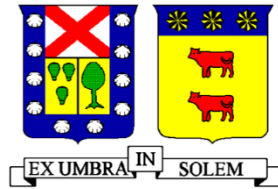


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAISO – CHILE



EFFECTOS DE MEZCLAS DE CLORUROS EN LA HUMEDAD DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS

CHRISTIAN ANDRÉS HEITZER MUÑOZ

Memoria para optar al Título de  
Ingeniero Civil

Profesor Guía

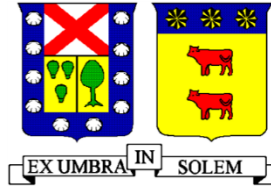
Álvaro González Vacarezza

Profesor Co-referente

Carlos Wahr Daniel

Octubre de 2017

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAISO – CHILE



EFFECTOS DE MEZCLAS DE CLORUROS EN LA HUMEDAD DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS

Memoria de titulación presentada por  
CHRISTIAN ANDRÉS HEITZER MUÑOZ

Como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil

Profesor Guía  
Álvaro González Vacarezza

Profesor Co-referente  
Carlos Wahr Daniel

Octubre de 2017

(Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco).

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero dedicar este trabajo y agradecer a mi familia, especialmente a mis padres por su constante apoyo y motivación durante toda mi carrera universitaria.

A mi polola y amigos de universidad, por su cariño, apoyo y consejos entregados durante toda esta etapa.

Al profesor Álvaro González, por haber confiado en mí el desarrollo de este trabajo, y haberme entregado las herramientas necesarias para llevarlo a cabo.

A los profesores Carlos Wahr y Rodrigo Delgadillo, por su buena disposición a formar parte de la comisión evaluadora.

A la empresa Las Chilcas, por haberme dado las facilidades de poder trabajar y realizar esta memoria de forma paralela.

Al Laboratorio de Obras Civiles de la UDD y las personas que trabajan ahí, por su constante ayuda durante la realización de los trabajos experimentales.

Por último, agradecer a los integrantes del Club de Escalada de la UDD por su amistad, buena onda, y momentos de relax en el muro después de cada sesión de trabajo en el laboratorio.

## RESUMEN

Los caminos no pavimentados constituyen cerca del 60% de la red vial pública de caminos en Chile, siendo un factor clave en la movilidad de la población rural y de sectores productivos. Sin embargo, los caminos no pavimentados del norte del país presentan un deterioro acelerado y un mal nivel de servicio producto del clima y tránsito.

El Cloruro de Magnesio Hexahidratado ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ), también conocido como Bischofita, y el Cloruro de Sodio ( $NaCl$ ) son sales que se utilizan como estabilizadores químicos de capas de rodadura y como tratamiento para el control de polvo de caminos no pavimentados, principalmente en el norte del país y en la minería. No obstante, existe la posibilidad de mejorar el desempeño de los caminos tratados con sales mediante la mezcla de estos cloruros, lo cual fue estudiado en esta investigación.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de esta investigación será estudiar el efecto y comportamiento que tienen distintas mezclas de sales y tipos de suelos, en la absorción, retención y pérdida de humedad, para diferentes ciclos de acondicionamiento en laboratorio, con el fin de representar las condiciones dadas en terreno. Para esto se elaborarán probetas con distintos suelos, tipos y concentraciones de sales, las cuales serán acondicionadas a distintas humedades de aire y temperatura en una cámara de humedad y horno en laboratorio.

Además, en esta investigación se ajustará un modelo matemático a las curvas de humedad y temperatura en el tiempo, para los diferentes tipos de suelos y sales estudiados, con el fin de determinar el contenido de humedad de los caminos para cualquier instante de tiempo, conocida la humedad relativa del aire. Esto permitirá conocer la mezcla óptima de sal para un camino bajo distintas condiciones de humedad y temperatura encontradas en terreno.

Se comprobó la capacidad de absorción y retención de humedad de las muestras con sales, especialmente las con Bischofita, debido principalmente a su propiedad higroscópica. Además, las mezclas con sales permiten retardar la evaporación en suelos, lo que se traduce en una disminución en el consumo de agua para riego de los caminos, un mejor nivel de servicio y menores costos de mantención. Finalmente, el modelo matemático de Kelvin-Voigt utilizado resultó adecuado para modelar la absorción y/o evaporación de agua de las muestras en estudio.

## ABSTRACT

Unpaved roads constitute more than 60% of the public road network in Chile, being a key factor in the mobility of the rural population and productive sectors. However, the unpaved roads of northern Chile show an accelerated deterioration and a poor level of service due to climate and traffic.

Magnesium Chloride Hexahydrate ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), or also commonly known as Bischofite and Sodium Chloride ( $\text{NaCl}$ ), are salts that are used as chemical stabilizers of rolling layers and as a treatment for the control of dust of unpaved roads, Mainly in the north of the country and in mining. However, there is a possibility of improving the performance of salt-treated roads by mixing these chlorides, which was studied in this research.

The objective of this research was to study the effect and behavior of different mixtures of salts and soil types, in the absorption, retention and loss of moisture, for different conditioning cycles in the laboratory, to represent the conditions given in terrain. For this, specimens were prepared with different soils, types and concentrations of salts, which were conditioned to different air humidity and temperature in a humidity chamber and laboratory furnace. In the research, a mathematical model was also fitted to the moisture and temperature curves over time for diverse types of soils and salts, to determine the soil moisture for any instant of time, known relative air humidity. This will allow to know the optimal mixture of salt for different conditions of humidity and temperature found in terrain.

The capacity of absorption and moisture retention of samples with salts, especially those with Bischofite, was verified, mainly due to its hygroscopic property. In addition, mixtures with salts allow to retard evaporation in soils, which results in a reduction in water consumption for irrigation of the roads, a better level of service and lower maintenance costs.

Finally, the Kelvin-Voigt mathematical model used was adequate to model the water absorption and / or evaporation of the samples under study.

# INDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE GENERAL .....</b>	<b>IV</b>
<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. CAMINOS NO PAVIMENTADOS Y USO DE CLORUROS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. MOTIVACIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA U OPORTUNIDAD.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. HIPÓTESIS.....</b>	<b>6</b>
<b>1.5. OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
<b>1.6. METODOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
<b>1.7. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....</b>	<b>8</b>
<b>2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y TEORÍA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. CAMINOS NO PAVIMENTADOS.....</b>	<b>9</b>
2.1.1. TIPOS DE DETERIORO Y FACTORES QUE INTERVIENEN .....	9
2.1.2. ESTABILIZACIÓN COMO SOLUCIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS .....	11
2.1.3. CONSERVACIÓN .....	15

<b>2.2. USO DE SALES PARA ESTABILIZACIÓN Y SUPRESIÓN DE POLVO EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS.....</b>	<b>16</b>
2.2.1. CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS .....	18
2.2.2. ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE ESTABILIZACIÓN .....	21
2.2.3. CONCEPTOS DE HUMEDAD .....	24
2.2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS .....	25
2.2.5. CARACTERÍSTICAS DEL CLORURO DE MAGNESIO HEXAHIDRATADO (BISCHOFITA) .....	27
2.2.6. CARACTERÍSTICAS DEL CLORURO DE SODIO .....	31
2.2.7. MOVIMIENTO DE LAS SALES DEBIDO A CAMBIOS DE HUMEDAD .....	33
2.2.8. ESTUDIOS RELACIONADOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-SAL .....	35
2.2.9. MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS SUELO-SAL.....	37
<b>2.3. DESARROLLOS RECIENTES.....</b>	<b>39</b>
2.3.1. SITUACIÓN EN CHILE Y EXPERIENCIA MINERA EN CAMINOS .....	39
2.3.2. SITUACIÓN INTERNACIONAL .....	42
<b>3. BASES DEL TRABAJO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2. TRABAJO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
3.2.1. DEFINICIÓN Y MUESTREO DE MATERIALES GRANULARES A ESTUDIAR .....	47
3.2.2. PREPARACIÓN DE MEZCLAS Y CONFECCIÓN DE BANDEJAS .....	53
3.2.3. CICLOS DE ACONDICIONAMIENTO (SECADO/CURADO).....	55
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1. PÉRDIDA, RETENCIÓN Y ABSORCIÓN DE HUMEDAD .....</b>	<b>59</b>
4.1.1. ENSAYOS PREVIOS CON PROBETAS CILÍNDRICAS SIN SECADO INICIAL.....	59
4.1.2. ENSAYOS PREVIOS CON PROBETAS CILÍNDRICAS CON SECADO INICIAL .....	61
4.1.3. ENSAYOS PREVIOS CON BANDEJAS.....	65

4.1.4.	ENSAYOS CON BANDEJAS SEGÚN METODOLOGIA.....	67
4.1.5.	ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS.....	87
<b>5.</b>	<b>MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE CURVAS DE HUMEDAD .....</b>	<b>89</b>
5.1.1.	INTRODUCCIÓN.....	89
5.1.2.	ADAPTACIÓN DEL MODELO DE KELVIN-VOIGT .....	91
5.1.3.	CÁLCULO DE PARÁMETROS PARA AJUSTE DEL MODELO .....	95
5.1.4.	CASO EJEMPLO DE OBTENCIÓN DE CURVAS DE HUMEDAD DEL SUELO EN EL TIEMPO .....	100
5.1.5.	ENSAYOS DE COMPROBACIÓN EN LABORATORIO .....	107
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>110</b>
6.1.	CONCLUSIONES .....	111
6.2.	RECOMENDACIONES .....	114
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>118</b>
A.	DETALLES DE ENSAYOS DE MUESTREO DE SUELOS.....	118
B.	DATOS ENSAYOS DE HUMEDAD DE BANDEJAS .....	125

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Caminos sin tratamiento de control de polvo.....	4
Figura 1-2: Variación de la humedad relativa durante el día y la noche.....	5
Figura 1-3: Presencia de humedad en caminos (Halles, 2007).....	5
Figura 2-1: Estructura de camino no pavimentado.....	9
Figura 2-2: Esquema estructural de estabilización.....	17
Figura 2-3: Esquema estructural de tratamiento supresión de polvo.....	17
Figura 2-4: Esquema de la estructura de la lámina silíca.....	19
Figura 2-5: Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silíca.....	19
Figura 2-6: Esquema de la estructura de la lámina alumínica.....	20
Figura 2-7: Diagrama de las estructuras de (a) caolinita; (b) illita; (c) monmorilonita.....	20
Figura 2-8: Doble capa difusa (Das, 2001).....	22
Figura 2-9: Humedad relativa del aire en un volumen de 1 m <sup>3</sup> y de masa m.....	24
Figura 2-10: Salar de Atacama y proceso de obtención de la Bischofita (Vera Araya, 2001).....	27
Figura 2-11: Acopio de bischofita.....	28
Figura 2-12: Riego para tratamiento de control de polvo.....	29
Figura 2-13: Tensión superficial de distintos Cloruros (Vera-Thenoux, 2001).....	32
Figura 2-14: Capacidad Higroscópica de distintas sales (Halles, 2007).....	33
Figura 2-15: Movimiento de humedad y sales en la carpeta de rodado (Vera, 2001).....	34
Figura 2-16: Fenómeno de cristalización superficial en carpeta de rodado (Halles, 2007).....	38
Figura 3-1: Esquema trabajo experimental.....	46
Figura 3-2: De izquierda a derecha: Suelo Maicillo (NP), Suelo Arcilloso (IP = 20).....	47
Figura 3-3: Análisis granulométrico de suelos.....	48
Figura 3-4: Curvas granulométricas de suelos.....	49
Figura 3-5: Determinación de Límites de Atterberg.....	50
Figura 3-6: Moldes para probetas de ensayos CBR.....	52

Figura 3-7: Muestra de bischofita para mezcla .....	53
Figura 3-8: Bandejas compactadas listas para acondicionamiento .....	54
Figura 3-9: Acondicionamiento en Cámara de humedad (izquierda) y Horno (derecha).....	58
Figura 3-10: Control de humedad y temperatura en Cámara de Humedad.....	58
Figura 4-1: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=0.....	59
Figura 4-2: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=20.....	60
Figura 4-3: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=0.....	61
Figura 4-4: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=20.....	61
Figura 4-5: Probetas al final del período de secado en Horno.....	63
Figura 4-6: Probetas en Cámara de Humedad al término del período de acondicionamiento.....	64
Figura 4-7: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=0.....	65
Figura 4-8: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=20.....	66
Figura 4-9: Suelo NP / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 20°C.....	67
Figura 4-10: Suelo NP / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 30°C.....	68
Figura 4-11: Suelo NP / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 50°C.....	68
Figura 4-12: Suelo NP / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 20°C.....	69
Figura 4-13: Suelo NP / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 30°C.....	70
Figura 4-14: Suelo NP / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 50°C.....	70
Figura 4-15: Suelo NP / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 20°C.....	71
Figura 4-16: Suelo NP / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 30°C.....	72
Figura 4-17: Suelo NP / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 50°C.....	72
Figura 4-18: Suelo IP=10 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 20°C.....	74
Figura 4-19: Suelo IP=10 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 30°C.....	74
Figura 4-20: Suelo IP=10 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 50°C.....	75
Figura 4-21: Suelo IP=10 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 20°C.....	76
Figura 4-22: Suelo IP=10 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 30°C.....	76
Figura 4-23: Suelo IP=10 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 50°C.....	77
Figura 4-24: Suelo IP=10 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 20°C.....	78

Figura 4-25: Suelo IP=10 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 30°C. ....	78
Figura 4-26: Suelo IP=10 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 50°C. ....	79
Figura 4-27: Suelo IP=20 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 20°C. ....	80
Figura 4-28: Suelo IP=20 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 30°C. ....	80
Figura 4-29: Suelo IP=20 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 50°C. ....	81
Figura 4-30: Suelo IP=20 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 20°C. ....	82
Figura 4-31: Suelo IP=20 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 30°C. ....	83
Figura 4-32: Suelo IP=20 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 50°C. ....	83
Figura 4-33: Suelo IP=20 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 20°C. ....	85
Figura 4-34: Suelo IP=20 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 30°C. ....	85
Figura 4-35: Suelo IP=20 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 50°C. ....	86
Figura 5-1: Proceso de modelación matemática. ....	89
Figura 5-2: Representación esquemática del modelo de Kelvin-Voigt. ....	91
Figura 5-3: Respuesta del modelo de Kelvin-Voigt en fluencia y recuperación de fluencia. ....	92
Figura 5-4: Análogo modelo matemático de Kelvin-Voigt a utilizar. ....	93
Figura 5-5: Analogía de parámetros a calcular utilizando modelo de Kelvin-Voigt. ....	93
Figura 5-6: Correlación de datos experimentales v/s teórico. ....	96
Figura 5-7: Ajuste de curvas de humedad ensayos v/s modelo. ....	96
Figura 5-8: Esquema de obtención de la humedad del suelo a partir de datos de humedad relativa. ....	100
Figura 5-9: Ejemplo variación humedad relativa durante el día y la noche. ....	101
Figura 5-10: Ubicación comuna de Camarones, Región de Arica y Parinacota. ....	101
Figura 5-11: datos de Humedad Relativa, comuna de Camarones. ....	102
Figura 5-12: Gráfico humedad del suelo v/s humedad relativa v/s tiempo, para distintas mezclas de sales. ....	106
Figura 5-13: Ensayo de comprobación para suelo NP. ....	107
Figura 5-14: Ensayo de comprobación para suelo IP=10. ....	108
Figura 5-15: Ensayo de comprobación para suelo IP=20. ....	108
Figura 5-16: Humedad de suelo para IP=10 calculado en base al modelo matemático propuesto. ....	109
Figura A-1: Curva de fluidez y determinación gráfica LL para suelo Mezcla. ....	119

Figura A-2: Propiedades suelo Arcilloso en estudio..... 119

Figura A-3: Curva ensayo Proctor Modificado para suelo NP..... 120

Figura A-4: Curva ensayo Proctor Modificado para suelo IP=10..... 121

Figura A-5: Curva Carga vs. Penetración suelo NP..... 122

Figura A-6: Curva Carga vs. Penetración suelo IP=10..... 122

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Dosis de Bischofita recomendada en función de la plasticidad del material granular. ....	28
Tabla 2-2: Caminos pavimentados con sales del plan "Caminos Básicos 5000" (MOP, 2003).....	39
Tabla 3-1: Granulometría materiales utilizados.....	49
Tabla 3-2: Límites de Atterberg para muestras de suelos. ....	50
Tabla 3-3: Resultados ensayo Proctor y CBR.....	51
Tabla 3-4: Matriz experimental.....	56
Tabla 3-5: Resumen parámetros de ensayo.....	56
Tabla 3-6: Nomenclatura de mezclas.....	57
Tabla 5-1: Valores de los parámetros obtenidos para el suelo y la mezcla en estudio.....	95
Tabla 5-2 Parámetros E y $\lambda$ obtenidos para suelos NP e IP=10.....	97
Tabla 5-3:Parámetros E y $\lambda$ obtenidos para suelo IP=20.....	98
Tabla 5-4: Obtención parámetros promedio.....	99
Tabla 5-5: Valores de parámetros E y $\lambda$ a utilizar.....	100
Tabla 5-6: Valor de parámetros E y $\lambda$ para suelo IP=10 según tipo de mezcla.....	104
Tabla 5-7: Cálculo humedad del suelo para distintas mezclas.....	105
Tabla A-1: Resultados para determinación de LL y LP suelo Mezcla.....	118
Tabla A-2: Resultados para determinación de humedad real para suelo NP.....	120
Tabla A-3: Resultados para determinación de D.M.C.S. para suelo NP.....	120
Tabla A-4: Resultados para determinación de humedad real para suelo IP=10.....	121
Tabla A-5: Resultados para determinación de D.M.C.S. para suelo IP=10.....	121
Tabla A-6: Datos test ensayo CBR suelo NP.....	123
Tabla A-7: Datos test ensayo CBR suelo IP=10.....	124
Tabla B-1: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 20°C.....	125
Tabla B-2: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 30°C.....	125
Tabla B-3: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 50°C.....	125

Tabla B-4: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 20°C. ....	126
Tabla B-5: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 30°C. ....	126
Tabla B-6: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 50°C. ....	126
Tabla B-7: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 20°C. ....	127
Tabla B-8: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 30°C. ....	127
Tabla B-9: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 50°C. ....	127
Tabla B-10: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 20°C. ....	128
Tabla B-11: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 30°C. ....	128
Tabla B-12: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 50°C. ....	128
Tabla B-13: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 20°C. ....	129
Tabla B-14: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 30°C. ....	129
Tabla B-15: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 50°C. ....	129
Tabla B-16: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 20°C. ....	130
Tabla B-17: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 30°C. ....	130
Tabla B-18: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 50°C. ....	130
Tabla B-19: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 20°C. ....	131
Tabla B-20: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 30°C. ....	131
Tabla B-21: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 50°C. ....	131
Tabla B-22: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 20°C. ....	132
Tabla B-23: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 30°C. ....	132
Tabla B-24: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 50°C. ....	132
Tabla B-25: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 20°C. ....	133
Tabla B-26: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 30°C. ....	133
Tabla B-27: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 50°C. ....	133

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1. CAMINOS NO PAVIMENTADOS Y USO DE CLORUROS**

Los caminos no pavimentados y los caminos de bajo volumen de tránsito son de gran importancia en la infraestructura de los países. En Chile, cerca del 60% de las vías públicas administradas por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas son no pavimentadas (MOP, 2016), y aunque no existen estadísticas oficiales, se estima que la amplia mayoría de los caminos privados son no pavimentados. A nivel mundial, aproximadamente el 43% de los caminos no tienen ningún tipo de recubrimiento (asfalto, hormigón, o material granular seleccionado) y el 70-75% de los caminos tienen un tránsito menor a 400 vehículos diarios, es decir, del orden de 25 millones de kilómetros de caminos (The World Bank, 2016).

Para mejorar las condiciones de servicio de los caminos no pavimentados se puede recurrir a la estabilización o mejoramiento del material granular o suelo del camino por medios mecánicos o químicos. La estabilización mecánica es una solución que se logra a través de la compactación y mejoramiento de la estructura granulométrica mediante mezcla de distintos tipos de suelos (INN, 2001), mientras que la segunda consiste en la aplicación de aditivos químicos como sales, enzimas, polímeros y otros subproductos del petróleo, que se mezclan con el material granular o suelo a tratar, según dosis previamente definidas. Algunas de estas soluciones requieren adicionalmente un curado posterior a su aplicación.

La estabilización química en climas con precipitaciones bajas o moderadas normalmente tiene por objetivo principal detener la pérdida de humedad en la superficie de rodado que conforma el camino. Una baja humedad en el camino hace que se pierda la cohesión aparente entre las partículas que lo conforman, por lo que con el paso de los vehículos el material fino se levanta y se pierde en forma de polvo. Esto es especialmente notorio en caminos que no tienen capa de grava y donde los vehículos circulan directamente sobre el material natural. Si bien el camino puede tener la resistencia adecuada para resistir las cargas de tránsito, la condición funcional de dichos caminos en condición seca o de baja humedad suele ser deficiente debido a la cantidad de material particulado que generan los vehículos que lo utilizan.

Para mejorar la condición de los caminos no pavimentados en zonas de baja humedad se han aplicado en Chile en forma creciente desde hace más de 15 años sales o cloruros, ya sea en materiales granulares seleccionados o disponibles en terreno, o directamente sobre suelos existentes que conforman el camino. La propiedad fundamental de los cloruros es que son higroscópicos, es decir, son capaces de captar y/o retener el agua del ambiente. Por lo tanto, al incorporarse a los materiales granulares o de subrasante, los caminos son capaces de mantener la superficie humectada y con una cohesión aparente que reduce considerablemente la cantidad de material particulado emitido ante el paso de los vehículos y aumenta el nivel de servicio y durabilidad del camino.

La principal ventaja de los cloruros frente a otro tipo de estabilizadores y/o supresores de polvo para caminos es que se obtienen en Chile para otros procesos productivos y por lo tanto tienen un costo relativamente bajo y a la vez han demostrado tener un buen desempeño. La aplicación de cloruros como estabilizador corresponde a mezclar en seco un material granular seleccionado con el cloruro a utilizar, para luego extender y compactar el material a humedad óptima para conformar el camino. La aplicación como supresor de polvo consiste en producir una salmuera o solución líquida que se aplica sólo en la superficie del camino. Actualmente existen más de 5000 kilómetros de caminos públicos administrados por el MOP que han sido estabilizados con sales (Dirección de Vialidad, 2015) y varios millones de metros cuadrados de caminos que son tratados con cloruros como supresor de polvo.

## 1.2. MOTIVACIÓN

En Chile se utilizan fundamentalmente dos cloruros para caminos: el cloruro de sodio (NaCl) o llamado simplemente 'sal' y el cloruro hexahidratado de magnesio ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) también conocido como Bischofita. Ambos tienen características químicas y físicas distintas que los hacen más adecuados para distintos tipos de clima. Por ejemplo, la Bischofita es considerablemente más higroscópica que el cloruro de sodio, por lo que su uso es más adecuado en climas más secos y con escasa precipitación. Por el contrario, en sectores costeros o donde se producen precipitaciones en ciertas épocas del año, el cloruro de sodio aparentemente es una mejor solución que la Bischofita. No obstante lo anterior, no existe una justificación de ingeniería o con fundamentos científicos ni empíricos para afirmar ni justificar cuándo se debe elegir un cloruro u otro. Es razonable pensar además que, una eventual mezcla de cloruros puede entregar un buen nivel de servicio para rangos climáticos intermedios.

De acuerdo a lo expuesto, la motivación de esta investigación, es analizar el comportamiento que tienen las mezclas de Cloruros (Cloruro de Magnesio y Sodio) ante distintos escenarios de humedad, con el fin de mejorar el desempeño de los caminos tratados con sales, aplicando una dosificación adecuada y efectiva según la época del año, para mantener y asegurar un mínimo nivel de servicio de los caminos, principalmente ante problemas de emisiones de polvo y a su vez, permitir un ahorro de agua en riego de los caminos.

### 1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA U OPORTUNIDAD

El polvo en suspensión generado en los caminos es un problema de los caminos no pavimentados (Figura 1-1). Este puede afectar a la salud de los usuarios y las comunidades que viven cerca de los caminos, disminuye la seguridad vial por el efecto de reducción de la visibilidad, aumenta los costos de conservación de los caminos debido a la pérdida de finos y afecta el funcionamiento del motor y otros elementos de los vehículos. Para disminuir la emisión de material particulado en caminos no pavimentados se utiliza el Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ ) o la Bischofita ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) cuya principal característica es la higroscopía o capacidad para captar y retener el agua del aire.



*Figura 1-1: Caminos sin tratamiento de control de polvo.*

Debido al cambio de la humedad del aire, también se produce un efecto de cambio de humedad en la carpeta de rodado. Por ejemplo, es normal que durante el día la humedad relativa del aire disminuya produciendo evaporación del agua en los caminos y en consecuencia el secado de éstos, mientras que durante la noche la humedad relativa del aire aumenta, hidratando la superficie de los caminos (Figura 1-2). Este efecto impacta directamente en el funcionamiento de los caminos tratados con cloruros. Debido a que la Bischofita y el Cloruro de Sodio tienen distintas propiedades (capacidad higroscópica, deliquesencia, entre otras) y composición molecular, existe la posibilidad de mejorar el desempeño de los caminos mediante mezclas de ambas sales. Para esto, se debe cuantificar el efecto de los cambios de humedad en los caminos tratados con sales mediante el estudio del comportamiento que tienen las mezclas de sales ante distintas humedades y temperaturas.

