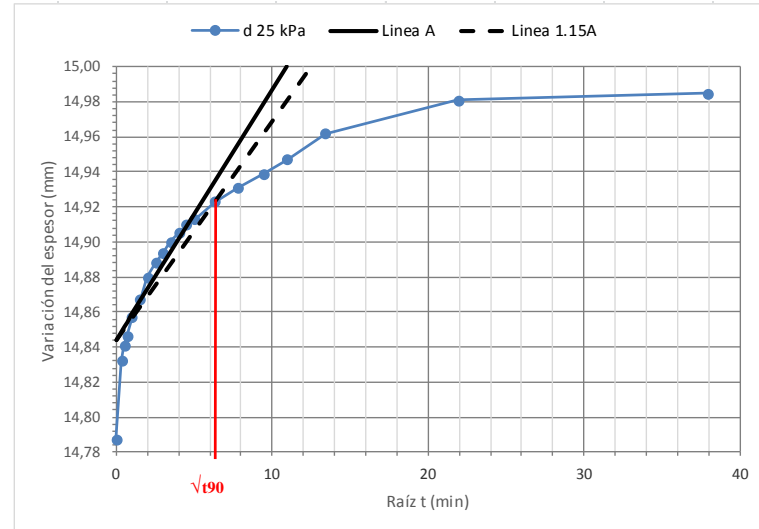
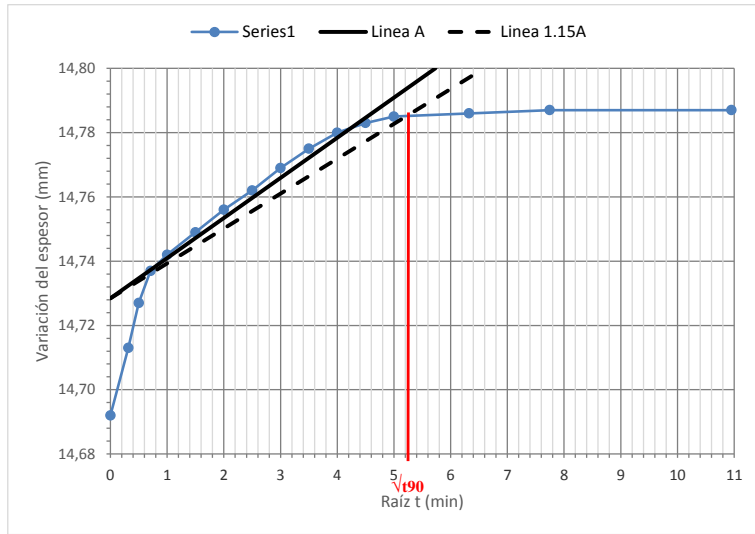


Figura A.7: Muestra N°16 Aysén. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de  $C_v$ .