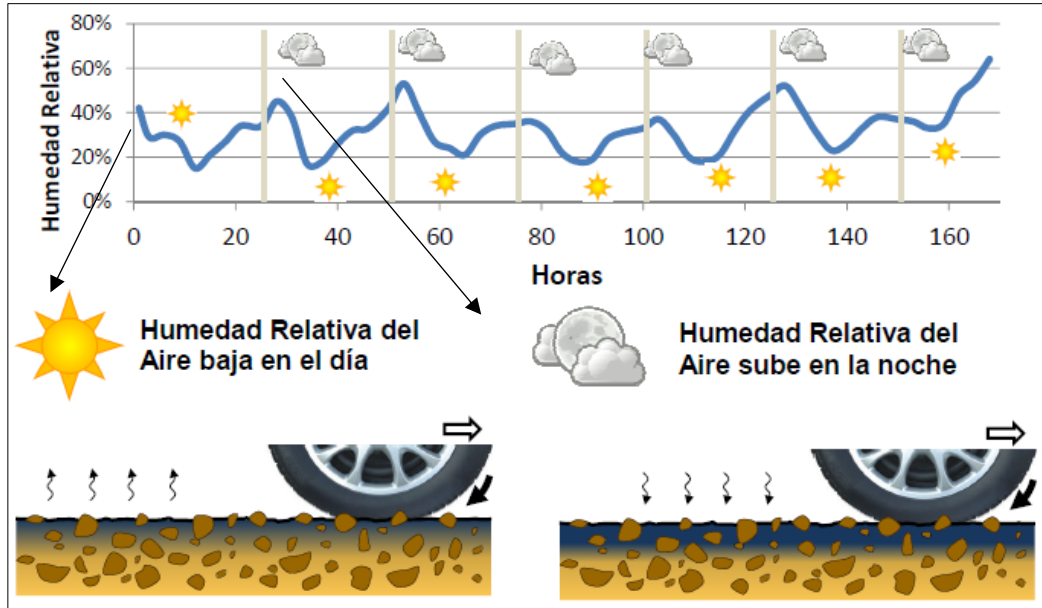


Figura 1-2: Variación de la humedad relativa durante el día y la noche.

Por otro parte, se ha observado que el coeficiente de fricción o resistencia al deslizamiento en caminos tratados exclusivamente con Bischofita (Figura 1-3) se reduce con el aumento en la humedad relativa (HR) del aire circundante, volviendo los caminos resbaladizos (González, Paniagua, Chamorro, & Montes, 2014). Esta situación puede significar un riesgo para los usuarios si no se toman acciones de conservación oportunas, o podría también reducirse si en vez de utilizar sólo Bischofita se emplea, por ejemplo, una mezcla de Bischofita y Cloruro de Sodio.



Figura 1-3: Presencia de humedad en caminos (Halles, 2007).

## **1.4. HIPÓTESIS**

Las mezclas de cloruros en estudio mejoran los efectos de absorción, retención de humedad y retardo de la evaporación del agua en suelos, mejorando el comportamiento y las propiedades funcionales de los caminos no pavimentados sometidos a condiciones medioambientales extremas, haciéndolos más durables ante eventos climáticos adversos.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. OBJETIVO GENERAL**

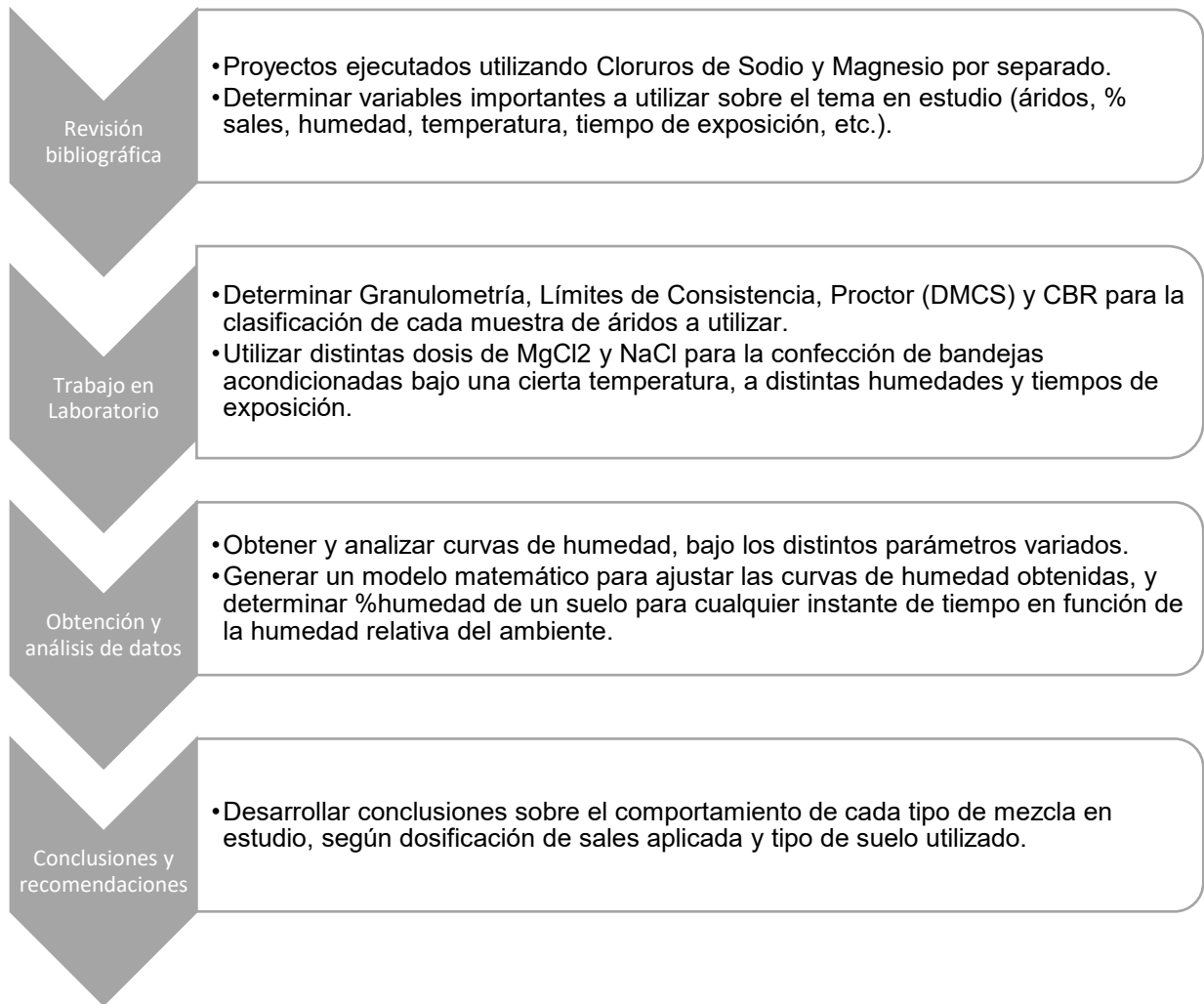
- Estudiar el efecto y comportamiento que tienen distintas mezclas de sales y tipos de suelos, en la absorción, retención y pérdida de humedad, esto para diferentes ciclos de acondicionamiento en laboratorio, con el fin de representar diferentes condiciones medioambientales de terreno.

### **1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer una metodología de trabajo experimental que permita estudiar de manera adecuada el comportamiento de las distintas muestras en estudio.
- Obtener y analizar curvas de humedad y temperatura en el tiempo para distintas dosis de cloruros y tres tipos de suelos bajo diferentes ciclos de acondicionamiento.
- Ajustar un modelo matemático a las curvas de humedad en el tiempo obtenidas.
- Determinar el contenido de humedad de los suelos bajo distintas condiciones de humedad relativa del aire en el tiempo, lo que permitiría entregar recomendaciones en la elección óptima del tipo de solución a utilizar en un camino no pavimentado.

## 1.6. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación incluye las siguientes etapas:



## 1.7. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria se encuentra estructurada en varios capítulos, ordenados según un proceso lógico de desarrollo en función de los objetivos de la investigación.

El **Capítulo 1**, se encuentra constituido por una introducción al tema de caminos no pavimentados, específicamente con antecedentes asociados a caminos mineros, motivación de la memoria, definición del problema a investigar, hipótesis planteada y objetivos.

El **Capítulo 2**, aborda el estado del conocimiento de la temática tratada en la memoria, enfocándose en una revisión de la literatura sobre los materiales a utilizar. Por otro lado, se describe la situación actual chilena enfocada a caminos mineros, desarrollos recientes en este ámbito y experiencia en nuestro país.

El **Capítulo 3**, aborda la metodología de estudio, es decir, los pasos prácticos y trabajos a realizar en laboratorio, con el fin de establecer el comportamiento y efectividad de las mezclas en estudio con respecto a los problemas antes mencionados, por medio del análisis posterior de los datos.

El **Capítulo 4**, presenta los respectivos resultados del estudio a través de los procedimientos de ensayos y pruebas realizadas, generando un análisis detallado y comparativo de los datos obtenidos.

El **Capítulo 5**, aborda el ajuste de un modelamiento matemático de los datos obtenidos en el capítulo anterior, además de presentar un caso ejemplo utilizando el modelo ajustado y su posterior comprobación.

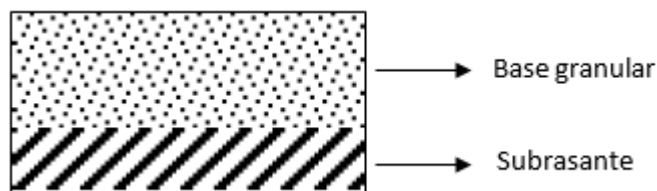
El **Capítulo 6**, comprende las conclusiones por medio del análisis general de los resultados de las muestras en estudio, resumiendo además el aporte al conocimiento e incluyendo una serie de recomendaciones para futuras investigaciones.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y TEORÍA

### 2.1. CAMINOS NO PAVIMENTADOS

Los caminos no pavimentados son el principal componente de la red vial nacional, siendo fundamentales para el desarrollo económico y social del país, ya que facilitan el acceso a zonas urbanas, rurales y centros de explotación de la industria minera, forestal y agrícola (MOP, 2009).

Con respecto a su estructura, los caminos no pavimentados están compuestos por una carpeta de rodado de material granular que protege la subrasante o suelo natural, proporcionando estabilidad a la estructura del camino (Figura 2-1).



*Figura 2-1: Estructura de camino no pavimentado.*

Estos caminos deben tener un mínimo nivel de servicio para su adecuado funcionamiento. Este nivel de servicio depende de dos condiciones principales; mantener una suficiente capacidad estructural y mantener adecuadas propiedades funcionales. La capacidad estructural se define como la capacidad de soporte que tiene un camino bajo distintas condiciones medioambientales, mientras que las propiedades funcionales se definen como las propiedades de desempeño de la carpeta granular de rodado (Gaete & Visser, 1990).

#### 2.1.1. TIPOS DE DETERIORO Y FACTORES QUE INTERVIENEN

Las propiedades necesarias para el buen desempeño de un material granular corresponden a la resistencia a la abrasión, trabajabilidad, estabilidad estructural bajo condiciones de humedad y estabilidad volumétrica ante ciclo de hielo-deshielo y cambios de humedad. La mayoría de los materiales no cumplen con todas estas condiciones, por lo que para detener el proceso de deterioro se debe identificar si la capacidad estructural es la adecuada y revisar las propiedades funcionales (Thenoux & San Juan, 2000).

Por otro lado, el polvo es el material fino que se libera de la superficie de rodado debido a la acción abrasiva de los neumáticos de los vehículos en movimiento y en menor medida por el viento. Si bien éste no es un deterioro, es el causante de la mayoría de los efectos descritos a continuación.

La pérdida y degradación de material de la superficie de rodado incrementan la permeabilidad y vacíos del material, reduciendo además la cohesión. Como consecuencia de esto, se acelera el proceso de formación de baches, calaminas y pérdida de agregado. Es por esto que el control de polvo no solo es importante para mantener el confort y la seguridad vial, sino que también es esencial para la mantención de una adecuada terminación superficial.

Las condiciones climáticas son el principal factor que incide en la generación de polvo, ya que, si la superficie está húmeda, no se presentarán los factores que favorecen la generación de polvo. Por otro lado, la humedad también afecta en la capacidad de soporte, ya que esta disminuirá a medida que aumenta la humedad (Thompson & Visser, 2001).

Según Visser (1981) y Paterson (1987), los modos o procesos de deterioro de los caminos no pavimentados se pueden clasificar como:

*a. Deterioro mecánico*

Corresponde al efecto abrasivo de los neumáticos debido a las cargas de tránsito, y también a la deformación de la superficie de rodado debido al tráfico, agua y viento.

*b. Deterioro en ambiente seco*

Corresponde a la pérdida de material por levantamiento de polvo debido al efecto abrasivo de los neumáticos de los vehículos lo que causa pérdidas de material fino, produciendo calaminas, baches y depresiones menores.

Además, se produce acumulación de material suelto generado por el desgaste de la superficie en las calaminas, y pérdida de grava y finos debido a la insuficiente cohesión del material granular superficial y falta de humedad.

*c. Deterioro en ambiente húmedo*

El deterioro en condiciones húmedas depende principalmente del esfuerzo de corte del material. Si el esfuerzo de corte es adecuado, el deterioro en la superficie será en forma de erosión, surcos o canales superficiales debido al escurrimiento del agua, efecto abrasivo debido al tráfico que origina

pérdida de material granular superficial y formación de baches debido a la acción combinada del tránsito y la lluvia. Si la carpeta posee un esfuerzo de corte muy bajo, se producirá un exceso de deformaciones en la superficie produciendo ahuellamientos, a su vez, tornando la superficie blanda y fangosa, por lo que el camino será intransitable para vehículos pesados (posible resbalamiento). Esto es muy común en áreas con altas humedades, lluvias y malos drenajes, ya que el esfuerzo de corte depende en gran medida del contenido de humedad del material de la carpeta.

### **2.1.2. ESTABILIZACIÓN COMO SOLUCIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS**

La estabilización corresponde al proceso mediante el cual se mejoran las propiedades del material con el objetivo de obtener un suelo más adecuado para ser utilizado como material de construcción, el cual puede lograrse por medio de cambios físicos y/o químicos. No solo se busca mejorar las propiedades físicas tales como la resistencia a la compresión y el esfuerzo de corte, sino que también proveer una solución contra factores climatológicos como la lluvia o el viento, además del deterioro debido al efecto abrasivo del tránsito de los vehículos.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la estabilización consiste en mantener una adecuada capacidad de soporte, la que está relacionada con la forma y volumen de la base en función de su resistencia al corte. La fricción interna de las partículas y la cohesión son las principales propiedades que presentan los suelos como mecanismo de estabilización, siendo la fricción prácticamente independiente de la humedad del suelo, mientras que la cohesión depende absolutamente de esta. Por otro lado, un material completamente granular no tiene una capacidad de soporte sin una presión de confinamiento, mientras que uno cohesivo como la arcilla tiene una alta capacidad de soporte en condiciones secas, la cual disminuye considerablemente para condiciones húmedas (Pradena, Mery, & Novoa, 2010).

En general, la estabilización de suelos se puede clasificar como (Thenoux & San Juan, 2000):

- a. Estabilización mecánica (solución tradicional).
- b. Estabilización físico-química (solución no tradicional).

*a. Estabilización mecánica*

Se puede definir como el procedimiento para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo sin la adición de materiales ni aditivos extra. Se distinguen dos procedimientos distintos, la mezcla de diferentes tipos de suelos y la compactación.

i. Mezcla de distintos tipos de suelos

La estabilización se puede lograr por medio de la mezcla de suelos cohesivos y granulares. Una adecuada distribución granulométrica tendrá una mayor capacidad de soporte que un material con partículas de igual tamaño, ya que las partículas finas llenarán los huecos entre las partículas más grandes, produciendo una mayor densidad, compactándose de manera más fácil para así lograr una resistencia mayor.

ii. Compactación

La resistencia y capacidad de soporte del suelo depende de su contenido de agua y volúmenes de vacío. Mientras menor sea el volumen de vacíos y tenga un menor contenido de agua, mayor será la resistencia del suelo. La compactación aumenta la densidad del suelo parcialmente saturado, lo que provoca un aumento de la cohesión y fricción interna de las partículas del suelo y una disminución de los volúmenes de vacíos.

A partir del ensayo Proctor del suelo (NCh 1534-2 Of. 1979)<sup>1</sup>, es posible encontrar la humedad óptima de compactación para la cual se obtiene la máxima densidad posible.

*b. Estabilización físico-química*

Consiste en la aplicación de aditivos químicos que se mezclan con el material granular a tratar, según dosis previamente establecidas. Este tipo de estabilización es utilizada como complemento a la descrita anteriormente. Actúa sobre la matriz fina del suelo otorgándole cambios en las propiedades moleculares a nivel de partículas, modificando las propiedades del suelo tales como plasticidad, trabajabilidad y permeabilidad. Mediante este tipo de estabilización se logra un aumento de la

---

<sup>1</sup> Norma Chilena Oficial – Mecánica de Suelos – Relaciones humedad/densidad – Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída.

capacidad estructural y mejoramiento de las propiedades funcionales del suelo. Algunas de estas soluciones requieren un curado posterior a su aplicación.

Dentro de sus usos, se distinguen los siguientes tipos de aplicaciones: mejoramiento de bases y subbases de caminos pavimentados, estabilización de carpetas granulares de rodadura y mejoramiento de la subrasante.

Para el presente trabajo de investigación, interesa enfocarse en la estabilización de carpetas granulares, donde se describen a continuación las siguientes funciones:

- Se permite controlar el deterioro superficial, mejorando la resistencia a la abrasión evitando la pérdida de finos lo que incrementa la permeabilidad del material.
- Controlar las emisiones de polvo, manteniendo la seguridad vial, evitando la contaminación ambiental y desgaste de vehículos.
- Mejorar la capacidad de soporte, por medio de una mayor cohesión de las partículas y mejor trabajabilidad del suelo.
- Mantener estabilidad estructural bajo condiciones de humedad, por medio de impermeabilización de la superficie.

Existe una amplia variedad de estabilizadores físico-químicos, los cuales pueden o no mejorar la capacidad estructural como también algunas de las propiedades funcionales del material a utilizar, por lo que se debe tener claro la deficiencia o mejora de cada tipo de estabilizador, con el fin de utilizar el más adecuado.

Los estabilizadores físico-químicos de este tipo se pueden clasificar como (Thenoux & San Juan, 2000):

i. Agentes cementantes

Estos forman una matriz estabilizada dándole resistencia al suelo a partir de la unión o cementación de las partículas individuales o aglomeradas. Esto se consigue a partir de la mezcla de suelo con cal, cemento, cenizas volantes o la combinación de estos productos. Con esto se obtiene un incremento de la capacidad de soporte, resistencia al corte, mejoramiento de la trabajabilidad del material y estabilidad volumétrica frente a ciclos de hielo-deshielo y cambios de humedad.

## ii. Agentes asfálticos

Estos tienen un efecto adhesivo pegando las partículas del suelo. Se agrega al suelo en estado de baja viscosidad, para luego convertirse en estado semi-sólido altamente viscoso. Generalmente se utiliza como emulsiones asfálticas y asfalto espumado. Estos agentes a diferencia de los cementantes, no reaccionan químicamente con el material estabilizado, sino que actúan como Ligante, uniendo las partículas del suelo. Los efectos que se obtienen son un incremento de la capacidad de soporte, incrementa la resistencia al corte y estabilidad volumétrica frente a cambios de humedad, por medio de un efecto impermeabilizante que se produce gracias a que las partículas son cubiertas con el asfalto, produciendo una membrana que impide la penetración del agua.

## iii. Compuestos químicos

Corresponden a derivados de procesos industriales u obtenidos de depósitos naturales. Además, se incluyen todos los compuestos químicos que no forman parte de las categorías anteriores. Algunos ejemplos de estos son los basados en cloruros o sales, derivados del petróleo y aceites, enzimas, polímeros y resinas.

En caminos no pavimentados, estos compuestos son utilizados principalmente para suprimir el polvo, reducir el deterioro superficial, mejorar la interacción del agua con el suelo, facilitar la compactación e incrementar la capacidad de soporte. Esto se logra a partir de un cambio en las propiedades del suelo, mediante la aglomeración y cementación de las partículas finas del suelo, la reducción de la permeabilidad o capacidad de absorción de agua del suelo y una disminución del espesor de la doble capa. Las sales utilizadas en esta investigación se encuentran dentro de este grupo.

### **2.1.3. CONSERVACIÓN**

La conservación permite ampliar la vida útil de los caminos, haciéndolos más rentables en términos de tiempo y costos. La frecuencia con la que se deberá realizar esta actividad está directamente relacionada con el éxito de la solución o diseño inicial, por lo que se espera que las soluciones no tradicionales disminuyan considerablemente la necesidad de ser conservadas. Al utilizar una solución no tradicional se espera que el deterioro de la carpeta de rodado granular sea mucho menor, esto a su vez mantendrá la capacidad de soporte por mucho más tiempo, ya que se evitará la degradación del material y su consecuente pérdida de capacidad estructural. Con esto se logra una mayor vida útil de los caminos con un menor esfuerzo en la conservación, lo que permite a largo plazo el ahorro de recursos (Graell, 2010).

## **2.2. USO DE SALES PARA ESTABILIZACIÓN Y SUPRESIÓN DE POLVO EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS**

Los tipos de soluciones que se presentan en esta investigación son aplicados particularmente en zonas mineras del norte del país, y tienen por objetivo disminuir el levantamiento de polvo producido por el flujo vehicular y el exceso de barro producto de las lluvias, y por otro lado disminuir los costos de conservación, costos de transporte y mejorar la seguridad vial. Entre otros de los beneficios que se obtienen al utilizar estos productos se pueden mencionar:

- Caminos libres de polvo, mejorando la visibilidad y aumentando la seguridad vial.
- Mejor la calidad de vida de trabajadores y comunidades.
- Ahorro de combustible por menor resistencia de rodado.
- Mayor vida útil de neumáticos.
- Mejorar ciclos de mantenimiento de equipos.
- Mayor disponibilidad de caminos y equipos, mejorando la productividad y rendimiento de las operaciones mineras.

Las soluciones de estabilización con sales proporcionan un aumento de las propiedades mecánicas del suelo, las cuales actúan como agentes aglomerantes entre las partículas. Dentro de los tipos de estabilizadores de suelo utilizados en el país se encuentran el Cloruro de Magnesio (Bischofita), Cloruro de Sodio y Cloruro de Calcio (MOP, 2015).

Entre sus usos y aplicaciones se encuentran (Halles, 2007):

### a. Estabilización de carpetas

Consiste en adicionar el producto (sal) en seco al material granular que será utilizado en la carpeta de rodado, formando una mezcla, con una dosis de sal promedio de 60 a 80 Kg/m<sup>3</sup>. Luego, se agrega agua para obtener una humedad cercana a la óptima, para posteriormente extender el material y compactarlo (Figura 2-2). La estabilización también permite controlar, en menor medida, el polvo de los caminos. Este método se aplica para caminos de estándares de tránsito medio-alto, proyectos de larga vida útil y para buena calidad de materiales.

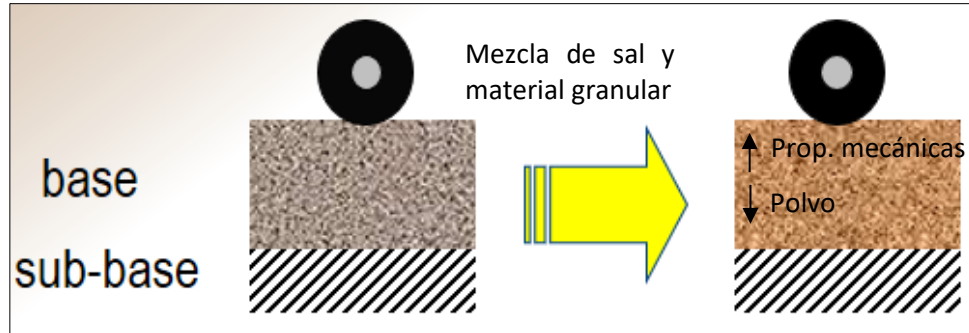


Figura 2-2: Esquema estructural de estabilización.

b. Tratamiento Supresor de Polvo (TSP)

Consiste en la aplicación de un riego de salmuera en una dosis promedio de 2-3 Kg/m<sup>2</sup>, sobre una superficie del camino compactada y libre de deterioros superficiales, con sus respectivos bombeos (Figura 2-3). La salmuera consiste en una mezcla homogénea de sal y agua, cuya concentración típica es una razón de (1,5:1) (sal:agua). Este tratamiento se aplica a caminos con un alto tráfico minero, estándares de transito medio-bajo, caminos de uso temporal y es prácticamente aplicable a cualquier tipo de material de base.

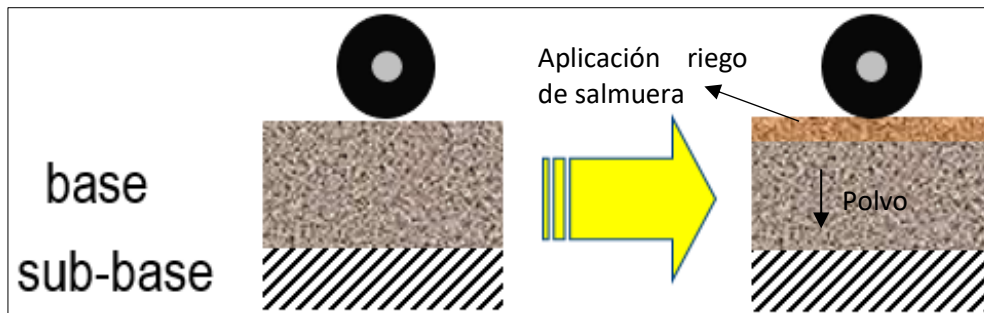


Figura 2-3: Esquema estructural de tratamiento supresión de polvo.

### 2.2.1. CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS

Para los fines del presente estudio, un suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas (Badillo & Rico, 1976). Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas, además de los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la naturaleza.

Un mineral es una sustancia inorgánica y natural, que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Su composición química y sus propiedades físicas o son fijas o varían dentro de límites definidos. Sus propiedades físicas más interesantes, desde el punto de vista este estudio son el color, forma de cristalización, la dureza, la forma de su fractura y disposición de sus planos cruceros, la tenacidad, la capacidad para permitir el paso de ondas y radiaciones (luz) y absorber humedad.

En los suelos gruesos<sup>2</sup> el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente condicionado por su compacidad y por la orientación de sus partículas, por lo que la constitución mineralógica es secundaria. Las arcillas, por su parte, están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando, además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la aluminica (Das, 2001). La primera, de tales láminas, está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la Figura 2-4. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros.

---

<sup>2</sup> Según sistema de clasificación de suelos USCS (Unified Soil Classification System).

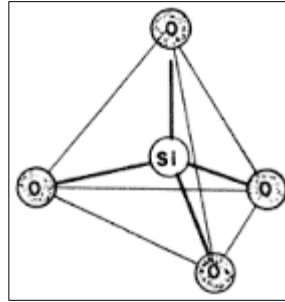


Figura 2-4: Esquema de la estructura de la lámina silícica.

Un esquema de unidad hexagonal se muestra en la Figura 2-5. Las unidades hexagonales se repiten indefinidamente, constituyendo una red de láminas.

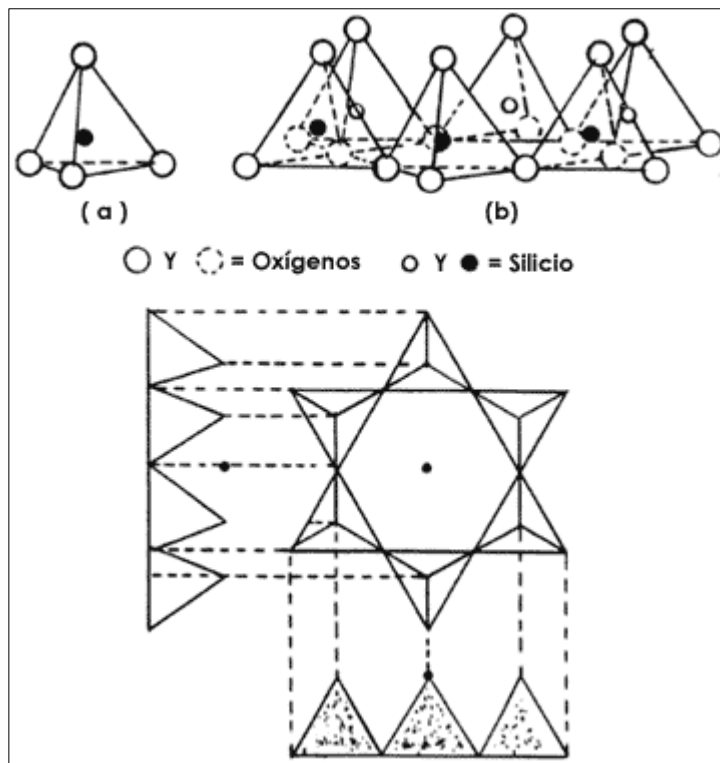


Figura 2-5: Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica.

Por su parte, las láminas aluminicas están formadas por retículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como aparece en la Figura 2-6, siendo el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la red.

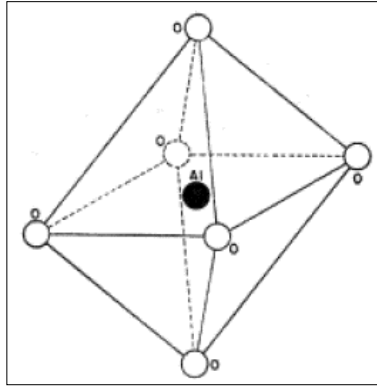


Figura 2-6: Esquema de la estructura de la lámina aluminica.

De acuerdo con su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grupos: Caolinitas, Illitas y Montmorilonitas (Das, 2001).

La caolinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) está formada por una lámina de sílice y otra de gibbsita<sup>3</sup>, que se superponen indefinidamente (Figura 2-7a). La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas. En consecuencia, las arcillas caoliníticas son relativamente estables en presencia de agua.

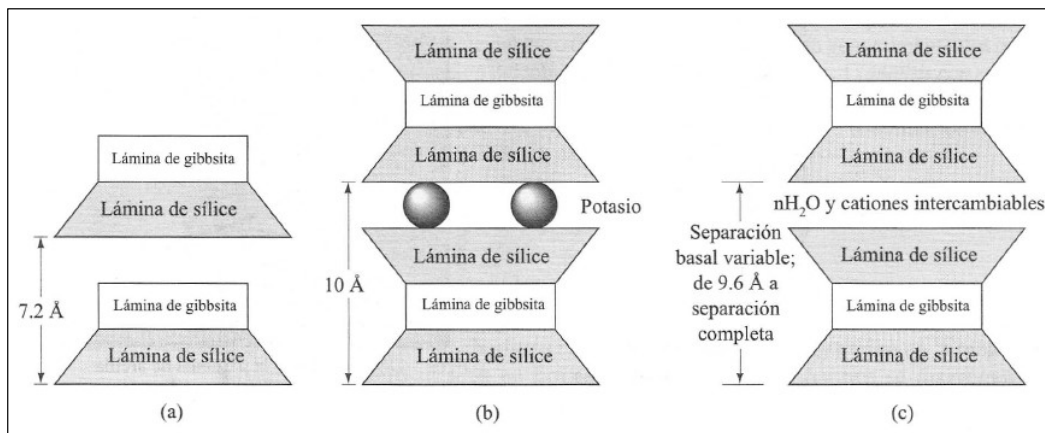


Figura 2-7: Diagrama de las estructuras de (a) caolinita; (b) illita; (c) monmorilonita.

<sup>3</sup> Corresponde a una de las formas minerales del hidróxido de aluminio (Al(OH)3).

La illita  $((KH_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4(O_{10})[(OH)_2, (H_2O)])$  es una lámina de gibbsita enlazada en dos láminas de sílice, una arriba y otra abajo, y es denominada a veces mica arcillosa. Las capas de illita están enlazadas entre sí por iones de potasio (Figura 2-7b). La carga negativa para balancear los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por silicio en las láminas tetraédricas, la sustitución de un elemento por otro, sin cambios en la forma cristalina, se conoce como sustitución isomorfa. La constitución interna manifiesta tendencia a formar grupos de materia, que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello su potencial de expansión es menor que el de la monmorilonita.

La monmorilonita  $((Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O)$  está formada por una lámina de gibbsita entre dos láminas de sílice, superponiéndose indefinidamente (Figura 2-7c). En este caso la unión entre las retículas es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse entre las capas de la estructura con relativa facilidad a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Las arcillas monmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuertes tendencias a la inestabilidad. En la monmorilonita hay sustitución isomorfa de magnesio y hierro por aluminio en las láminas octaédricas.

### 2.2.2. ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE ESTABILIZACIÓN

En general se considera que las partículas arcillosas que tienen un tamaño del orden de 2 micras o menores presentan una actividad eléctrica importante que rige su comportamiento dada su gran superficie específica en relación con su volumen y su masa. Las partículas de arcilla llevan una carga negativa sobre la superficie, resultado de la sustitución isomorfa y de una ruptura de la continuidad de la estructura en sus bordes. Cargas negativas mayores derivan de superficies específicas mayores. Algunos lugares cargados positivamente ocurren en los bordes de las partículas (Das, 2001).

En arcilla seca, la carga negativa es balanceada por cationes intercambiables, como los de Calcio ( $Ca^{++}$ ), Magnesio ( $Mg^{++}$ ), Sodio ( $Na^+$ ) y Potasio ( $K^+$ ), los que rodean a las partículas que se encuentran mantenidas juntas por atracción electrostática. Cuando se agrega agua a la arcilla, esos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. A esto se le llama doble capa difusa (Figura 2-8a). Por otro lado, la concentración de cationes decrece con la distancia desde la superficie de la partícula (Figura 2-8b).

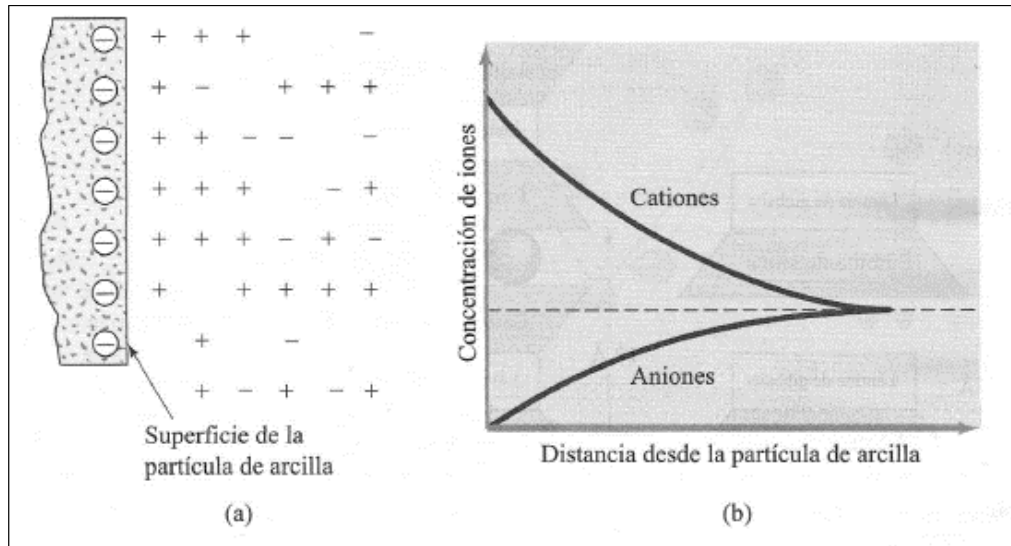


Figura 2-8: Doble capa difusa (Das, 2001).

Las moléculas de agua son polares, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, si no que funcionan como pequeños dipolos permanentes. Al ligarse a la partícula por su carga positiva (+), el polo de carga negativa (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de éstas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de éste y con su radio iónico (Garnica, Pérez, Gómez, & Obil, 2001).

Por lo anterior, cuando las partículas del suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de suelo es en función, no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos.

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes absorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrógena (con cationes  $H^+$ ) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. En realidad, lo que ocurre es un intercambio de cationes entre el agua y las películas adsorbidas por las partículas minerales, algunas veces en reacción rápida. Los cationes intercambiables más usuales son los de Sodio ( $Na^+$ ), Potasio ( $K^+$ ), Calcio ( $Ca^{++}$ ), Magnesio ( $Mg^{++}$ ), Hidrogeno ( $H^+$ ) y Amonio ( $NH_4^+$ ), como se mencionó anteriormente.

Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorilonitas y las illitas poseen la propiedad en grado intermedio. La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor. La actividad catiónica se hace notable, en general, para valores de pH menores que 7. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule por la masa de suelo.

Las propiedades mecánicas de una arcilla pueden cambiar al variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, pues a diferentes cationes ligados corresponden distintos espesores de la película adsorbida, lo que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo (Das, 2001).

### 2.2.3. CONCEPTOS DE HUMEDAD

El aire normal es una mezcla mecánica de aire seco y vapor de agua en estado de vapor sobrecalentado<sup>4</sup> a baja presión y baja temperatura. Se le llama humedad al contenido de vapor de agua presente en el aire. Cuando el aire no está en capacidad de absorber más vapor de agua, se dice que el aire está saturado. Si a partir de este punto de saturación se suministra más vapor de agua al aire, se formará niebla y se iniciará la condensación; pero si el aire está sobrecalentado, el punto de saturación cambia y el contenido de humedad que el aire está en capacidad de recibir, aumenta (Meruane & Garreaud, 2006).

En particular, la humedad se puede expresar como humedad relativa (HR), la que corresponde a una razón, expresada en porcentaje, de la cantidad de vapor en el aire y la cantidad de vapor que ese aire es capaz de contener a determinada temperatura.

$$\%HR = \frac{m_{\text{vapor de agua}}}{m_{\text{máx vapor de agua}}} * 100$$

Esta se utiliza para determinar el punto de saturación del aire (cuando la humedad relativa es igual a 100%, el aire se encuentra saturado). Como se explicó anteriormente y como se muestra en la Figura 2-9, al calentar el aire, disminuye el porcentaje de humedad relativa (Sierra Toro, 2006).

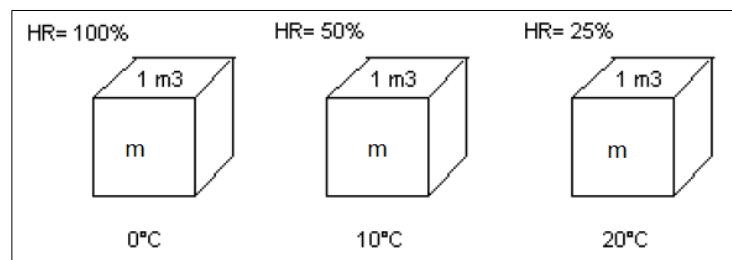


Figura 2-9: Humedad relativa del aire en un volumen de 1 m<sup>3</sup> y de masa m.

---

<sup>4</sup> Una sustancia se encuentra en estado de vapor sobrecalentado si el agua que contiene no está a punto de condensarse, manteniendo las condiciones de temperatura mayor que la temperatura de saturación y la presión menor a la presión de saturación (Petrucci, Harwood, & Herring, 2002).

#### **2.2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS**

El contenido de humedad de un suelo es una manera de medir cuánta agua tiene una muestra de suelo en comparación con la masa de la muestra misma. Esta cantidad de agua se puede expresar en base seca o en base húmeda. La primera indica la cantidad de agua en relación a la masa seca del material, mientras que la segunda sería la cantidad de agua en el total de la muestra. Esto se mide de acuerdo al procedimiento descrito en la norma NCh 1515.Of79 (INN, 1979).

Teóricamente, el agua contenida en una muestra se presenta en distintas formas, de acuerdo con los niveles de hidratación, es decir, por la fuerza de la unión que haya entre las moléculas de agua y el suelo, ya que el agua está adsorbida, bien sea debido a fuerzas de atracción molecular o ligada al producto.

Una parte del agua está fuertemente ligada al producto. Esta parte se conoce como capa monomolecular. Puede estar combinada con la sustancia por medio de enlaces químicos, siendo una componente del producto. Esta forma de agua sólo se puede eliminar en procesos que rompan los enlaces bajo ciertas condiciones de temperatura y presión. La capa inmediatamente superior a la monomolecular se conoce como polimolecular, la cual está constituida por varias capas monomoleculares ligadas a la materia de forma electromagnética y forman agua semi-ligada que está adherida fuertemente. Adicionalmente se encontrará agua líquida bajo tensión osmótica, la cual es fácil de evaporar en el secado. Finalmente, en las muestras se encuentra cierta cantidad de agua libre ubicada en las partes porosas. Este tipo de agua es la más fácil de evaporar durante el secado.

La humedad de equilibrio corresponde al contenido de humedad del suelo después de estar expuesto a un medio en condiciones de temperatura y humedad controladas durante un período de tiempo prolongado, es decir el equilibrio del ambiente y el suelo en términos de humedad. La humedad de las muestras está en equilibrio cuando la presión de vapor de agua que proviene de la humedad del producto se iguala a la presión de vapor de agua del ambiente. En los suelos, a medida que aumenta la temperatura del aire, disminuye la humedad de equilibrio, al igual que la humedad en el aire; por el contrario, si aumenta la humedad relativa, aumentará también la humedad en equilibrio (Sierra Toro, 2006).

El proceso o fase de absorción de humedad de una muestra de suelo puede ser simulada o representada en un laboratorio mediante la utilización de una Cámara de Humedad, en la que se pueden controlar las variables de humedad relativa, temperatura y tiempo de exposición de las muestras en estudio.

Por otra parte, durante el secado cuando se calientan las muestras, las moléculas de agua más próximas a la superficie tienden a pasar de un estado líquido a gaseoso (evaporación), filtrándose de esta manera en el aire que se encuentra contiguo al suelo. La cantidad de moléculas que se evaporan depende de la temperatura a la que se encuentra la mezcla y del área de contacto con el aire.

El proceso de secado por convección en horno consiste básicamente en retirar el agua de los materiales en estudio; para lograr esto, se le suministra energía en forma de calor, mediante un aumento en la presión de vapor del agua presente hasta lograr la evaporación del agua ubicada en la superficie del suelo en estudio. Esta evaporación produce un descenso en la temperatura de la superficie del suelo, ya que se consume energía en el cambio de estado líquido al gaseoso, por lo tanto, se necesita mayor calor para poder conservar la presión de vapor en el nivel adecuado. El agua que se evapora es reemplazada por otra que proviene del interior del material mediante procesos de difusión, convección y flujo capilar. Este desplazamiento de agua del interior a la superficie tiene un límite, debido a la presencia de agua ligada en el interior del suelo. Por esta razón, a medida que avanza el proceso, la velocidad de secado disminuye hasta que finalmente llega a cero. En esta fase de evaporación se involucran las variables de temperatura, tiempo de exposición y humedad del suelo (Sierra Toro, 2006).

Según lo anterior, una forma de representar la evolución del contenido de agua en el tiempo de una muestra de suelo es mediante una Curva de retención de Humedad. En estas se refleja la capacidad del suelo para absorber, retener o perder agua en función del tiempo. Esto va a depender de las características del suelo y del tipo de mezcla utilizada (cloruros).

### 2.2.5. CARACTERÍSTICAS DEL CLORURO DE MAGNESIO HEXAHIDRATADO (BISCHOFITA)

La Bischofita es una sal constituida básicamente por cristales de cloruro de magnesio hexahidratado ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ), la cual se obtiene como subproducto de la elaboración de litio, produciéndose a través de la evaporación solar de salmueras extraídas de depósitos del subsuelo del Salar de Atacama (Figura 2-10 y Figura 2-11). Por otro lado, posee diversas propiedades que permiten su uso como estabilizador químico de capas de rodadura granulares, por medio de su capacidad de absorber y retener la humedad del ambiente (higroscopía), incrementar la tensión superficial del agua y reducir la presión de vapor del agua, lo que permite obtener una capa de rodadura estable, reduciendo la formación de baches, calaminas, pérdida de áridos y emisiones de polvo, mejorando sustancialmente la calidad de rodadura (Thenoux & Vera, 2002).



Figura 2-10: Salar de Atacama y proceso de obtención de la Bischofita (Vera Araya, 2001).



Figura 2-11: Acopio de bischofita.

Este producto aumenta la trabajabilidad del material granular, aumentando la lubricación de las partículas del suelo, lo que significa que densidades más altas se pueden conseguir con una energía de compactación menor. La dosis recomendada según literatura y especialistas cuando se trata de estabilización, es decir, al mezclar el producto con el material granular, oscila entre un 3% y 7% de bischofita referida al peso seco del agregado, dependiendo del Índice de Plasticidad (IP) del material granular y del uso (Thenoux & Vera, 2002). Además, otros autores proponen una dosis de bischofita en función del IP del material granular, como se muestra en la Tabla 2-1 (Cornejo, 2006).

Tabla 2-1: Dosis de Bischofita recomendada en función de la plasticidad del material granular.

Índice de Plasticidad (IP)	Dosis (Kg/m <sup>3</sup> )
0	65-70
IP<6	55-65
6<IP<15	40-55

La Bischofita es altamente soluble en agua, pudiendo disolver hasta 1,5 kilos por litro de agua, por lo que es recomendada su aplicación como riego para tratamiento del control de polvo (Figura 2-12), aplicando una salmuera sobre la capa de rodadura existente, empleando una dosis de 3 kg/m<sup>2</sup> (Campos & Espinoza, 2006).



Figura 2-12: Riego para tratamiento de control de polvo.

Entre las propiedades de la Bischofita se tiene (Jones, 1984) (Han, 1992):

- *Ligante*: Aglomera las partículas finas de suelos plásticos y no plásticos, estabilizando la carpeta de rodado.
- *Deliquescente*: Propiedad de disolverse en la humedad absorbida para formar una solución líquida.
- *Altamente soluble en agua*. Proceso constructivo mediante riego superficial, aumentando la vida útil de la estabilización.
- *Higroscópica*: capacidad de absorber la humedad del aire cuando la humedad relativa es superior a 32%, emulando un riego periódico sobre el camino.
- *Cristaliza en la superficie*, formando una película relativamente resistente a la abrasión de los neumáticos.
- *Incrementa la tensión superficial*: Mejora la cohesión entre las partículas.
- *Resistente a la evaporación*: Reduce la tasa de evaporación del agua 3,1 veces, reteniendo la humedad de la carpeta.

- *Baja la temperatura de congelamiento del agua* hasta  $-33^{\circ}\text{C}$ , por lo que reduce el daño de los caminos causado por cambios volumétricos del suelo producidos por ciclos de hielo-deshielo.

En suelos minerales arcillosos, que contienen algún grado de plasticidad, ocurre un intercambio iónico, en donde los iones de magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ) de la solución de Bischofita son reemplazados por iones de Hidrógenos ( $\text{H}^{+}$ ) y Sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) presentes en los minerales del suelo. Una mayor repulsión, junto con la tensión superficial del agua, incrementa las fuerzas de atracción entre las partículas de arcilla, incrementando considerablemente la estabilidad de la capa de rodadura (Cornejo, 2006).

Algunas desventajas que presenta la aplicación de Bischofita son (Han, 1992):

- *Corrosión*: A pesar de ser menos corrosiva que el Cloruro de Sodio, puede producir corrosión en metales cuando la concentración de Bischofita es mayor a un 3.5%, referida al peso seco del agregado.
- *Superficie Resbaladiza*: Esto sucede bajo condiciones de alta humedad relativa ( $>90\%$ ), lo que va a depender de la distribución del tamaño de las partículas de la capa de rodadura (granulometría), y particularmente si el índice de plasticidad es mayor que 5%.

### 2.2.6. CARACTERÍSTICAS DEL CLORURO DE SODIO

El Cloruro de Sodio es un estabilizante natural compuesto aproximadamente por 98% de NaCl y un 2% de arcillas y limos, cuya propiedad fundamental, al ser higroscópico, es absorber y retener agua cuando la humedad relativa del aire excede el 75%, reduciendo el punto de evaporación y mejorando la cohesión del suelo. A diferencia de la Bischofita, el Cloruro de Sodio es menos soluble en agua, pudiendo disolver hasta 0,3 kilos por litro de agua. Al poseer una menor capacidad de absorber y retener humedad del ambiente que el  $MgCl_2$ , el NaCl se puede considerar con mayor ventaja para ser utilizado en zonas húmedas.

El cloruro de sodio mezclado con materiales limo-arcillosos produce una acción cementante, lo que hace aumentar la capacidad de soporte, cohesión e impermeabilización del suelo, evitando la formación de ahuellamientos, calaminas, polvo en suspensión y desprendimiento de material granular. El cloruro de sodio actúa sobre las partículas finas de los suelos, cohesionándolos y cementándolos de forma de que el material granular no se disgregue. Además, reduce el punto de congelación y disminuye la deformación por heladas (Garnica et al., 2001).

El Cloruro de Sodio presenta ventajas sobre los otros elementos estabilizadores, debido a la gran cantidad en que se encuentra a través de todo el mundo, su bajo costo y la facilidad de su aplicación, ya que no se necesita equipo especial. Además, se pueden utilizar los materiales de la zona, de manera de mejorar las propiedades físicas, evitando el transporte de materiales.

El NaCl tiene la propiedad de ser higroscópico, pero no deliquescente. Esta diferencia es fundamental con respecto a las otras sales, ya que bajo condiciones lluviosas o de humedad muy altas, el NaCl presente en el material mantiene en su mayoría la consistencia y no se disuelve, es decir, no posee la capacidad de las otras sales de absorber esta cantidad de agua incorporada, por lo que mantiene y entrega una mayor estabilidad estructural a la carpeta de rodado en condiciones húmedas (Graell, 2010).

Por otra parte, el incremento en la tensión superficial es mayor para el  $MgCl_2$  que para el NaCl, para un mismo porcentaje de sal en solución (Figura 2-13). El Cloruro de Magnesio incrementa la tensión superficial y genera una superficie más dura que el Cloruro de Sodio cuando se seca (Thenoux & Vera, 2002).

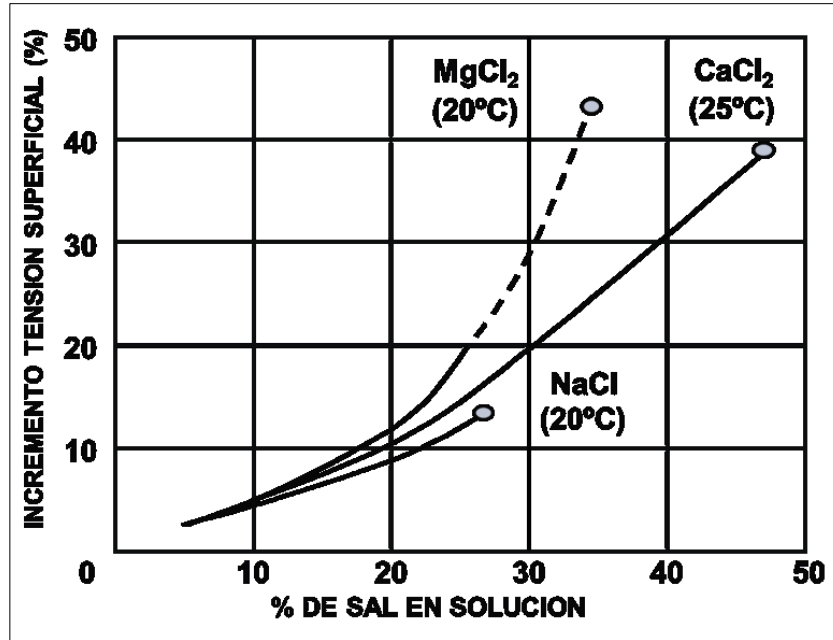


Figura 2-13: Tensión superficial de distintos Cloruros (Vera-Thenoux, 2001).

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, requiere un mínimo de 32% de humedad para absorber el agua ambiental, independiente de la temperatura, con lo que genera una superficie inestable ante la presencia de agua, neblina o altas humedades.

Ha sido la mejor capacidad higroscópica (Figura 2-14) y la composición molecular Hexahidratada de la Bischofita, lo que la ha hecho ser la principal elección para suprimir el polvo o estabilizar los caminos, para así mantener la humedad óptima de la base granular y, por lo tanto, conservar cohesionado el material de la carpeta de rodado. Ésta es la principal diferencia entre la Bischofita y el Cloruro de Sodio, debido a que este último es un compuesto anhidro sin agua molecular, por lo que su capacidad de mantener hidratado el camino es menor (Halles, 2007).