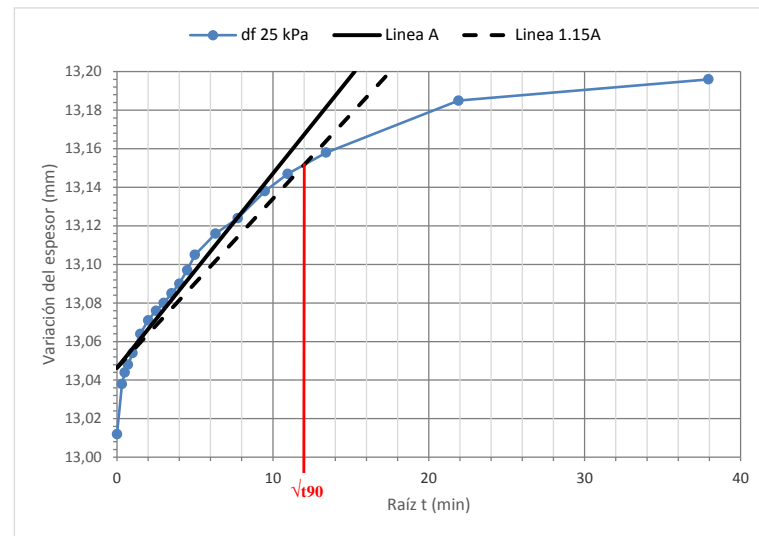
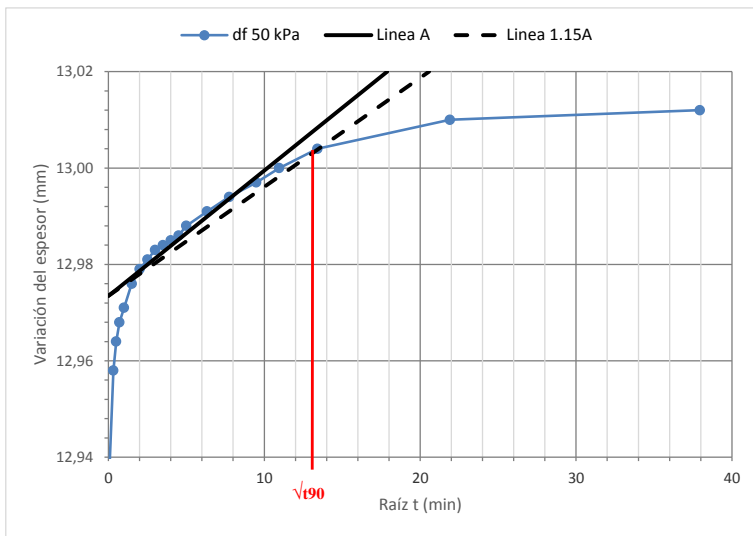
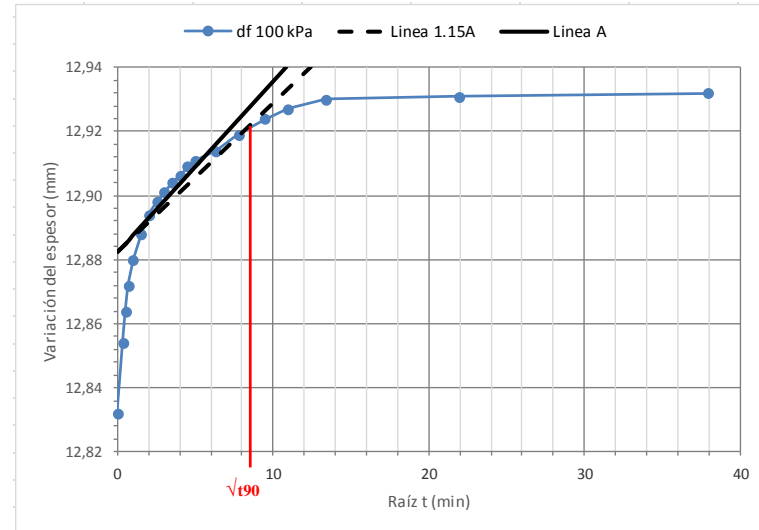
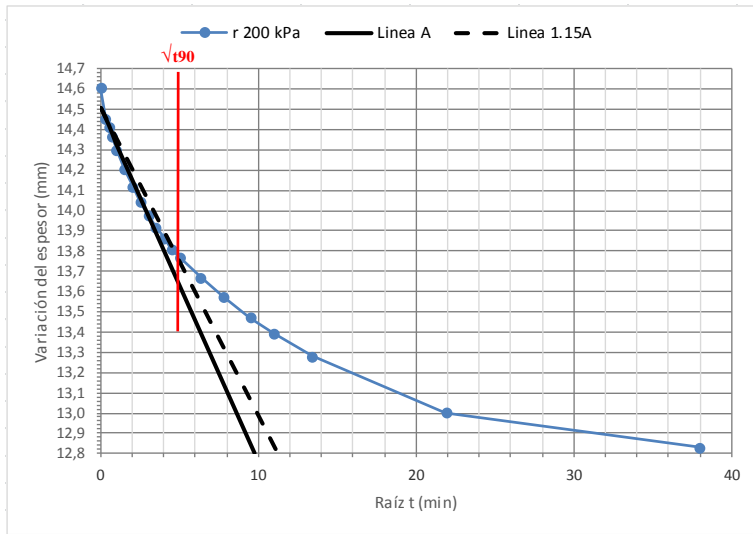


Figura A.8: Muestra N°16 Aysén. Curvas de variación del espesor versus raíz del tiempo para cálculo de