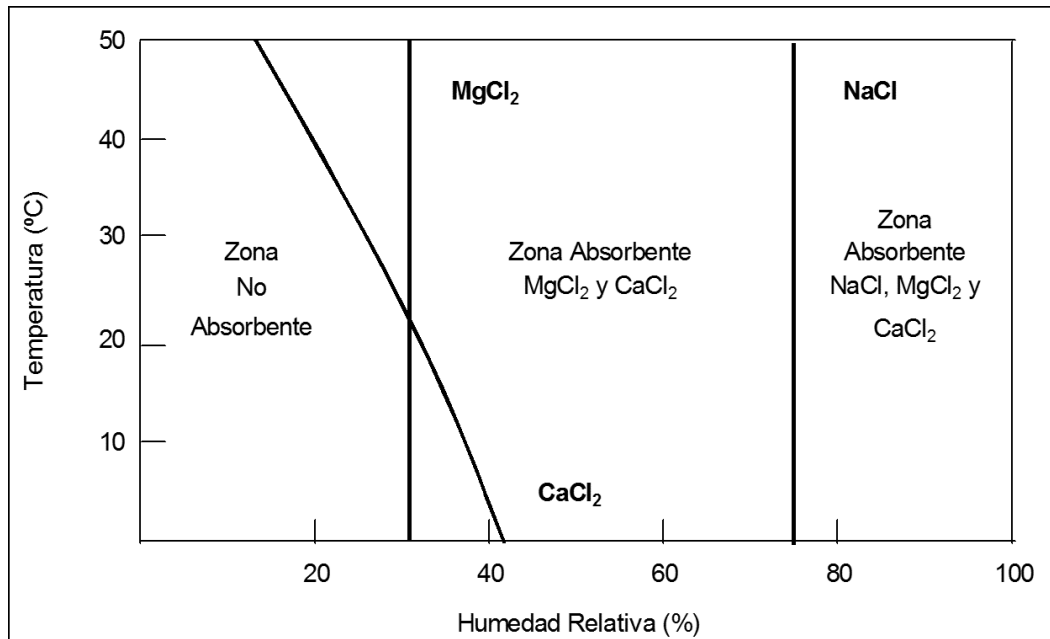


Figura 2-14: Capacidad Higroscópica de distintas sales (Halles, 2007).

### 2.2.7. MOVIMIENTO DE LAS SALES DEBIDO A CAMBIOS DE HUMEDAD

Los cambios de humedad dentro y fuera de la carpeta de rodado generan movimientos de las sales, principalmente en la superficie de rodado. Existen tres movimientos de las aguas y sales disueltas: hacia arriba, hacia abajo y hacia los costados (Thenoux & Vera, 2002):

- i. En épocas de lluvias, las aguas tienden a filtrar a través de la carpeta, produciendo el movimiento de las sales disueltas hacia abajo (Figura 2-15-a), disminuyendo la concentración de éstas en todo el espesor de la capa de rodado. Esta menor concentración superficial disminuye la capacidad de absorber humedad desde el ambiente, afectando el desempeño durante las estaciones secas.
- ii. Durante la estación seca, el movimiento de la humedad en la capa de rodado será hacia arriba por capilaridad (Figura 2-15-b), reemplazando el agua que se evapora en la superficie. Este movimiento produce que las sales disueltas se muevan hacia la superficie de la carpeta. La evaporación de las aguas produce un aumento en la concentración de las sales, las cuales cristalizan, provocando un efecto de cementación de las partículas finas. Estos cristales son disueltos por las próximas lluvias y migrarán hacia los costados e interior de la carpeta de rodado.

- iii. Otro movimiento que se produce y que causa el aumento de la concentración de sales en la superficie de rodado es el debido a la osmosis, el que consiste en el movimiento de las aguas y sales disueltas hacia los lugares de mayor concentración de sales en la carpeta.

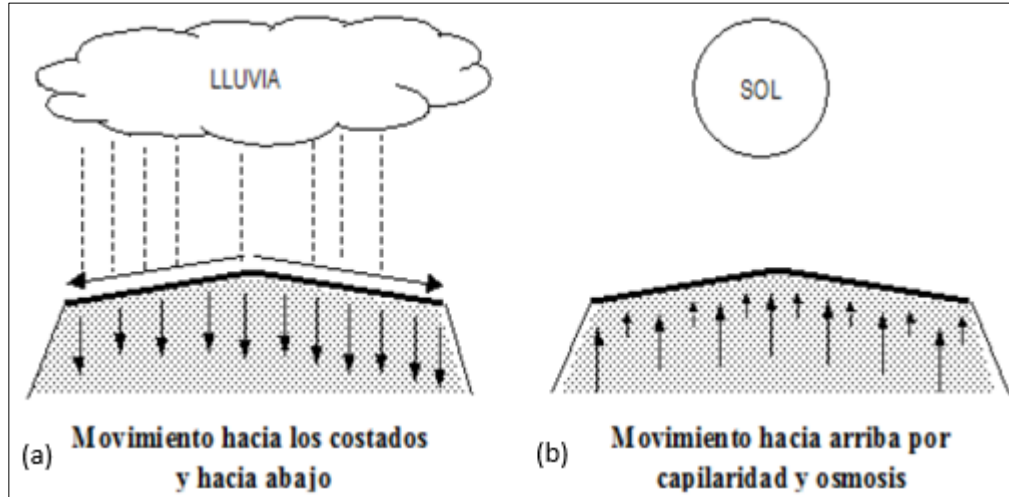


Figura 2-15: Movimiento de humedad y sales en la carpeta de rodado (Vera, 2001).

Debido a que el  $\text{NaCl}$  tiene una menor capacidad de disolverse en agua y no posee la propiedad de deliquesencia, se estima que el movimiento de las sales debido a los cambios de humedad será menor que para el  $\text{MgCl}_2$ . Esto mantiene una distribución de la sal más homogénea en toda la carpeta granular de rodado y evita su pérdida (Graell, 2010).

### 2.2.8. ESTUDIOS RELACIONADOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-SAL

La reacción suelo-sal ha sido estudiada por diversos investigadores. El intercambio físico-químico se manifiesta a través del cambio en las propiedades mecánicas del suelo tratado, donde principalmente se permite estudiar la plasticidad del suelo (Límites de Atterberg).

Hilmy y El-Gabaly (1954) descubrieron que el ion  $\text{Na}^+$  absorbido por un suelo rico en calcio, es mayor a medida que se aumenta la cantidad de cloruro de sodio. Agregar 1 o 2% de sal permite una absorción de 11% y 22% de  $\text{Na}^+$  respectivamente.

Ogawa et al (1963) reportó que agregar 1% y 3% de contenido de sal en 6 tipos de suelos, el intercambio de  $\text{Na}^+$  fue rápido y en un grado del 20% al 30%. También comprobó que sílice y alúmina fueron liberadas al tratar suelos con cloruro de sodio. Además, la solubilidad de sílice fue incrementada considerablemente en presencia de sal.

Garnica et al (2001) y Quinche (2006) por su parte, realizaron ensayos en donde determinaron que por lo general cuando las arcillas de alta plasticidad (CH) son mezcladas con contenidos de sal mayores al 5%, se obtiene como resultado una arcilla de baja plasticidad (CL). El índice de plasticidad disminuyó de 33 a 19 al agregarle 10% de  $\text{NaCl}$ .

Dentro de las mejoras existentes se encuentran:

#### *a. Trabajabilidad*

Existen diversos estudios en los que se presentan mejoras en la trabajabilidad del material cuando se aplican sales como estabilizador de suelos. En general, al aumentar el contenido de sal en el suelo, ya sea  $\text{MgCl}_2$  o  $\text{NaCl}$ , se tendrá para un mismo esfuerzo de compactación una densidad más alta, por lo que para obtener un mismo nivel de compactación se pueden utilizar esfuerzos menores, lo que permite trabajar con maquinaria más pequeña o disminuir el número de pasadas necesarias. Por su parte, el contenido de humedad disminuye dependiendo de la cantidad de fino y clasificación, lo que permite un ahorro de agua en terreno (Thenoux & Vera, 2002).

*b. Estabilidad volumétrica*

En general, la utilización de sales permite una mejora en la estabilidad volumétrica, esto debido a la capacidad de los cloruros de reducir la temperatura de congelamiento del agua, lo que permite reducir la presión de levantamiento por formación de hielo que destruye la carpeta de rodado. En particular, en las arcillas la capacidad de intercambio iónico que reduce el espesor de la doble capa, disminuye el potencial de expansión debido al cambio de humedad, manteniendo una mejor estabilidad volumétrica (Pradena et al., 2010).

*c. Capacidad de soporte*

La utilización de sales en la estabilización de carpetas granulares busca mejorar las propiedades funcionales y no aumentar directamente la capacidad de soporte. Es importante tener en cuenta cuales son las consecuencias que las sales tienen sobre la capacidad de soporte, en especial en zonas húmedas, con el fin de realizar un correcto diseño estructural (Garnica et al., 2001).

Existen diversos estudios donde se evalúa la capacidad de soporte a través de la resistencia a la compresión simple, módulo Resiliente y CBR para distintos contenidos de sales. Las metodologías y resultados son variados, por lo que no se puede definir una tendencia clara y no se debe considerar el aumento de la capacidad de soporte como un mecanismo de estabilización.

*d. Reducción de la doble capa difusa*

La reducción de la doble capa difusa está asociada a la concentración de cationes y a la valencia del catión. La concentración de cationes se logra a partir de la cantidad de sal disponible en la mezcla, por lo que es una variable que se puede manejar a partir de la dosis de aplicación. Por otro lado, el  $\text{NaCl}^+$  tiene una valencia positiva, lo que lo deja en desventaja por sobre las otras sales ( $\text{MgCl}_2^{++}$  y  $\text{CaCl}_2^{++}$ ), las cuales tienen valencia dos. En consecuencia, para lograr un efecto equivalente en la reducción de la doble capa difusa, será necesaria una mayor concentración de  $\text{NaCl}$  que de  $\text{MgCl}_2$  o  $\text{CaCl}_2$ .

Cabe destacar que la reducción de la doble capa solo se produce en materiales plásticos, por lo que para materiales inertes no se debe considerar. Por otro lado, en zonas húmedas se deben utilizar materiales de baja plasticidad, por lo que, bajo esta situación, el  $\text{NaCl}$  no presentaría una desventaja frente a otras sales (Graell, 2010).

### **2.2.9. MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN DE MEZCLAS SUELO-SAL**

La superficie de rodado de un camino estabilizado con cloruros absorbe el agua del aire durante las horas de mayor humedad relativa (principalmente durante la noche y en la mañana). Esta humedad es retenida durante un período de tiempo que depende de las condiciones climáticas. Así, se evita la pérdida de partículas finas en forma de polvo y la posterior pérdida de partículas más gruesas producto de la acción abrasiva del tránsito y el viento, evitando así el inicio del proceso de deterioro (Thenoux & Vera, 2002). Esto se traduce en una menor tasa de deterioro del camino y del mejoramiento en la serviciabilidad. Como consecuencia, se produce una reducción de la frecuencia de actividades de conservación y mantenimiento, y de los costos asociados a este problema. Este mecanismo de estabilización se produce independientemente del tipo de fino que se utilice, ya que depende de las propiedades de las sales descritas anteriormente, provocando la absorción de humedad mediante mecanismos de higroscopía y deliquesencia, y por otro lado, la retención de humedad, disminuyendo la tasa de evaporación (Halles, 2007).

Otro de los beneficios asociados con el uso de cloruros es el fenómeno de cristalización como mecanismo estabilizador de suelos. Bajo condiciones de baja humedad relativa, generalmente durante la tarde en climas áridos, se produce la cristalización del cloruro en la fracción superior de la superficie de rodado, cementando las partículas finas. Esto forma una costra dura que puede provocar la impermeabilización de la superficie de rodado y resistir la acción abrasiva del tránsito, reduciendo la tasa de deterioro y mejorando la calidad de rodadura (Thenoux & Vera, 2002).

Específicamente la cristalización corresponde a un proceso por el cual, a partir de una disolución, los iones, átomos o moléculas establecen enlaces hasta formar una red cristalina. Por medio de la evaporación del disolvente de una disolución, por ejemplo, como es en el caso de la salmuera, se puede conseguir que empiecen a cristalizar los sólidos que estaban disueltos cuando se alcanzan los límites de sus solubilidades. Lo anterior resulta en un incremento en la resistencia al corte, y por ende, en la estabilización de los suelos. Por otro lado, la recristalización de estas sales en los espacios de los poros del suelo, los hace eficaces estabilizadores de suelos para caminos (Addo, Sanders, & D, 2004).

Por otra parte, durante los periodos de sequía, los cloruros se elevan cerca de la superficie de la carpeta debido a la acción capilar y cristalizan (Figura 2-16). Si se presentan lluvias o altas humedades, los cloruros pueden ser lixiviados fuera de la carpeta de rodado, por lo tanto, el riego periódico de los caminos puede reducir este efecto durante los periodos secos (Birst & Hough, 1999).



*Figura 2-16: Fenómeno de cristalización superficial en carpeta de rodado (Halles, 2007).*

## 2.3. DESARROLLOS RECIENTES

### 2.3.1. SITUACIÓN EN CHILE Y EXPERIENCIA MINERA EN CAMINOS

En Chile, la estabilización se encuentra incorporada en la normativa vial de manera más sistemática con posterioridad al año 2000, junto con la actualización del Manual de Carreteras y la implementación del programa gubernamental de mejoramiento de la red vial no pavimentada denominado "Caminos Básicos" en 2003, siendo presentado como una solución técnica de bajo costo para mejorar la condición de rodadura de carpetas granulares, con el fin de brindar una mayor durabilidad a los caminos, que la obtenida con una conservación tradicional. Además, trae como consecuencia una considerable reducción de las emisiones de polvo y una disminución en la frecuencia de intervenciones de conservación. Sin embargo, la mayoría de estas aplicaciones se han enfocado en caminos de zonas no afectas a condiciones climáticas desfavorables como las mencionadas anteriormente, con dosis de aplicación netamente empíricas. Además, mayor información sobre el uso y operación de estabilizadores utilizados en temporadas invernales, puede encontrarse en la experiencia práctica de aquellas empresas mineras emplazadas en la Cordillera de Los Andes, y que permanentemente deben hacer frente a sus condiciones climáticas adversas (MOP, 2009).

Dentro de las soluciones de sales como estabilizadores, la Bischofita y el Cloruro de Sodio son las predominantes, esto debido a su bajo costo en relación a las otras soluciones, rápida aplicación y poca demanda de maquinaria sofisticada (Tabla 2-2).

Tabla 2-2: Caminos pavimentados con sales del plan "Caminos Básicos 5000" (MOP, 2003).

Tipo de sal	Kms. Pavimentados	Porcentaje
Cloruro de Sodio	2668	42.3%
Cloruro de Magnesio	3393	53.8%
Cloruro de Calcio	245	3.9%
<b>Total</b>		<b>6306 kms.</b>

Como se mencionó anteriormente, ha sido el rubro de la minería quien precisamente ha dado protagonismo a esta última situación, debido a que gran parte de esta actividad se emplaza en la alta y media cordillera, y a que sus operaciones no se pueden detener por el impacto económico que supondría paralizar el proceso industrial (transporte de mineral, personal, logística, servicios, etc.). Por otro lado, el tránsito de maquinaria pesada y los horizontes de proyecto habitualmente hacen

económicamente inviable el uso de caminos pavimentados, debiendo recurrirse a soluciones granulares de alto desempeño (Pradena et al., 2010).

Dentro de la experiencia minera chilena sometida a condiciones extremas de hielo, nieve, humedad, lluvias y tránsito pesado, los caminos mineros poseen ciertas características propias del entorno en el que se encuentran y de su actividad operacional, siendo resumidas en:

- Calzadas entre 7 y 8 m. (hasta 21 m en el área del rajo y explotación).
- Espesores de carpeta de rodado entre 10 y 20 cm.
- Pendientes cercanas al 8% en promedio.
- Curvas horizontales con radios de giro variables, desde curvas de retorno de baja velocidad hasta curvas para velocidades de 70 Kph.
- Sistemas de drenaje conformados por cunetas a pie de talud de corte y camellones por el lado del terraplén. Peraltes y bombeos no siguen necesariamente un diseño de acuerdo con las normas.
- Alineamientos verticales y horizontales se adecuan a la topografía del lugar donde se emplazan las vías, no siguiendo en general diseños previamente estudiados.

La utilización de sales, y en particular de Cloruro de Sodio y Magnesio para la estabilización y control de polvo de carpetas granulares de rodado se ha realizado en Chile durante muchos años. Sin embargo, se desconoce el efecto que tiene la incorporación de estas sales mezcladas en la capa estabilizada, en términos de su efecto sobre las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

Tanto el cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita), el cloruro de sodio y el cloruro de calcio han sido evaluados por separado como estabilizadores químicos de capas de rodadura granulares y para Tratamientos de Control de Polvo, obteniéndose buenos resultados en el norte del país (Thenoux, Sandoval, Sepúlveda, Halles, & Graell, 2012). De la cuarta región al sur del país, las condiciones climáticas implican que la vida útil de proyectos que utilizan sales sea más baja (soluciones de carácter estacional), lo que ha derivado que se prefieran las soluciones basadas en asfaltos por su mayor vida útil. En efecto, las condiciones del entorno imponen restricciones en el uso de estabilizados de este tipo, particularmente en aquellas regiones con mayores precipitaciones.

Puesto que en nuestro país las estabilizaciones se realizan en su gran mayoría mediante el uso de sales, el aumento de la humedad producto de las lluvias deriva en la pérdida del producto y otros problemas que se mencionaron en secciones anteriores. Es por esto que existe una clara relación entre

zonas áridas del norte y el empleo de este tipo de estabilizadores, debido a sus propiedades compatibles con este tipo de climas. Los productos que mayormente se utilizan específicamente son los cloruros de sodio y de magnesio hexahidratado. Adicionalmente, a la ventaja de su empleo desde el punto de vista de los resultados, se tiene la cercanía de las fuentes de abastecimiento. Debido a su bajo precio, en algunos casos el costo de transporte supera al del producto. Aun cuando se han colocado sales en regiones al sur de Coquimbo, la relación costo-resultado ha sido deficiente, por lo que ya no se aplican, excepto en situaciones especiales, como en la temporada estival (MOP, 2009).

Una vez finalizada la temporada invernal en zonas de alta y media montaña en faenas mineras, generalmente se realiza una mantención de la carpeta de rodado de los caminos, reconstruyéndola con mezclas homogeneizadas de suelo y sal a utilizar, que es sobrepuesta a la anterior y finalizando con un sello del mismo producto (salmuera) mediante camión aljibe.

Debido a que la estabilización con sales ha sido utilizada principalmente en las zonas áridas y semiáridas de Chile, no está claro cómo afecta la humedad en la capacidad de soporte, pero se estima que el Cloruro de Sodio debería ser el menos perjudicial (Graell, 2010). Esto debido, como se mencionó en capítulos anteriores, a tener menor capacidad de absorber y retener la humedad que otras sales. Es por esto que se debe definir correctamente una capacidad estructural mínima para la cual se aseguren buenas condiciones de soporte durante períodos de lluvia y altas humedades. De esta forma, se asegura un buen desempeño estructural durante el invierno y un mejor desempeño de las propiedades funcionales durante las estaciones secas.

### 2.3.2. SITUACIÓN INTERNACIONAL

A diferencia de la situación en Chile, en el extranjero se advierte un escaso uso de productos para estabilización en condiciones meteorológicas extremas.

En países como Finlandia, Noruega, Escocia y Suecia, donde los inviernos suelen presentar características climáticas extremas y persistentes durante gran parte del año, se aplican operaciones de conservación de los caminos antes del invierno (mejoramiento saneamiento y drenaje, recebo, perfilado y restricciones al tránsito pesado), para minimizar los posibles deterioros causados por la nieve, hielo, lluvias y altas humedades, y antes del verano, con el fin de evitar problemas de polvo.

En otros países el Cloruro de Sodio junto al Cloruro de Calcio ya anteriormente han sido mezclados para ser utilizados como tratamiento para el control de polvo, específicamente en algunos estados de Norteamérica. Se menciona que la mezcla de 50% de  $\text{CaCl}_2$  y 50%  $\text{NaCl}$  puede ser utilizada como una forma económica de extender los beneficios del Cloruro de Calcio. El cloruro de Sodio proporciona una cierta estabilización de la superficie del agregado, mientras que el Cloruro de Calcio controla el polvo. Esto produjo una reducción considerable en los costos de material utilizado. Comparado con el uso del Cloruro de Calcio por sí solo, la mezcla de ambos redujo el costo en un 20%, y una pérdida menor al 5% en el nivel de control del polvo (Han, 1992).

Por su parte, el Cloruro de Magnesio posee las mismas ventajas y desventajas que el Cloruro de Calcio, sin embargo, este tiende a crear una superficie más dura que el  $\text{CaCl}_2$ , pero se necesita de un 18% a 20% más de sal para producir resultados comparables (Han, 1992).

El Cloruro de Calcio y el de Magnesio son relativamente caros, por lo que generalmente una mezcla de  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaCl}_2$  o  $\text{MgCl}_2$  se utilizar para reducir los costos y al mismo tiempo controlar el polvo con eficacia (Shakil & Ananya, 2015).

Por otro lado, en la literatura se menciona que la mezcla de  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaCl}_2$  es más efectiva en superficies del tipo “bien graduada” (Birst & Hough, 1999). Sin embargo, no existen estudios sobre la efectividad de mezclas de cloruros en términos de su comportamiento mecánico y efectos en la absorción y retención de humedad bajo distintas condiciones medioambientales.

### **3. BASES DEL TRABAJO Y DISEÑO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se detallan los procedimientos de ensayos a realizar para cumplir con los objetivos de la presente investigación. El objetivo principal es estudiar el efecto y comportamiento que tienen distintas mezclas de tipos de suelos y cloruros ante cambios de humedad y temperatura, esto bajo distintos ciclos de acondicionamiento en laboratorio.

Dentro de la metodología propuesta, se establecen ciertos parámetros necesarios para desarrollar los ensayos, como son la humedad relativa, temperatura, tiempos de exposición y dosis de cloruros para la confección de las muestras de suelos a ensayar. A partir de la variación de estos parámetros, se obtendrán gráficas o curvas de humedad para realizar los respectivos análisis. Posteriormente se ajustará un modelo matemático para las curvas obtenidas y así poder determinar el contenido de humedad de una mezcla de suelo y cloruro, para cualquier instante de tiempo en función de la humedad relativa existente. Lo anterior, con el fin de entregar recomendaciones en la elección del tipo de solución a utilizar en un determinado lugar, optimizando así el uso de sales como tratamiento de control de polvo de caminos no pavimentados en climas secos, y además, reducir el consumo de agua para riego de los caminos.

#### **3.2. TRABAJO EXPERIMENTAL**

Con el fin de medir y cuantificar el efecto que tiene la incorporación de mezclas de cloruros en distintos tipos de suelos, en la capacidad de absorción, retención o pérdida de humedad, y además, de representar tres tipos de condiciones medioambientales de terreno, se propone una metodología la cual consiste, en términos experimentales, en acondicionar a humedad y temperatura previamente definida cada una de las mezclas en cámaras de humedad y horno en laboratorio, para así medir la humedad de las muestras durante un determinado período de tiempo. Las variables que se controlan de humedad relativa, temperatura y tiempos de exposición a los cuales son expuestas las muestras, se detallan a continuación.

En una primera instancia como metodología de trabajo de laboratorio, se crearon probetas cilíndricas de 150x200 cms., las cuales fueron compactadas a humedad óptima inicial y se sometieron a ensayos en cámara de humedad bajo un ciclo de acondicionamiento de 54 horas totales, a temperatura constante (25°C) y humedades relativas de 40%, 65% y 90%, esto para dos tipos de suelos

con Índices de Plasticidad (IP) de 0 y 20, y utilizando 5 soluciones con distintos contenidos de cloruros. Los resultados se presentan en la sección 4.1.1.

Debido a la nula capacidad de absorción presentada en las probetas en estudio, esto dado el alto grado de compactación que presentan éstas, se decide agregar una fase previa de secado de las muestras en horno a 110°C durante 24 horas, para luego ser introducidas en la cámara de humedad bajo condiciones de humedad y temperatura de HR40% a 20°C, HR65% a 15°C y HR90% a 10°C, esto con el fin de poder observar de manera clara el comportamiento de absorción de las probetas en estudio. Los resultados de estos ensayos se presentan en la sección 4.1.2.

De lo anterior, nuevamente se presenta una baja capacidad de absorción de las probetas, por lo que a continuación se establece realizar los ensayos de las mezclas en bandejas metálicas de medidas 30x30x3 cms, utilizando 1.6 kg de suelo a humedad óptima, esto con el fin de abarcar una mayor área expuesta que las probetas, además de un nivel de compactación menor del suelo, lo que permitiría apreciar de mejor forma la capacidad de absorción de las muestras. Lo anterior se realiza bajo las mismas condiciones de acondicionamiento descritas en el párrafo anterior. Los resultados se presentan en la sección 4.1.3.

Finalmente, luego de analizar los resultados obtenidos de los experimentos anteriores, se determinó ensayar las muestras en bandejas bajo una nueva metodología definitiva que se presenta en las secciones posteriores, la que incluye una primera fase de absorción de las muestras en cámara de humedad y una posterior fase de evaporación (secado) en horno. Esta nueva metodología pretende ser más representativa y acorde con lo que ocurre comúnmente en terreno en la superficie de un camino no pavimentado durante un día, en donde los caminos se encuentran expuestos a un aumento de la humedad y disminución de la temperatura durante la noche, y a una disminución de la humedad y aumento de la temperatura durante el día. Así, se podrá observar de mejor manera los cambios o diferencias en términos de humedad que se presentan en las mezclas en estudio.

Para lo anterior, se confeccionaron bandejas para cada tipo de suelo y mezcla en estudio, donde las bandejas serán de medidas 30x30x3 cms, utilizando 1.6 kg de suelo a humedad óptima, igual a las descritas anteriormente.

Se utilizarán tres tipos de material granular, con IP de 0, 10 y 20, con el fin de abarcar un amplio espectro de tipos de suelos. La caracterización de estos suelos se realizará mediante la obtención de sus granulometrías, Límites de Consistencia, Clasificaciones AASHTO y USCS, ensayos de Proctor

Modificado y Razón de Soporte de California (CBR), los que se presentarán con más detalle en las próximas secciones.

Se elaborarán cinco mezclas de sales distintas, esto con diferentes proporciones de cloruros de Magnesio y Sodio (0% sales, 100%MgCl, 60%MgCl-40%NaCl, 40%MgCl-60%NaCl, 100%NaCl). Con respecto a la aplicación de las sales, estas serán mezcladas en seco con el material granular, mientras que la dosificación de sales a utilizar (Cloruro de Sodio y Magnesio) será constante para todas las bandejas y se ajustará a lo utilizado en terreno según la literatura y experiencia, lo que va a depender del Índice de Plasticidad (IP) del suelo a tratar (entre 60-80 kg/m<sup>3</sup>), en distintas proporciones de ambas sales cuando corresponda a una mezcla de ambas.

Una vez confeccionadas las bandejas, las muestras son secadas previamente en horno a 110°C durante 24 horas, con el objetivo que las mezclas queden sin humedad inicial, esto para que las sales cristalicen y poder apreciar mejor la absorción de las muestras. Posterior al enfriamiento de las muestras, estas serán acondicionadas en una cámara climatizadora a humedad y temperatura previamente establecidas durante un período de curado total de 30 horas (fase de absorción), en donde se espera que las sales de las muestras cambien su estado de sólido a líquido en presencia de humedad, permitiendo la absorción de humedad de los suelos. A continuación, las muestras serán acondicionadas en un horno a temperaturas constantes de 20°C, 30°C y 50°C, durante un período de secado total de 30 horas (fase de evaporación), en donde se espera establecer la tasa de evaporación o pérdida de humedad de las muestras en estudio. Con los resultados obtenidos, se crearán curvas y gráficos de humedad que permitan posteriormente ajustar un modelo matemático que involucre los parámetros en estudio, ya sea climáticos (humedad, temperatura y tiempo de exposición), junto con las características de los áridos (%finos, IP), con el fin de obtener una aproximación y validar los datos obtenidos sobre el comportamiento de los caminos en terreno.

Para representar y describir de mejor manera el trabajo experimental, se presenta a continuación un esquema de la metodología a desarrollar (Figura 3-1).

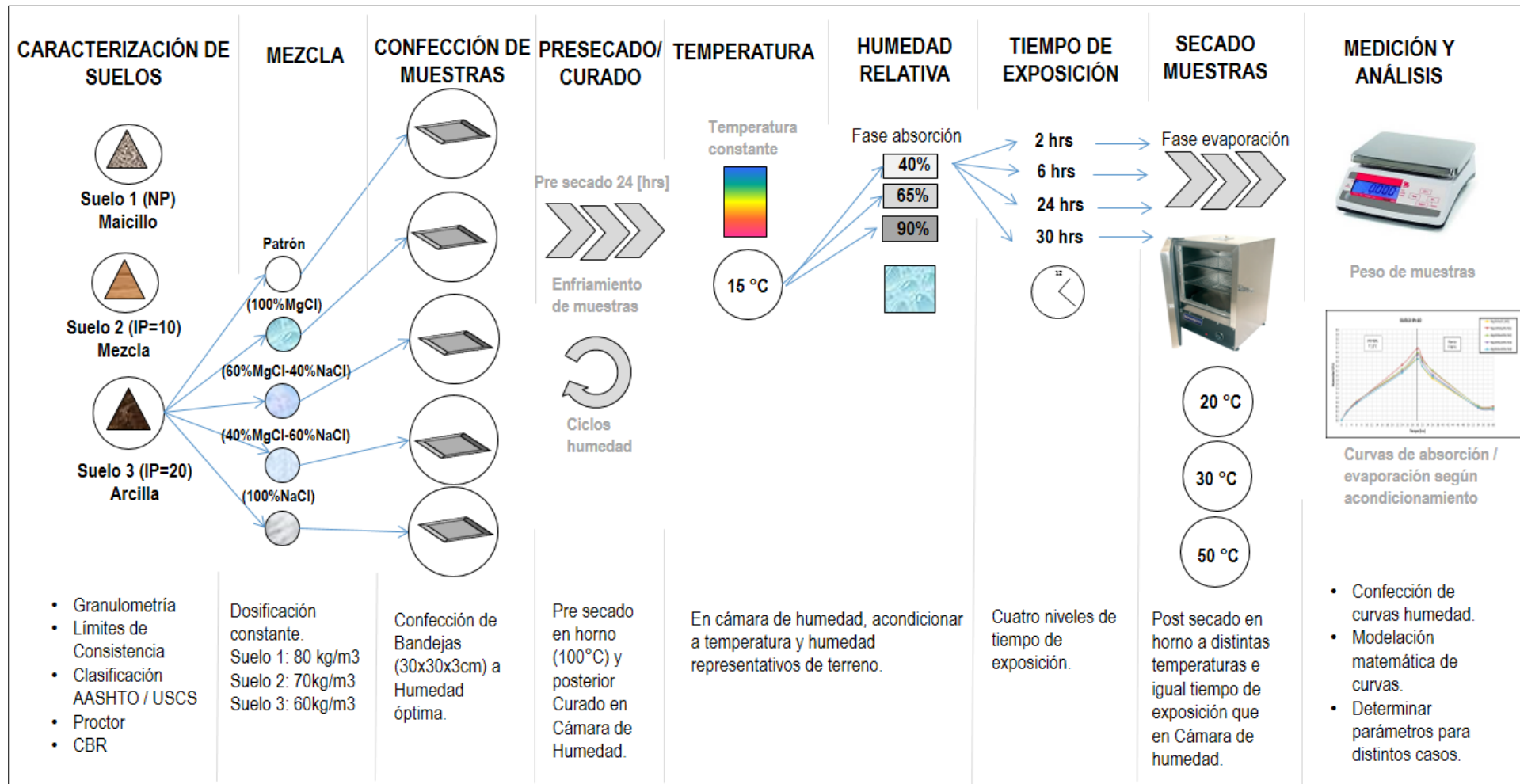


Figura 3-1: Esquema trabajo experimental.

### 3.2.1. DEFINICIÓN Y MUESTREO DE MATERIALES GRANULARES A ESTUDIAR

En esta etapa se definen los tipos de suelos que se van a estudiar, los cuales se obtienen a partir de un previo plan de muestreo de suelo para extraer y transportar al laboratorio los materiales.

Con el fin de representar un espectro amplio de tipos de materiales, se eligen tres tipos de material granular con Índices de Plasticidad de 0, 10 y 20, y distintas proporciones de fracción fina.

El primer tipo de suelo corresponde a un material arcilloso (IP=20) y el segundo corresponde a un suelo conocido comúnmente como maicillo (IP=0 ó NP) (Figura 3-2), ambos ya se encontraban en el laboratorio en sacos, los cuales fueron posteriormente secados, tamizados y clasificados en distintos tamaños de partículas para determinar su granulometría específica, para finalmente ser guardados en tambores sellados herméticamente. El tercer suelo, que resultó tener un Índice de Plasticidad igual a 10, se confeccionó en base a una mezcla en volumen de 50-50% de ambos materiales, obteniéndose la granulometría intermedia deseada.



Figura 3-2: De izquierda a derecha: Suelo Maicillo (NP), Suelo Arcilloso (IP = 20).

En la Figura 3-3, se muestra el análisis granulométrico realizado en laboratorio (según sección 8.102.1 del MC-V8). En la Tabla 3-1 y la Figura 3-4 se muestran las granulometrías de los materiales utilizados. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Tabla 3-1: Granulometría materiales utilizados.

Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Tipo de material (% que pasa)		
		NP	IP=10	IP = 20
3"	80	100	100	100
2 1/2"	63	100	100	100
2"	50	100	100	100
1 1/2"	40	100	100	100
1"	25	100	100	100
3/4"	20	100	100	100
3/8"	10	98.9	98.9	100
N° 4	5	92.3	92.8	99.4
N° 10	2	59.4	72.3	97.5
N°30	0.6	17.9	37.9	68.3
N° 40	0.5	13.8	33.0	61.5
N° 200	0.08	0.8	21.6	51

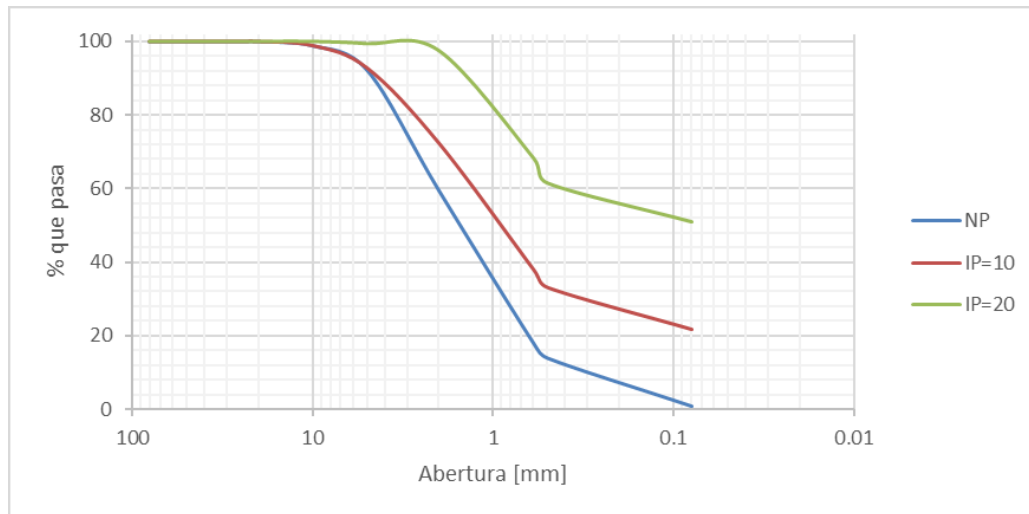


Figura 3-4: Curvas granulométricas de suelos.

Posterior al análisis granulométrico, se realizó la determinación de los Límites de Atterberg a cada una de las muestras de suelo (según NCh. 1517 Of. 79), con el fin de cuantificar la trabajabilidad de los

materiales evaluados a través de sus propiedades plásticas y determinar así el Índice de Plasticidad (IP). En la Tabla 3-2 se presentan los resultados de los suelos en estudio, mientras que en la Figura 3-5 se muestra el ensaye en laboratorio.

Tabla 3-2: Límites de Atterberg para muestras de suelos.

	Maicillo	Mezcla	Arcilla
Límite Líquido (LL)	0	30,3	53,3
Límite Plástico (LP)	0	20,2	33,5
Índice de Plasticidad (IP)	NP	10,1	19,8



Figura 3-4: Determinación de Límites de Atterberg.

Por otra parte, la clasificación de los suelos se hizo de acuerdo a los sistemas USCS<sup>5</sup> y AASHTO<sup>6</sup>, donde se obtuvo lo siguiente:

---

<sup>5</sup> Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

<sup>6</sup> Sistema de clasificación de suelos de la American Association of State Highway Officials.

Maicillo (NP):

- **Clasificación USCS:** (SW) Arena bien graduada sin finos.
- **Clasificación AASHTO:** (A-1-b) Fragmentos de roca, Grava y Arena.

Mezcla (IP = 10):

- **Clasificación USCS:** (SC) Arena arcillosa.
- **Clasificación AASHTO:** (A-2-4) Grava y arena arcillosa o limosa.

Arcilla (IP = 20):

- **Clasificación USCS:** (MH) Limo arcilloso inorgánico de plasticidad alta.
- **Clasificación AASHTO:** (A-7-5) Suelo Arcilloso.

Finalmente se realizan los ensayos de Proctor Modificado (según sección 8.102.7 MC-V8) y Razón de Soporte de California CBR (según sección 8.102.11 MC-V8) para ambos tipos de suelos, con el fin de determinar la relación humedad-densidad obtenida para una misma energía de compactación y la capacidad de soporte a través de la resistencia a la compresión simple, respectivamente. Más detalles de los ensayos se adjuntan en el Anexo A.

A continuación, en la Tabla 3-3 se muestran los resultados de los ensayos, mientras que en la Figura 3-6, los moldes utilizados para realizar los ensayos de CBR.

*Tabla 3-3: Resultados ensayo Proctor y CBR.*

	<b>NP</b>	<b>IP=10</b>	<b>IP=20</b>
<b>Humedad óptima (%)</b>	8,0	12,0	13,6
<b>D.M.C.S. (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,249	2,155	1,738
<b>CBR a 25 golpes (%)</b>	33,3	20,4	6,0



*Figura 3-5: Moldes para probetas de ensayos CBR.*

### 3.2.2. PREPARACIÓN DE MEZCLAS Y CONFECCIÓN DE BANDEJAS

El procedimiento de preparación de las mezclas suelo-sal se realiza en seco, el cual consiste en mezclar la sal seca (Figura 3-7) con el suelo para luego homogeneizar la mezcla agregando agua a la humedad óptima del suelo. Mediante este método, no existe una limitación en función a la capacidad de las sales de disolverse en el agua (salmuera), además de ser consistente con los métodos constructivos existentes en terreno. Además, permite una distribución de las sales más homogénea en toda el área que abarcan las bandejas a ensayar. La salmuera queda descartada como metodología de mezcla debido a la baja solubilidad del NaCl en agua, lo que produce un aconchamiento del producto en el fondo del recipiente de mezclado a grandes dosis, lo que impide una mezcla homogénea con el suelo.

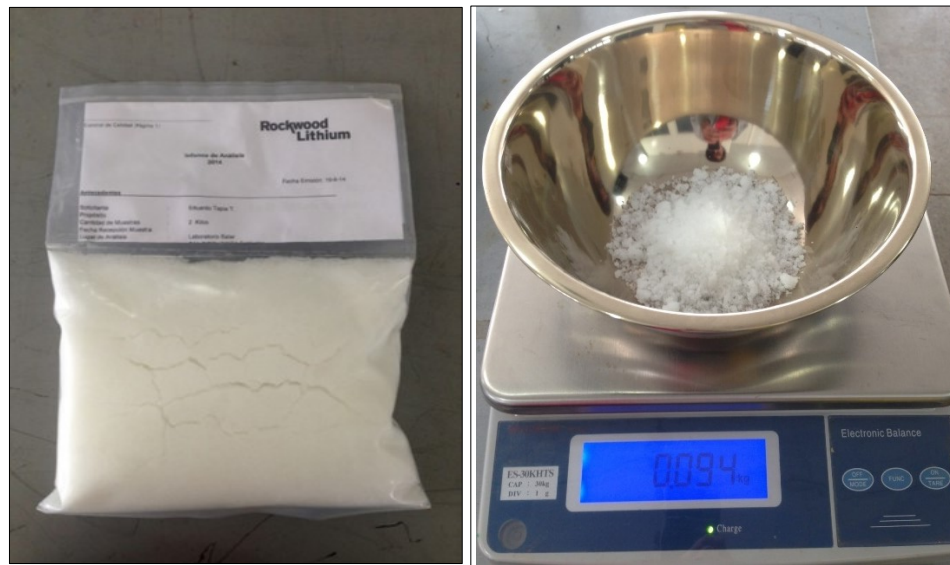


Figura 3-7: Muestra de bischofita para mezcla.

Las bandejas a utilizar poseen dimensiones de 30x30x3 cm, y se emplearon 1,6 kg. de material granular para cada bandeja, mezclado en seco con las distintas mezclas de cloruros establecidas en la metodología descrita anteriormente. Las dosificaciones que se utilizan se rigen de acuerdo a la revisión de la literatura descrita en capítulos anteriores, según la experiencia que se tiene en terreno, en donde a mayores Índices de Plasticidad del suelo se requiere una mayor dosis de sales, y viceversa. Se utilizaron las siguientes dosificaciones según el IP del suelo a mezclar:

- Suelo granular Maicillo (NP): **80 [kg/m<sup>3</sup>]**.
- Suelo mezcla (IP=10): **70 [kg/m<sup>3</sup>]**.
- Suelo Arcilloso (IP=20): **60 [kg/m<sup>3</sup>]**.

Posteriormente los suelos son compactados y perfilados superficialmente mediante la utilización de un rodillo manual, con el fin de emparejar y nivelar la superficie del suelo como se muestra en la Figura 3-8.



*Figura 3-8: Bandejas compactadas listas para acondicionamiento.*

### **3.2.3. CICLOS DE ACONDICIONAMIENTO (SECADO/CURADO)**

Una vez confeccionadas las bandejas, estas se encuentran a humedad óptima, por lo que son sometidas previamente a un ciclo de pre secado en horno por 24 horas a 100°C, con el fin de dejarlas sin humedad inicial.

Una vez sacadas del horno y enfriadas las muestras, estas se someten a un curado en una cámara de humedad bajo condiciones de humedad y temperatura controladas y previamente establecidas según se muestra en la Figura 3-1, con el fin de medir la absorción de humedad cada tiempo de exposición de 2, 6, 24 y 30 horas (fase absorción).

Posterior a las 30 horas en la cámara de humedad, las muestras pasan a un ciclo de secado en horno a temperatura controlada según se muestra en la Figura 3-1, con el fin de medir la tasa de evaporación de humedad que tienen las mezclas, bajo un período de 30 horas (fase evaporación).

Durante el período de acondicionamiento en Cámara de Humedad y Horno (Figura 3-9), se realizó a las bandejas un seguimiento de la humedad, con el objetivo de establecer el porcentaje de absorción, retención y/o pérdida de humedad para las distintas fases (absorción y evaporación) presentadas anteriormente en el esquema de trabajo (Figura 3-1).

La variable evaluada corresponde al contenido de humedad porcentual de cada bandeja. Esto se calcula en forma gravimétrica mediante la diferencia de pesos inicial y final de cada muestra. El procedimiento de medición del contenido de humedad se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en el Manual de Carreteras Volumen N° 8 sección 8.102.2 (Dirección de Vialidad, 2015a). El procedimiento de pesaje se realiza en balanza electrónica con una precisión de 0,001g. Estas pruebas se ejecutaron en el laboratorio de Obras Civiles de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo.

Las variables que se consideran para este ensayo corresponden al tipo de suelo, contenido de sales, humedad, temperatura y tiempo de exposición. La matriz experimental y un resumen de los parámetros a considerar en los ensayos se presentan en la Tabla 3-4 y Tabla 3-5 respectivamente.

Tabla 3-4: Matriz experimental.

	PARÁMETROS SUELOS				ACONDICIONAMIENTO														
	IP	% finos	Dosificación Cloruros (%)		Cámara humedad (fase absorción)				Secado en horno (fase evaporación)										
			MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	NaCl	T °C	HR (%)	t [h]	% humedad	T °C	t [h]	% humedad								
Suelo X	var	var	var	var	15	40		2	x	20		2	x						
								6	x			6	x						
								24	x			24	x						
								30	x			30	x						
						65				30									
						90				50									

Tabla 3-5: Resumen parámetros de ensayo.

parámetro	niveles
Suelos	3
Mezclas	5
T °C	1
HR	3
T° secado	3
t exp.	4

Una vez obtenidos los porcentajes de humedad para cada mezcla, se procede a la confección de curvas de humedad en el tiempo, en donde como se mencionó anteriormente, las primeras 30 horas corresponden a una fase de absorción en cámara de humedad, para luego durante otras 30 horas pasar a una fase de evaporación en horno. Así, se analizará la capacidad de las distintas mezclas para absorber, retener y perder humedad bajo la variación de los distintos parámetros descritos anteriormente.

Finalmente, la nomenclatura utilizada posteriormente en los gráficos y análisis de resultados para cada mezcla en estudio se presenta en la Tabla 3-6.

*Tabla 3-6: Nomenclatura de mezclas.*

MEZCLA	Contenido Cloruros (%)	
	MgCl <sub>2</sub>	NaCl
Mg0%Na0% (M0)	0	0
Mg100%Na0% (M1)	100	0
Mg60%Na40% (M2)	60	40
Mg40%Na60% (M3)	40	60
Mg0%Na100% (M4)	0	100

En la Figura 3-9 se muestra el acondicionamiento de las bandejas en Cámara de Humedad y Horno respectivamente, mientras que en la Figura 3-10 se muestra el control de las variables de humedad, temperatura y tiempo de exposición para la cámara de humedad.



Figura 3-8: Acondicionamiento en Cámara de humedad (izquierda) y Horno (derecha).



Figura 3-9: Control de humedad y temperatura en Cámara de Humedad.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo previo se presentó y detalló la metodología de trabajo para abordar los principales objetivos del presente estudio. En este capítulo se presentan y analizan los resultados de la etapa experimental asociada a esta metodología.

### 4.1. PÉRDIDA, RETENCIÓN Y ABSORCIÓN DE HUMEDAD

#### 4.1.1. ENSAYOS PREVIOS CON PROBETAS CILÍNDRICAS SIN SECADO INICIAL

En primera instancia, las probetas fueron acondicionadas a distintas humedades y una temperatura constante de 25°C, sin un previo secado en horno de las muestras.

A continuación, se presentan los resultados de las curvas de pérdida/absorción de humedad para los materiales IP=0 e IP=20, cada uno para los cinco tipos de mezclas en estudio (Figura 4-1 y Figura 4-2).

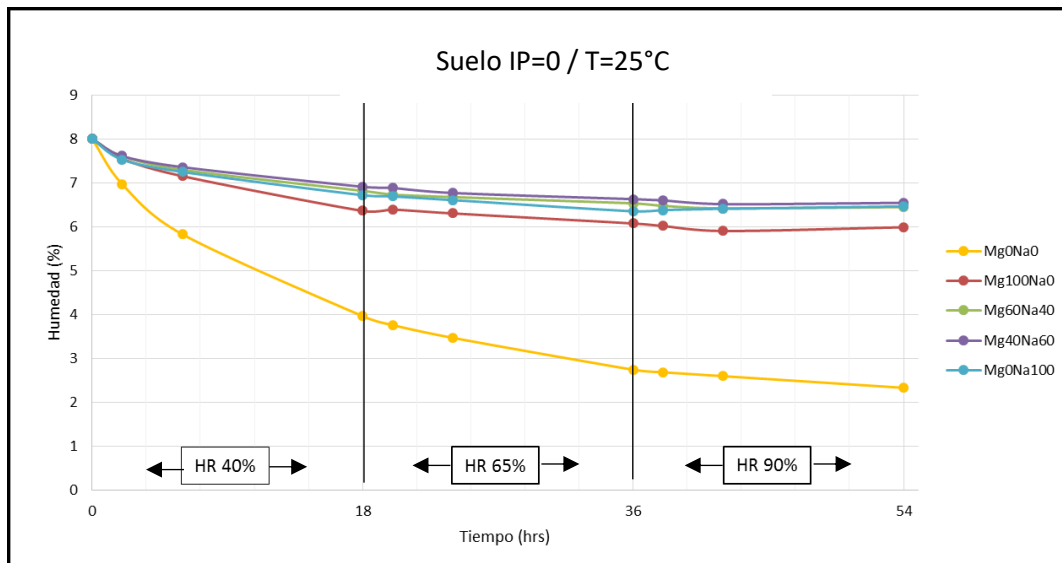


Figura 4-1: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=0.

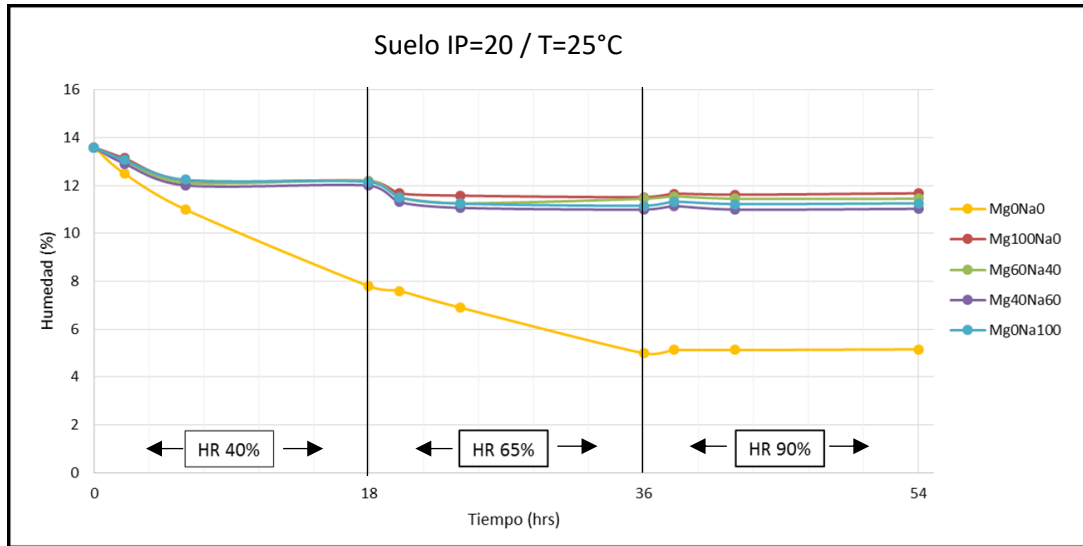


Figura 4-2: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=20.

Como se observa en las figuras, todas las probetas comienzan a perder humedad inmediatamente después de ser introducidas en la cámara de humedad. La probeta patrón sin sales (MgONa0) para ambos suelos, son las que presentan una pérdida más rápida de humedad en el tiempo. Sin embargo, ninguna mezcla en ambos tipos de suelo presenta una absorción de humedad, sino que, por el contrario, para el suelo con IP=0 presenta una curva decreciente de humedad para todas las mezclas, mientras que para el suelo IP=20, la humedad se mantiene prácticamente constante en el tiempo para las mezclas con sales.

Lo anterior se puede deber a que, al introducir las probetas a humedad óptima en la cámara, las partículas de suelo ya se encuentran saturadas al igual que los espacios entre éstas, por lo que no es posible para el suelo absorber la humedad deseada, y por otro lado, las sales contenidas en las muestra ya se encuentran diluidas por la presencia de humedad previa en las probetas, por lo que no actúa el fenómeno de higroscopía.

#### 4.1.2. ENSAYOS PREVIOS CON PROBETAS CILÍNDRICAS CON SECADO INICIAL

De acuerdo con lo señalado anteriormente, las probetas fueron acondicionadas a distintas humedades y temperaturas en el tiempo, con previo secado en horno (Figura 4-3 y Figura 4-4).

Las figuras a continuación presentan los resultados de las curvas de pérdida/absorción de humedad para los materiales IP=0 e IP=20 respectivamente.

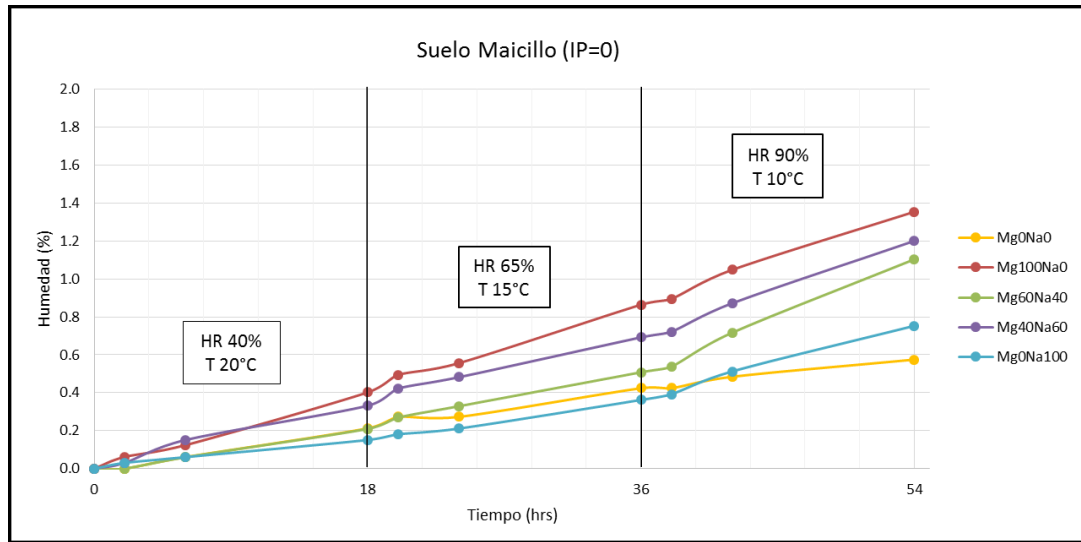


Figura 4-3: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=0.

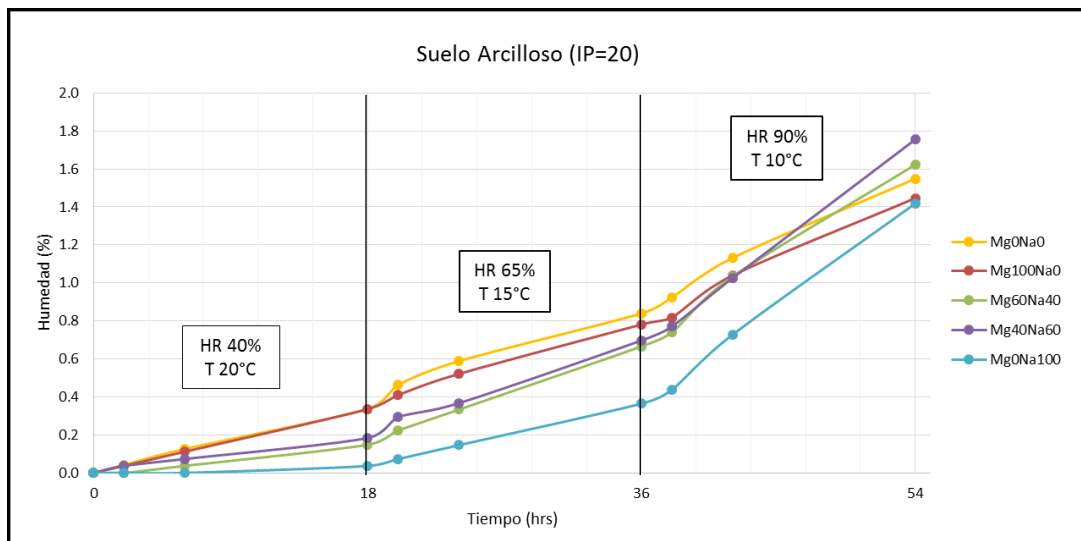


Figura 4-4: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=20.

A partir de los gráficos se observa que para el suelo IP=0, las muestras comienzan a absorber humedad desde el comienzo en que son introducidas a la cámara de humedad. Cuando la humedad aumenta a 65%, todas las muestras siguen absorbiendo humedad, a excepción de la probeta sin sales, la cual, a pesar de seguir absorbiendo, lo hace a una menor tasa que las demás. Ya cuando la humedad se encuentra en un 90%, se observa una mayor diferencia de absorción entre las probetas, destacando las muestras con 100% de  $MgCl_2$  que alcanza el mayor porcentaje de absorción con 1,4% en 54 horas y las muestras con una combinación de ambas sales, las cuales alcanzan el 1,2% de absorción, mientras que la probeta sin sales es la que absorbe menos humedad, como es de esperar, alcanzando solo un 0.6%, manteniendo su humedad casi inalterable al final del período de acondicionamiento.

Esto demuestra que el material granular con sales absorbe y mantiene la humedad, permitiendo mantener aglomeradas las partículas, lo que se relaciona con una disminución en el deterioro de la carpeta de rodado.

En general se observa una tendencia lineal creciente de absorción de las probetas con este material, con una diferencia clara de absorción mayor para las muestras con contenidos de  $MgCl_2$  y mezclas de  $MgCl_2$  y NaCl.

Para el caso del suelo con IP=20, la tendencia de absorción de las probetas no es la misma observada que para el material anterior, sino que, a partir de los cambios de humedad, las mezclas tienden a aumentar su capacidad absorción. Por otro lado, las mezclas al final del período de acondicionamiento no presentan una diferencia clara en cuanto a porcentaje de absorción.

En el comienzo del período de acondicionamiento, las probetas con 100%  $MgCl_2$  y sin sales, son las que poseen una mayor capacidad de absorción. Sin embargo, durante el período cuando la humedad se establece en un 90%, estas se ven superadas en absorción por las probetas con mezclas de sales, alcanzando estas últimas aproximadamente un 1.7% de humedad absorbida, mientras que al final de periodo, las probetas sólo con  $MgCl_2$  y NaCl son las que alcanzan un menor porcentaje de absorción.

En teoría, las probetas con  $MgCl_2$  comienzan a absorber humedad cuando ésta se encuentra por sobre el 32%, mientras que las con NaCl, a partir del 75%. En los gráficos esto se observa claramente, ya que las muestras con algún contenido de  $MgCl_2$  absorben humedad en mayor o menor medida durante todo el período de acondicionamiento, mientras que para las muestras sólo con contenido de NaCl ( $MgONa100$ ) presentan una tendencia de aumento considerable de absorción cuando la humedad alcanza el 90%.

Dado los resultados obtenidos (baja capacidad de absorción de las probetas estudiadas por el alto nivel de compactación de estas), se decide utilizar bandejas como las descritas en el capítulo 3 de metodología. Los resultados obtenidos utilizando bandejas se muestran a continuación.



*Figura 4-5: Probetas al final del período de secado en Horno.*



*Figura 4-6: Probetas en Cámara de Humedad al término del período de acondicionamiento.*

### 4.1.3. ENSAYOS PREVIOS CON BANDEJAS

De acuerdo a lo señalado anteriormente, las bandejas de material fueron acondicionadas a distintas humedades y temperaturas en el tiempo, con previo secado en horno.

Las figuras a continuación muestran los resultados de las curvas de pérdida/absorción de humedad para los materiales IP=0 e IP=20, cada uno para los cinco tipos de mezclas en estudio.

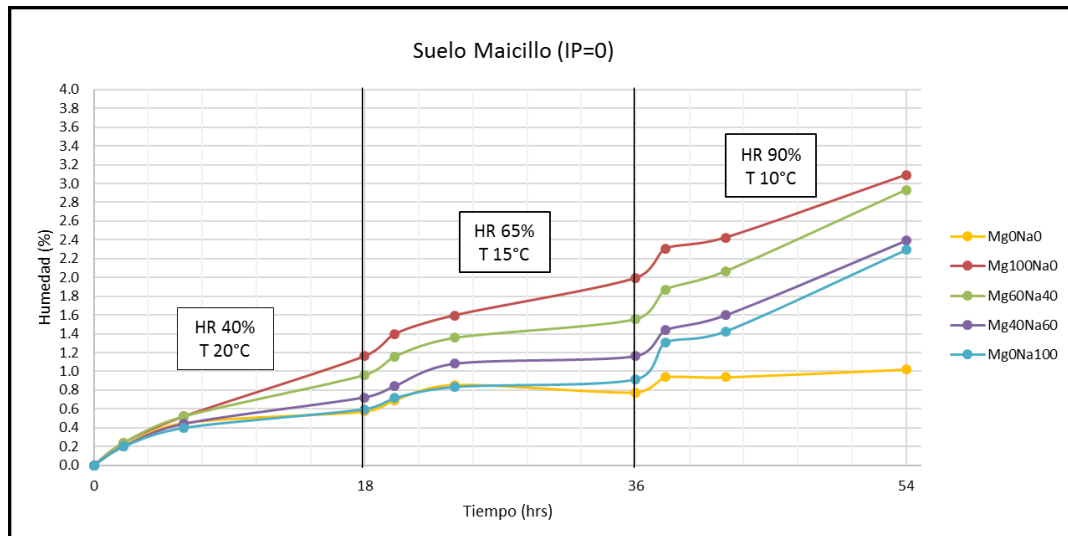


Figura 4-7: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=0.

Se observa que para el material IP=0 (Figura 4-7), las muestras absorben humedad en todo el período de acondicionamiento, a excepción de la muestra sin sales (M0). Las muestras que poseen un mayor contenido de  $MgCl_2$  (curvas rojo y verde), alcanzan alrededor de un 3% de absorción de humedad, mayor porcentaje en comparación a las que poseen mayor contenido de NaCl (curvas morado y celeste), las que alcanzan un 2,4%. La muestra sin contenido de sales prácticamente deja de absorber humedad a partir de las 18 horas cuando la humedad se encuentra en un 65%, manteniéndose constante al final del período, llegando solo a 1% de humedad absorbida.

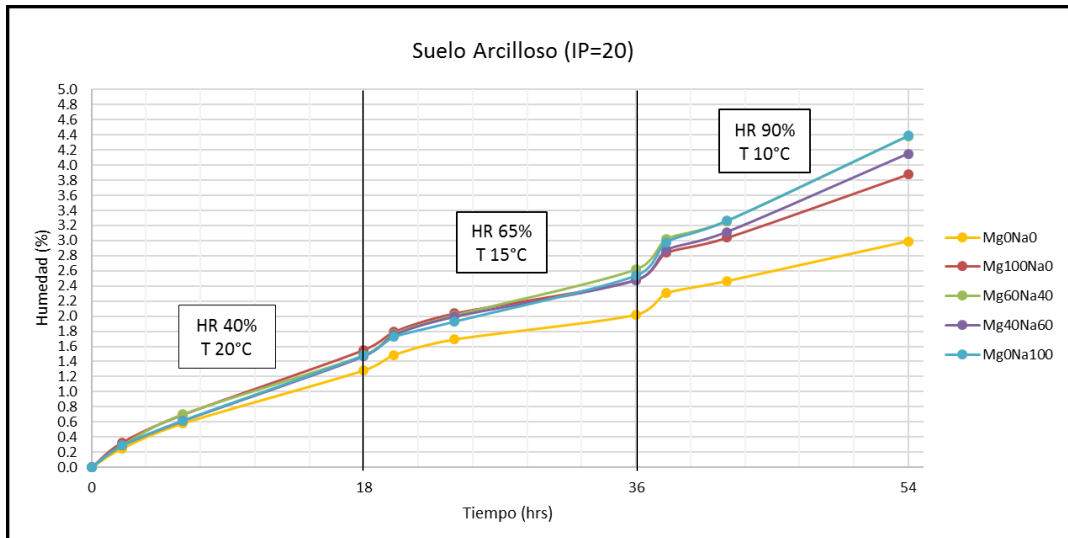


Figura 4-8: Gráfico Pérdida/Absorción de humedad suelo IP=20.

Para el material con IP=20 (Figura 4-8), se observa que todas las muestras absorben humedad de manera prácticamente lineal. Para el caso de las muestras que cuentan con sales, todas estas alcanzan altos porcentajes de absorción de humedad, siendo las mayores las mezclas Mg60%Na40% y Mg0%Na100% (curvas verde y celeste) que llegan al 4,4%, seguidas por la mezcla que contiene 40% de  $MgCl_2$  y 60% de NaCl que alcanza un 4,2%, y la mezcla con 100% de  $MgCl_2$  que llega al 3,8% de absorción. La muestra sin sales (curva amarilla), también absorbe humedad en todo el periodo de acondicionamiento, pero en menor medida, solo llegando al 3%.

Al comparar ambos tipos de suelos, se aprecia que las mezclas con mayor contenido de bischofita ( $MgCl_2$ ) son las que más absorben humedad en el tiempo en ambos suelos, mientras que la muestra sin contenido de sales es la que menos absorbe humedad, como es de esperarse.

Las muestras que contienen mezclas de sales (curvas verde y morado), no presentan grandes diferencias en absorción en comparación a las muestras que sólo contienen un tipo de sal. Comparando entre ambas muestras, la que posee un mayor contenido de bischofita (curva verde) presenta mejor desempeño en términos de absorción que la muestra que contiene más NaCl (curva morada).

Por otro lado, en ambos tipos de suelos al pasar a un 90% de humedad durante el período de acondicionamiento, se presenta un salto o cambio de pendiente en las curvas, lo que permite establecer que a mayor humedad las mezclas tienen una tasa de absorción mayor que a menores humedades.

#### 4.1.4. ENSAYOS CON BANDEJAS SEGÚN METODOLOGÍA

Los resultados obtenidos de absorción y pérdida de humedad de las muestras, bajo condiciones de humedad y temperatura según la metodología expuesta anteriormente, permiten obtener las curvas de absorción y evaporación para cada uno de los tipos de suelos y mezclas en estudio. A continuación, se presentan las curvas en orden según tipo de suelo.

a. Suelo Maicillo (NP)

i. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 40% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-9), 30°C (Figura 4-10) y 50°C (Figura 4-11).

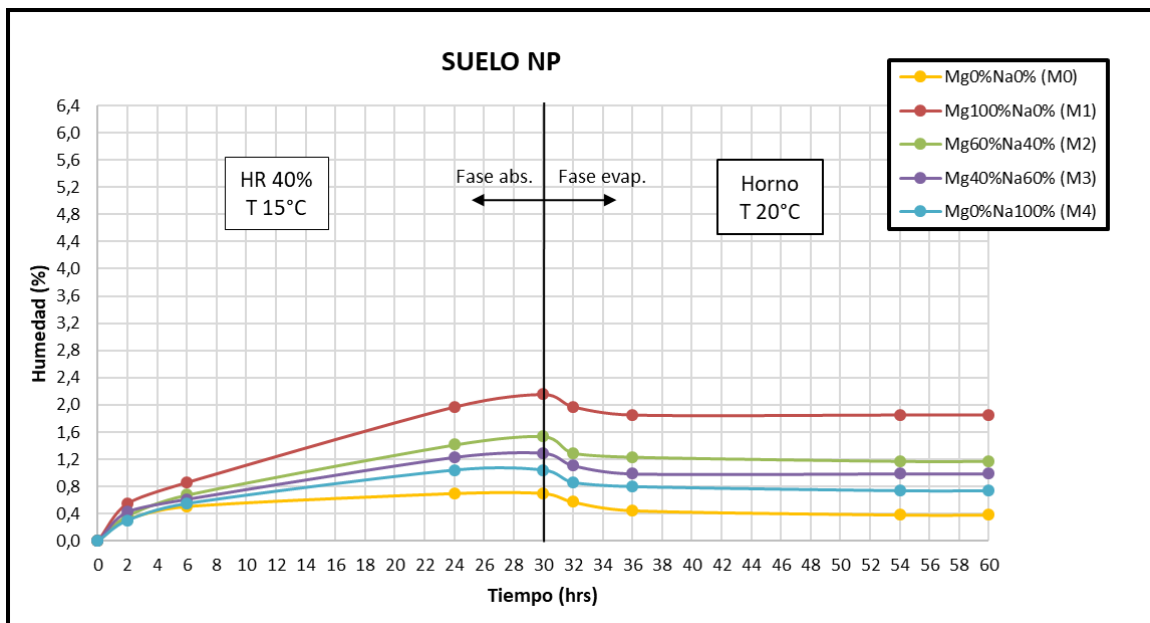


Figura 4-9: Suelo NP / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 20°C.

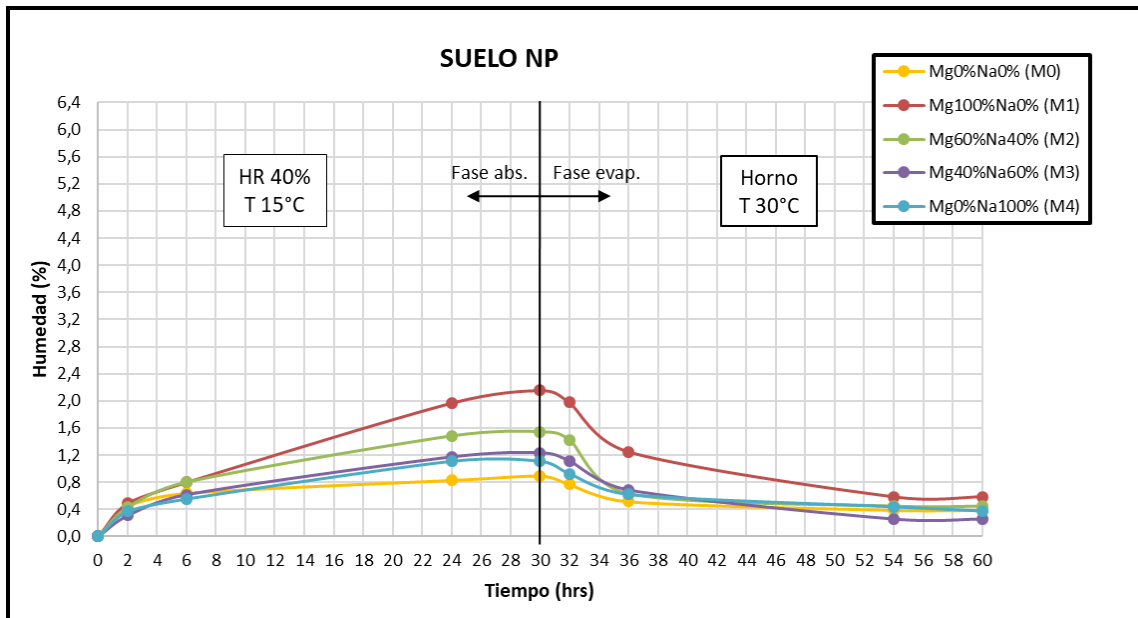


Figura 4-10: Suelo NP / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 30°C.

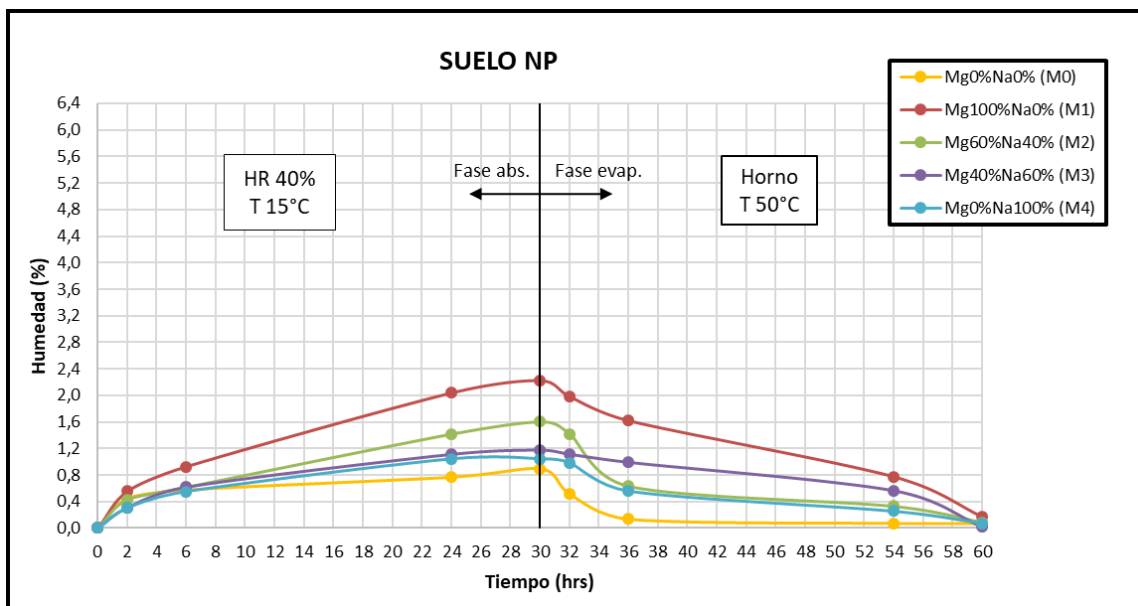


Figura 4-11: Suelo NP / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 50°C.

A partir de las curvas obtenidas, se establece que en relación a la capacidad de absorción de humedad de las mezclas es posible determinar que las que poseen  $MgCl_2$  son las que mayor capacidad de absorción poseen, llegando la mezcla M1 al 2,2%, seguido de las mezclas M2 y M3 que contienen mezclas de sales.

Por otro lado, se observa una tendencia de las curvas a una humedad de equilibrio constante en el tiempo. La mezcla sin contenido de sales (M0) alcanzó una humedad del 0,6% en las primeras 6 horas, para luego alcanzar un 0,8% a las 30 horas, manteniendo una tendencia casi constante al final del período.

Con respecto a la fase de evaporación en horno, se observa que todas las mezclas pierden la mayor parte de su humedad durante las primeras 6 horas, llegando a secarse completamente durante el final del período de acondicionamiento. Al comparar las tres temperaturas de secado, a 20°C se mantiene constante la humedad de las muestras en el tiempo sin llegar a secarse completamente, mientras que a 30°C las mezclas llegan a una humedad del 0,4% y para 50°C todas las muestras se secan completamente al final del ciclo, siendo la mezcla M0 la que alcanza primero esta condición al cabo de 6 horas.

En general, comparando entre las distintas mezclas, no se observa una gran diferencia en términos de la capacidad de absorción/pérdida de humedad.

ii. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 65% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-12), 30°C (Figura 4-13) y 50°C (Figura 4-14).

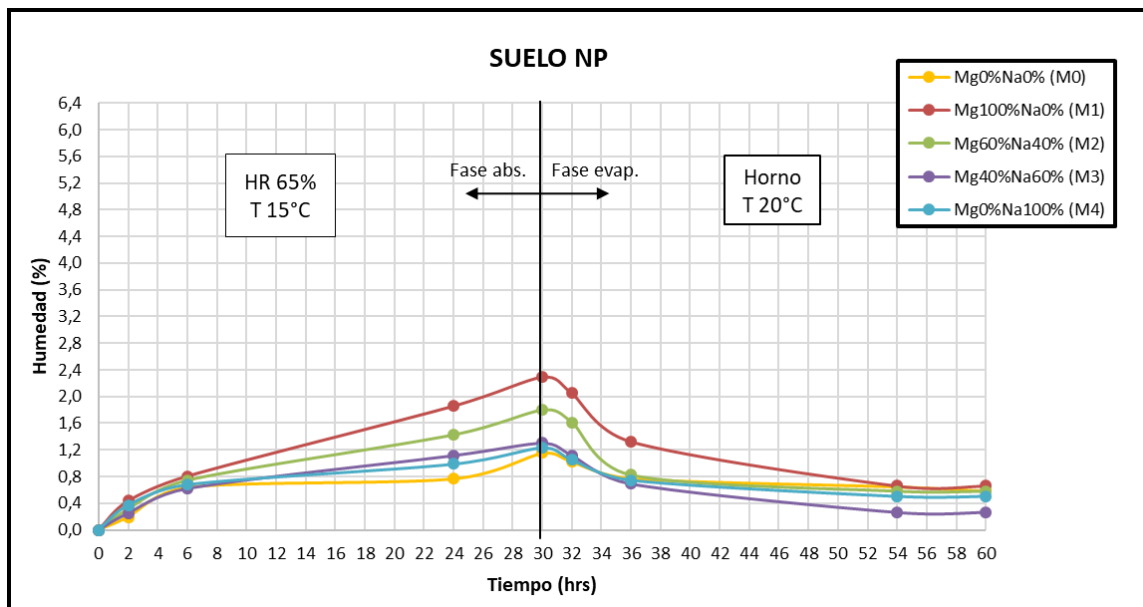


Figura 4-12: Suelo NP / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 20°C.

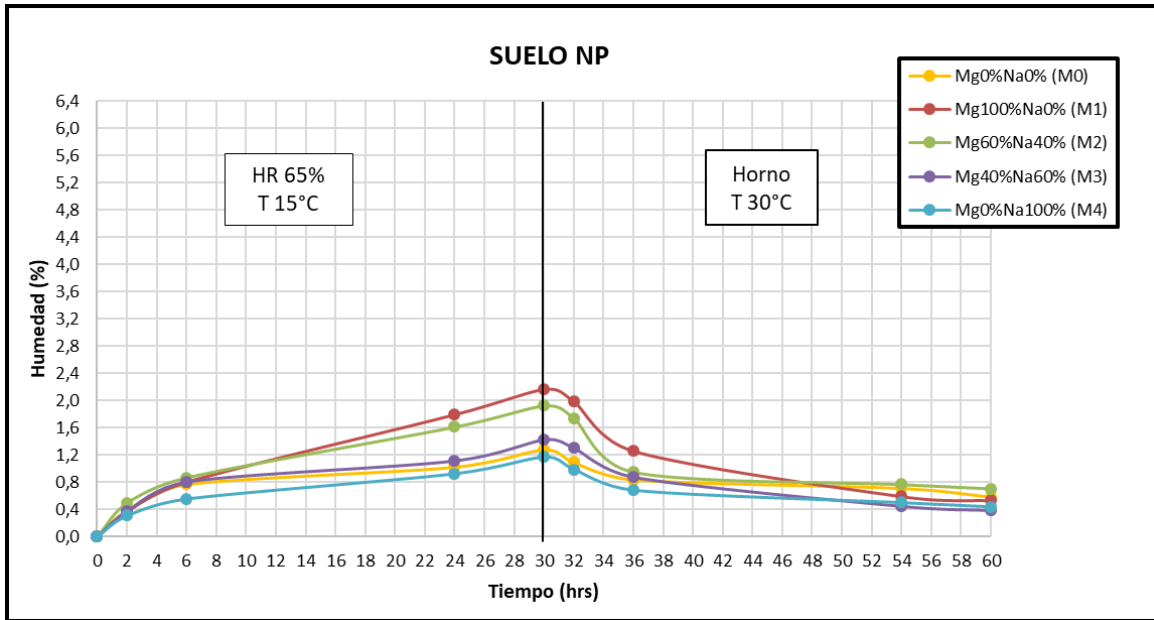


Figura 4-13: Suelo NP / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 30°C.

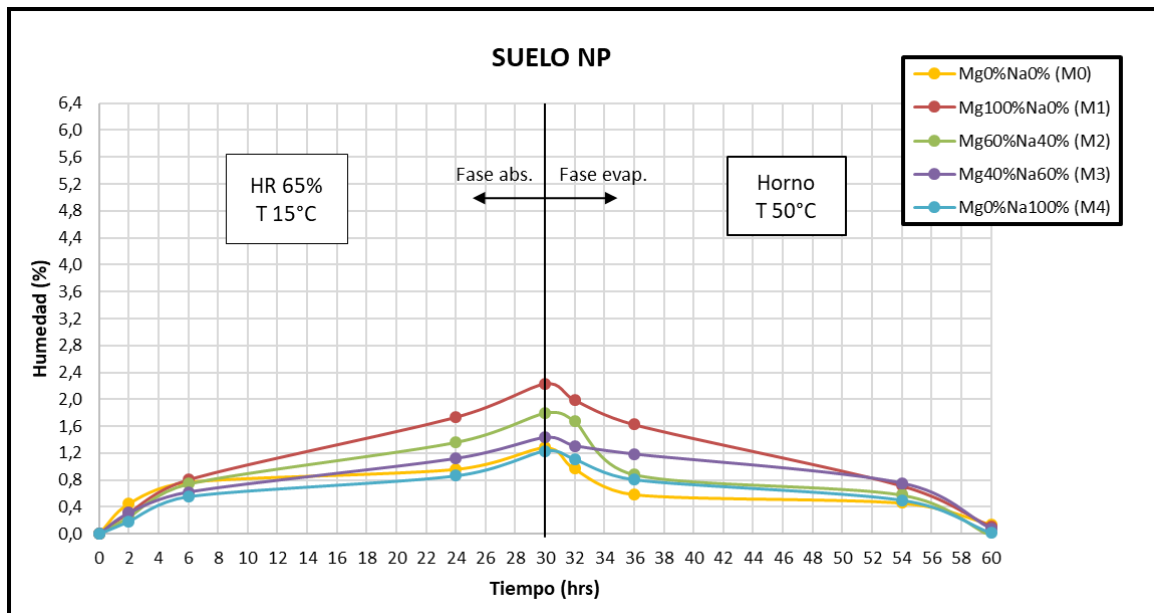


Figura 4-14: Suelo NP / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 50°C.

Al aumentar la humedad de acondicionamiento al 65%, se observa también un aumento del porcentaje de humedad absorbida de las mezclas. Al igual que para el caso anterior, las mezclas con mayor contenido de  $MgCl_2$  son las que presentan un mayor porcentaje de humedad absorbida. A diferencia del

caso analizado anteriormente, todas las curvas al final del periodo de absorción presentan una pendiente positiva que indica que las muestras pueden seguir absorbiendo humedad en el tiempo.

En la fase de evaporación, se observa nuevamente para todas las muestras una mayor pérdida de humedad durante las primeras 6 horas, para llegar a evaporar toda el agua solo a una temperatura de secado de 50°C.

iii. *Curvas de humedad con fase de absorción a HR 90% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-15), 30°C (Figura 4-16) y 50°C (Figura 4-17).*

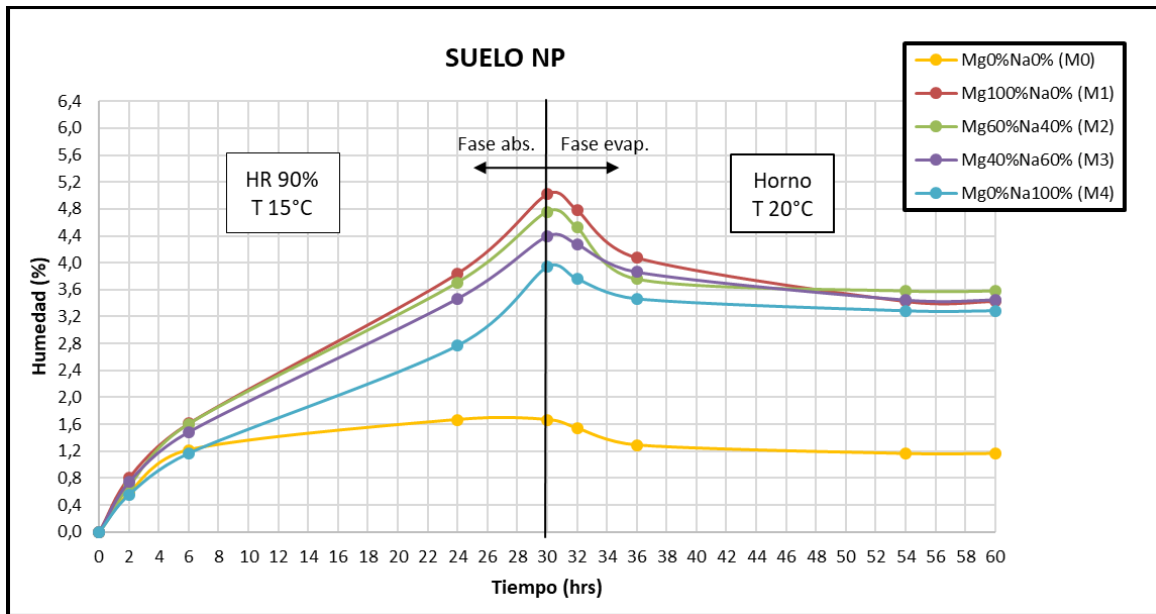


Figura 4-15: Suelo NP / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 20°C.

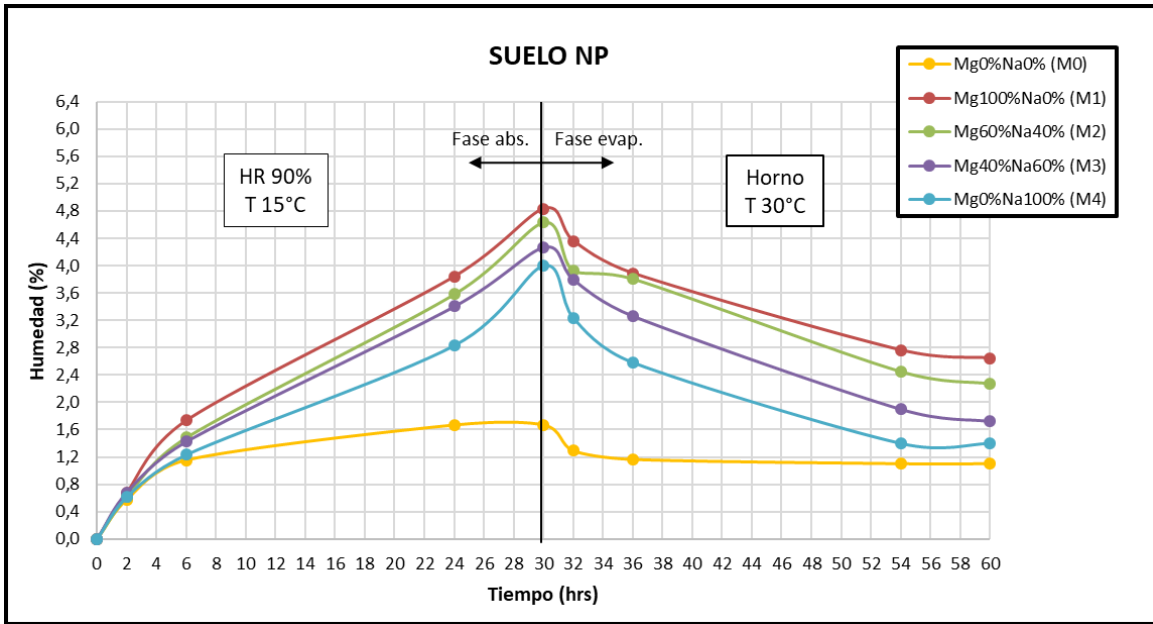


Figura 4-16: Suelo NP / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 30°C.

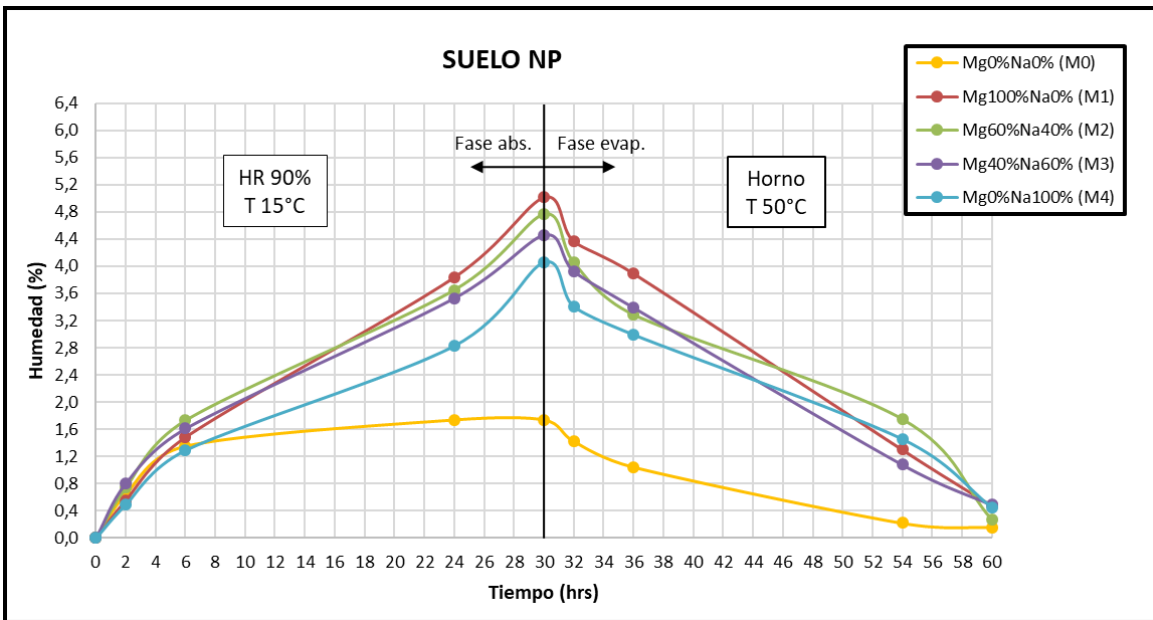


Figura 4-17: Suelo NP / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 50°C.

Para una humedad del 90%, se presenta un aumento considerable en la absorción para todas las mezclas, alcanzando aproximadamente un máximo del 5% de humedad, excepto para la muestra patrón sin sales, la cual alcanza tan solo el 1,6% aprox. de humedad absorbida. Las mezclas con sales siguen el

mismo orden en porcentaje de absorción, siendo las mezclas con contenido de  $MgCl_2$  las que alcanzan una mayor absorción. Además, se observa que las curvas con mezclas de sales presenten una tendencia creciente al final de la fase de absorción (30 horas), por lo que se puede establecer que estas podrían seguir absorbiendo humedad.

Con respecto a la fase de evaporación, para una temperatura de secado de 20°C y 30°C las muestras no pierden su humedad en totalidad, no así para el caso de una temperatura de 50°C, en donde todas las muestras presentan una tendencia casi lineal decreciente de pérdida de humedad, llegando a su completo secado al final del período de acondicionamiento, siendo la muestra sin sales (M0) la que alcanza primero esta condición a las 54 horas.

b. Suelo mezcla (IP=10)

i. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 40% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-18), 30°C (Figura 4-19) y 50°C (Figura 4-20).

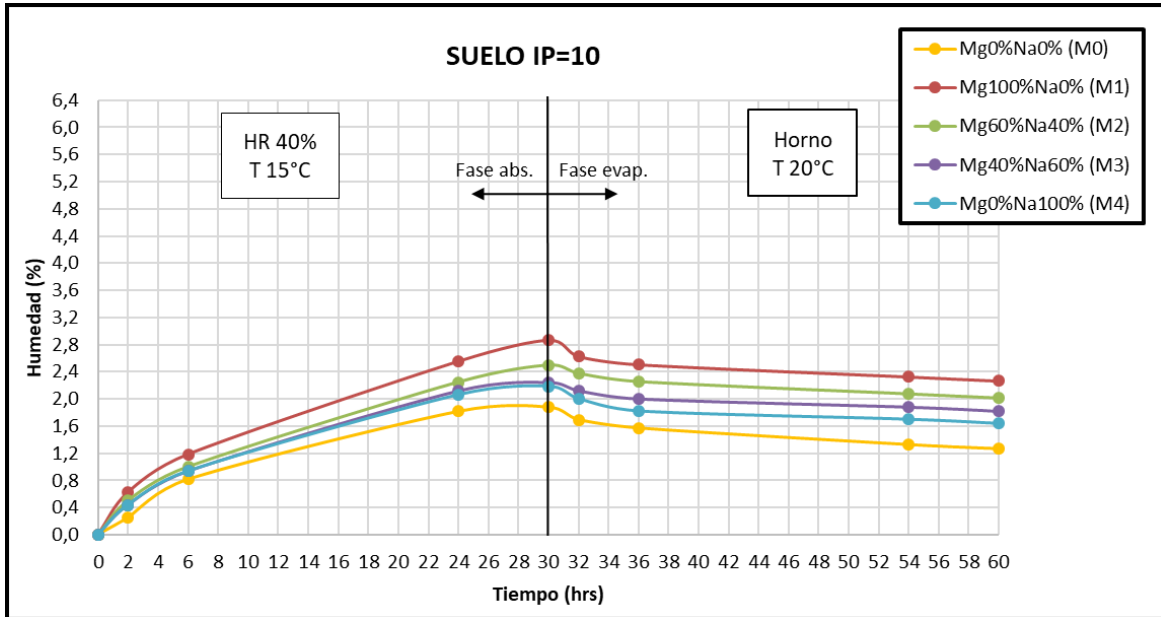


Figura 4-18: Suelo IP=10 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 20°C.

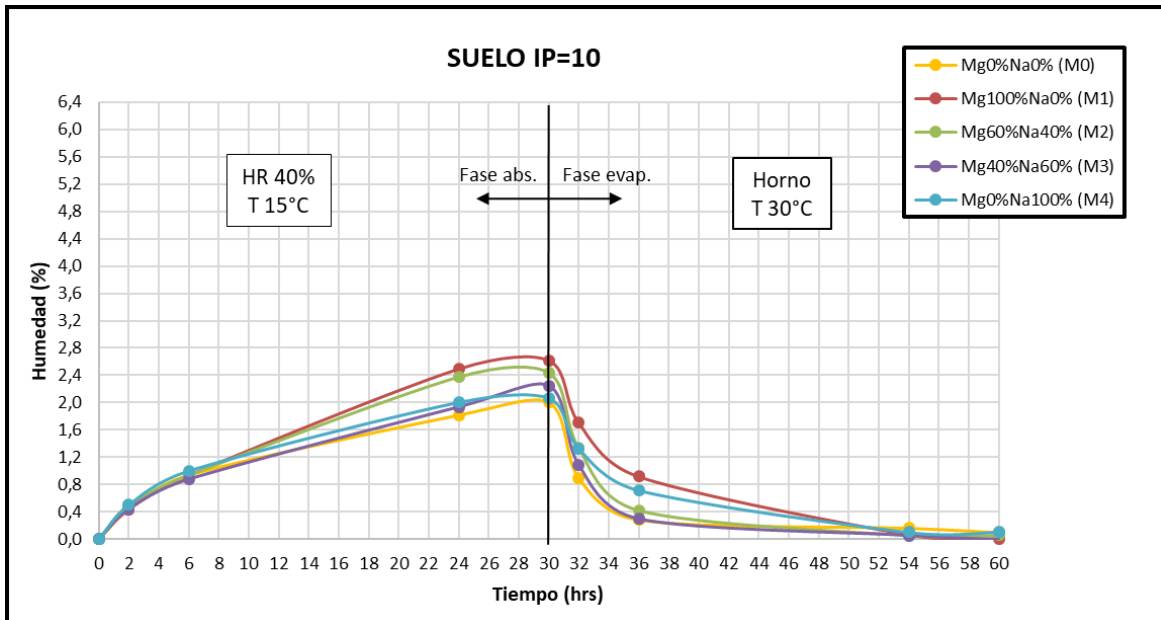


Figura 4-19: Suelo IP=10 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 30°C.

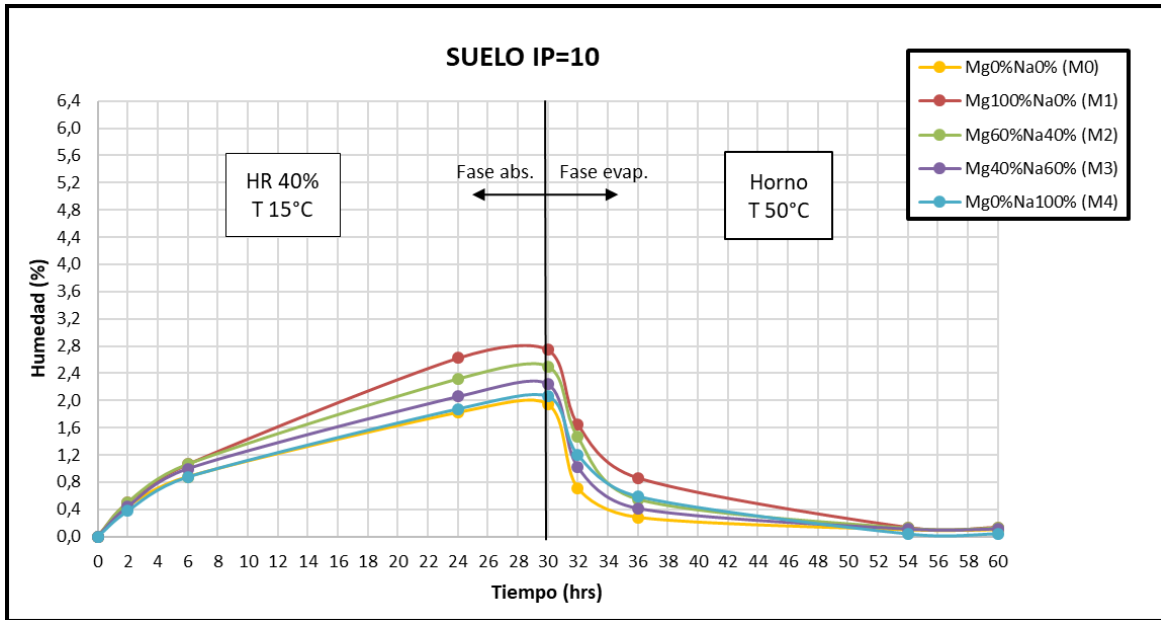


Figura 4-20: Suelo IP=10 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 50°C.

Para este suelo se observa un aumento en la capacidad de absorción con respecto al suelo maicillo (NP) bajo las mismas condiciones de humedad, alcanzando un 2,8% en promedio para la mezcla M1, mientras que la mezclas sin sales (M0) sigue siendo la que menos humedad absorbe alcanzando sólo un 2% al final de la fase de absorción. Sin embargo, la diferencia de humedad absorbida entre las mezclas no es grande, alcanzando tan solo una variación del 0.8% aprox.

Con respecto a la fase de evaporación, se observa que a una temperatura de 20°C las muestras pierden muy poca humedad en el período de 30 horas de secado (0,6% en promedio aproximadamente), sin llegar a secarse completamente, con una tendencia lineal al final de esta fase. Cuando se aumenta la temperatura de secado a 30°C, se presenta una considerable evaporación de la humedad durante las primeras 2 y 6 horas de secado, mismo fenómeno ocurre para 50°C. En ambos casos se llega a un 0% de humedad de las muestras durante el período de secado, a las 30 horas para 30°C y en 24 horas para 50°C.

ii. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 65% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-21), 30°C (Figura 4-22) y 50°C (Figura 4-23).

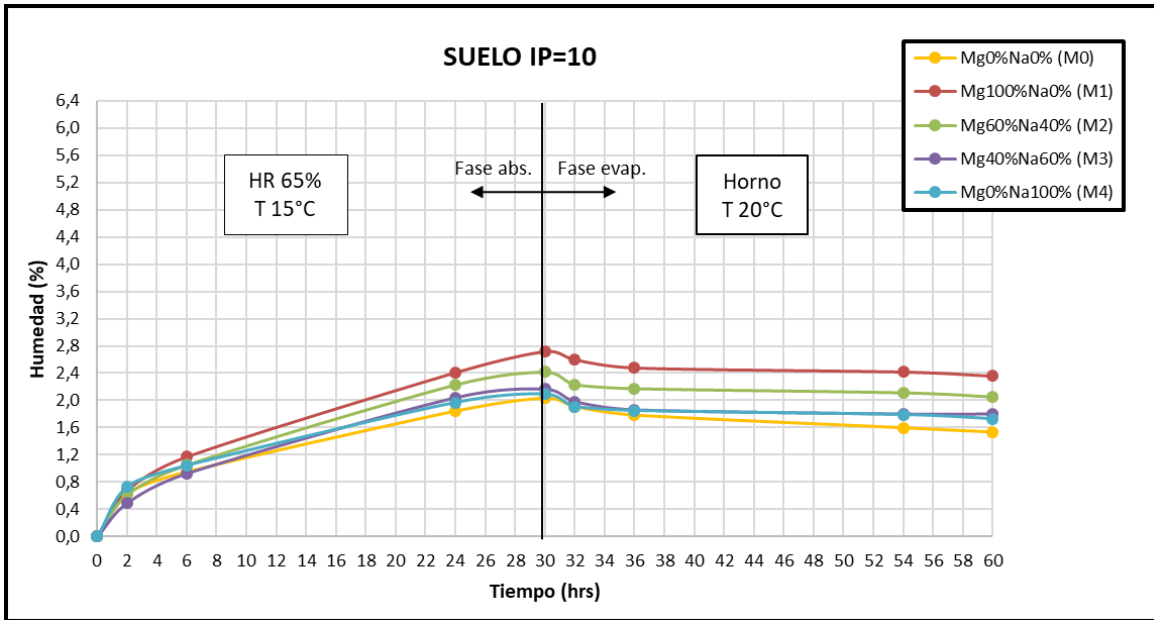


Figura 4-21: Suelo IP=10 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 20°C.

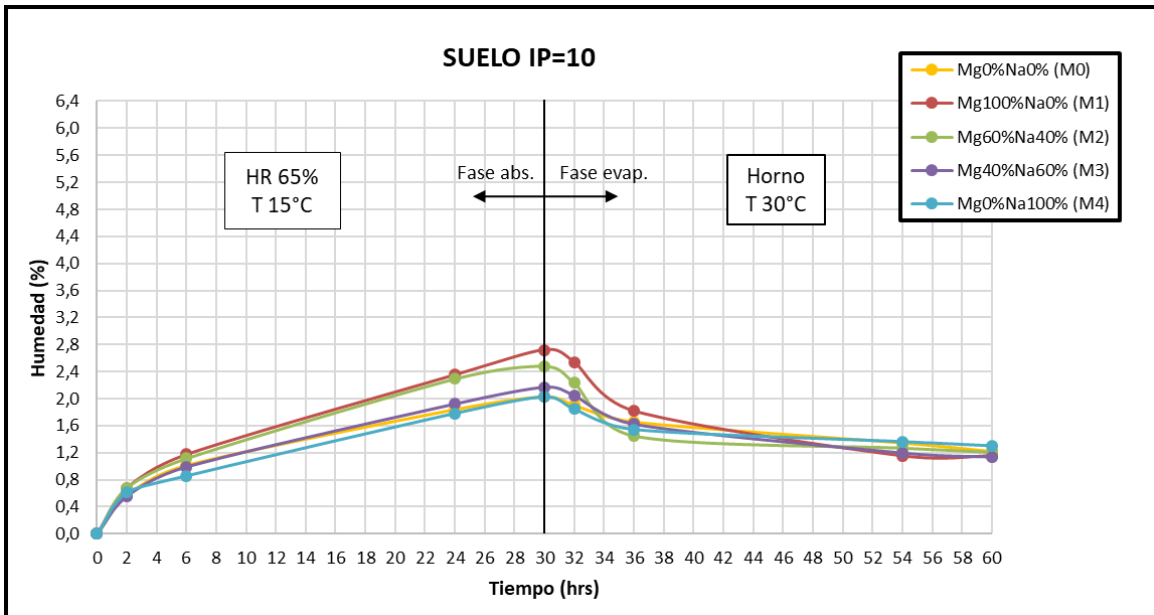


Figura 4-22: Suelo IP=10 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 30°C.

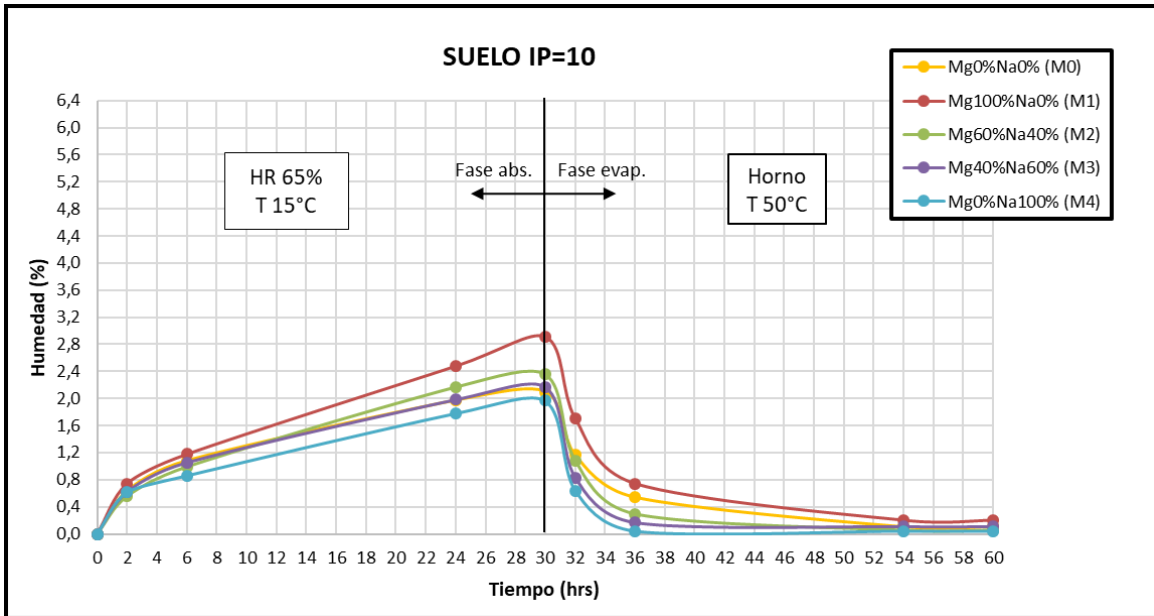


Figura 4-23: Suelo IP=10 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 50°C.

Al aumentar la humedad a un 65% en la fase de absorción, las muestras no presentan un aumento considerable en la absorción de humedad con respecto a una HR40%, ni una diferencia de humedad entre ellas. Durante el período de evaporación a una temperatura de secado de 20°C se observa que las muestras alcanzan una humedad de equilibrio casi constante en el tiempo, presentando una pérdida de humedad del 0,4% en promedio para el período de 30 horas. Para temperaturas de secado de 30°C y 50°C, las muestras aumentan considerablemente su pérdida de humedad principalmente durante las primeras 6 horas, llegando a secarse completamente al final de la fase de evaporación.

iii. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 90% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-24), 30°C (Figura 4-25) y 50°C (Figura 4-26).

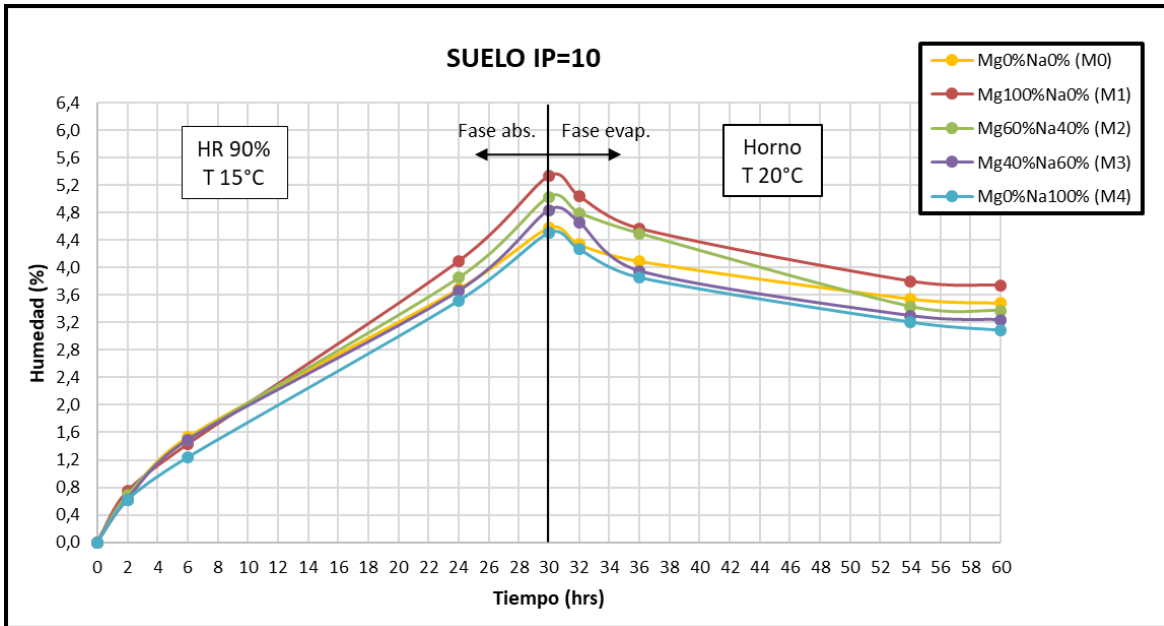


Figura 4-24: Suelo IP=10 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 20°C.

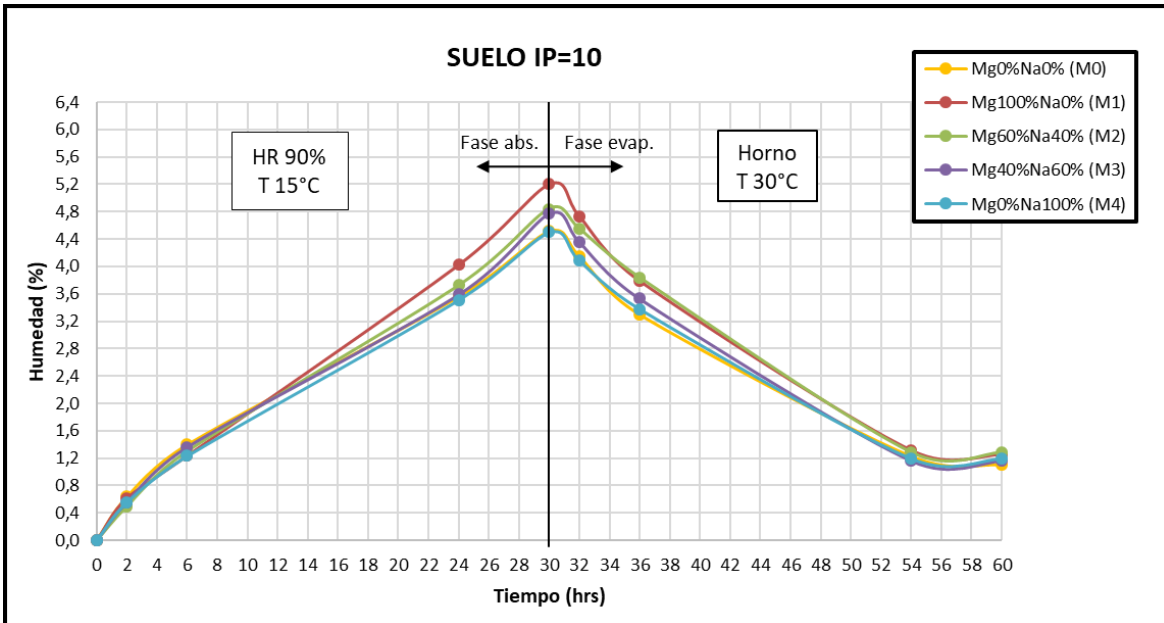


Figura 4-25: Suelo IP=10 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 30°C.

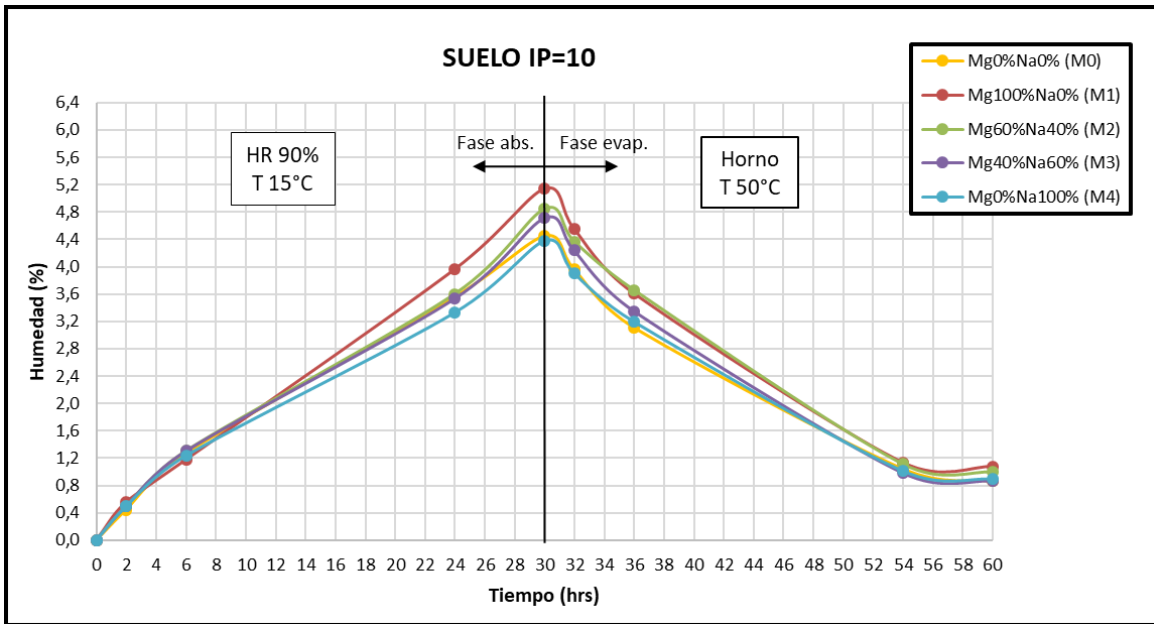


Figura 4-26: Suelo IP=10 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 50°C.

A una humedad de acondicionamiento del 90%, las mezclas presentan un aumento considerable en su porcentaje de humedad absorbida. En un comienzo todas las muestras absorben humedad a la misma tasa, donde recién a las 24 horas la mezcla con mayor contenido de bischofita (M1) presenta un aumento en la absorción con respecto a las otras, llegando al 5,2% de humedad, mientras que las muestras con mezclas de sales (M2 y M3) alcanzan un 4,8% de humedad en promedio aproximadamente, y finalmente las muestras con NaCl (M4) y sin sales (M0) son las que absorben una menor cantidad de humedad, llegando a un 4,4% en el período de 30 horas. Además, se observa que todas las muestras presentan una tendencia a seguir absorbiendo humedad al final de esta fase.

Con respecto a la fase de evaporación, las muestras expuestas a 20°C presentan una diferencia de humedad del 1,4% en promedio aproximadamente durante el período de 30 horas, con una tendencia a mantenerse constante. Para 30°C y 50°C se presenta una tendencia casi lineal decreciente durante las primeras 24 horas de la fase, para luego mantener una tendencia constante, sin llegar a secar las muestras por completo.

c. Suelo arcilloso (IP=20)

i. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 40% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-27), 30°C (Figura 4-28) y 50°C (Figura 4-29).

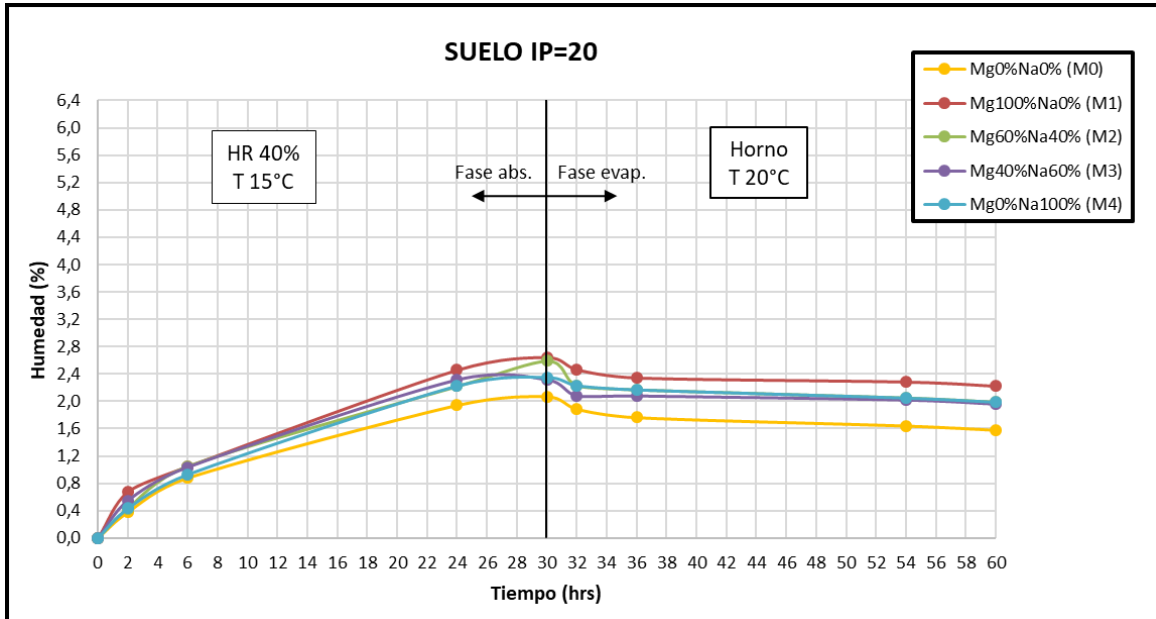


Figura 4-27: Suelo IP=20 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 20°C.

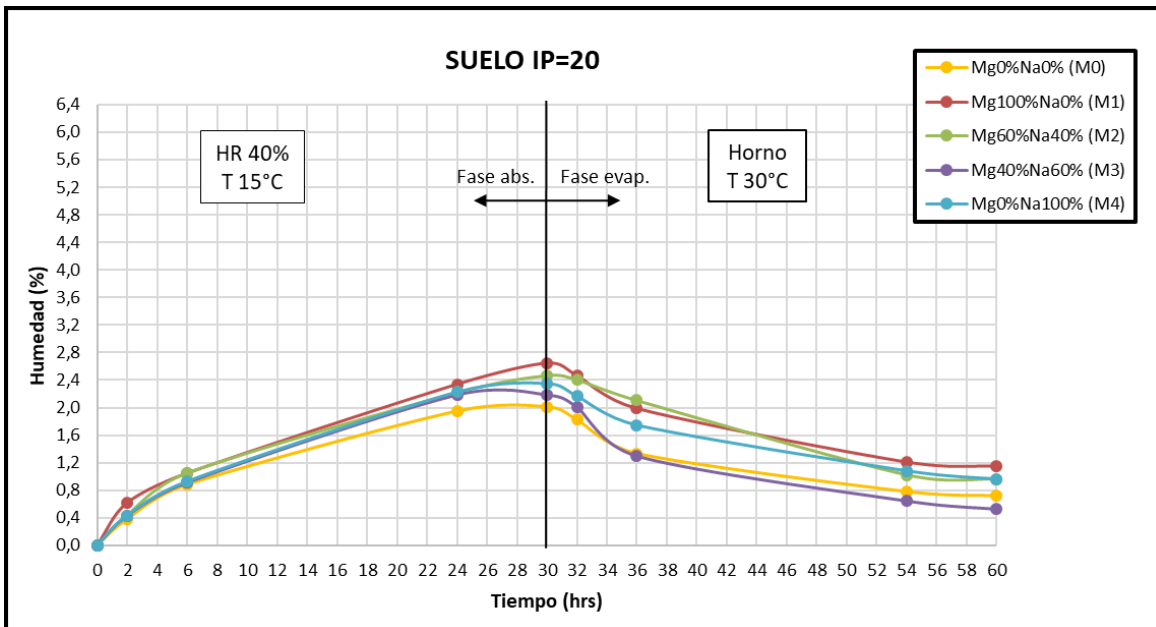


Figura 4-28: Suelo IP=20 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 30°C.

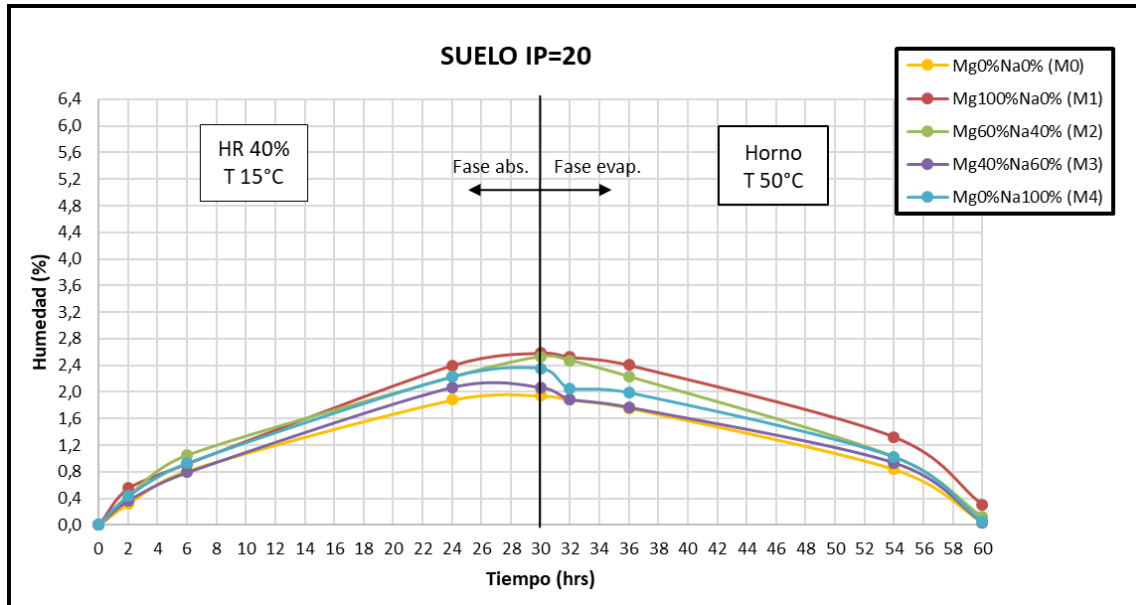


Figura 4-29: Suelo IP=20 / Fase absorción HR40% / Fase evaporación 50°C.

Al igual que para los suelos anteriormente analizados, las muestras con mayor contenido de bischofita son las que presentan una mayor capacidad de absorción de humedad en el período de acondicionamiento, mientras que la muestra sin sales es la que menos capacidad de absorción tiene como es de esperarse. Por otro lado, todas las muestras tienden a una humedad de equilibrio al final de periodo de absorción de 30 horas, llegando las mezclas entre el 2% y 2,8% de humedad. Durante las primeras 2 horas de esta fase se observa una mayor capacidad de absorción de la mezcla con bischofita (M1) respecto de las otras, para luego mantener una tendencia casi lineal creciente de absorción de todas las muestras hasta el final del período.

Durante la fase de evaporación, se observa que para una temperatura de 20°C ocurre una leve disminución en el porcentaje de humedad de las muestras, donde la mayor pérdida de humedad se produce durante las primeras 2 horas. Durante las 30 horas de acondicionamiento en horno, se produce una pérdida de humedad de alrededor del 0,4% para todas las muestras.

Para una temperatura de 30°C se presenta una tendencia lineal decreciente durante las primeras 24 horas, para mantenerse relativamente constante para el final del período. Se observa que las mezclas M0 y M4 son las que presentan una mayor tasa de evaporación durante las primeras 6 horas.

Para una temperatura de secado de 50°C, todas las muestras a excepción de la mezcla M1 alcanzan a evaporar completamente el agua absorbida durante las 30 horas del período de secado. La tasa de evaporación se mantiene casi lineal decreciente durante las primeras 24 horas. Por otro lado, las mezclas con mayor contenido de NaCl presentan una mayor pérdida de humedad durante las primeras 2 horas de la fase en comparación a las otras.

ii. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 65% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-30), 30°C (Figura 4-31) y 50°C (Figura 4-32).

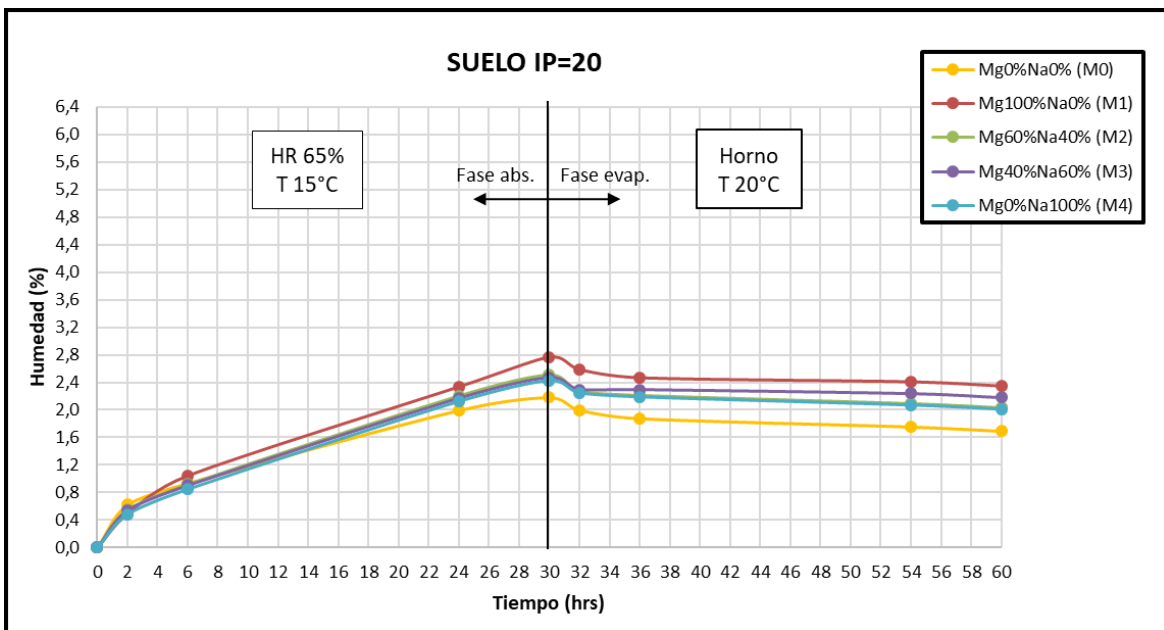


Figura 4-30: Suelo IP=20 /Fase absorción HR65% / Fase evaporación 20°C.

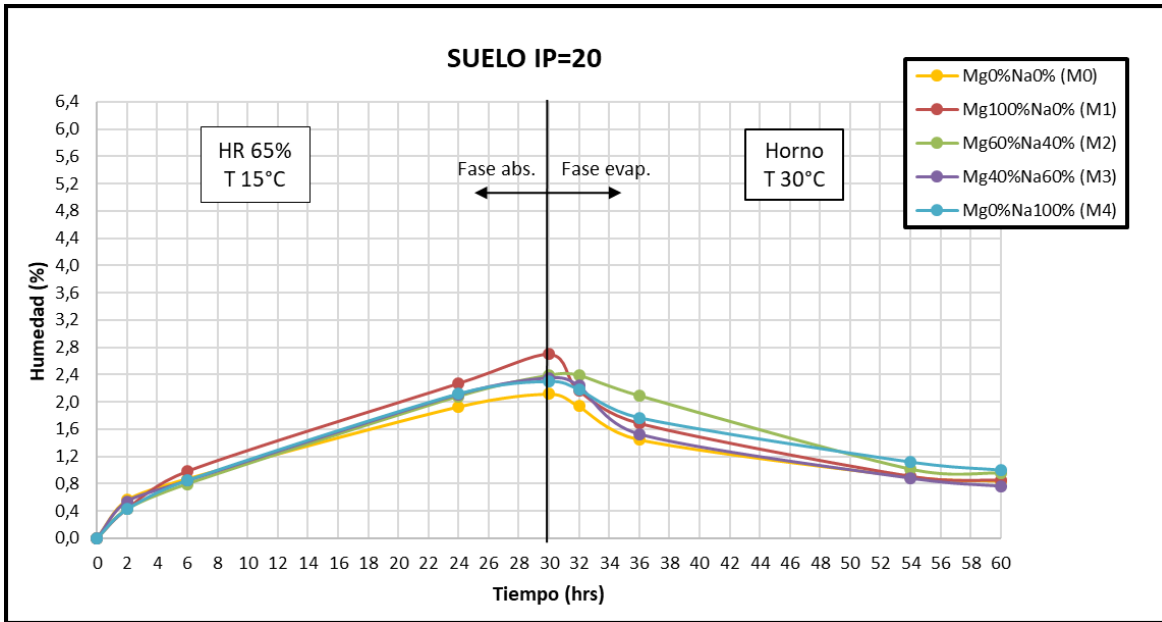


Figura 4-31: Suelo IP=20 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 30°C.

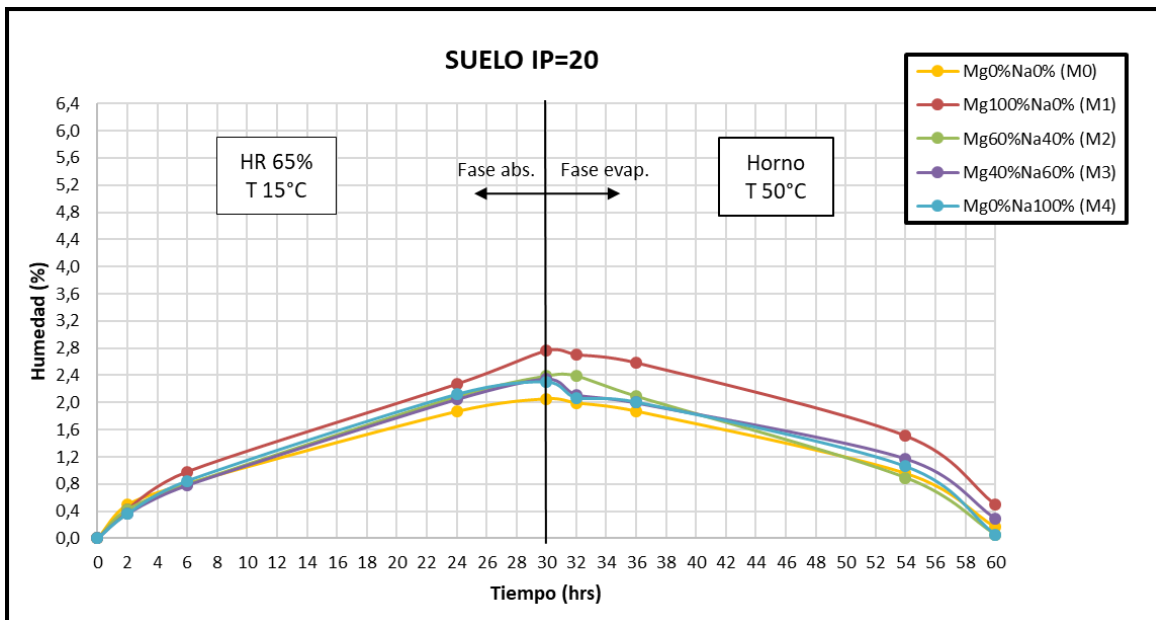


Figura 4-32: Suelo IP=20 / Fase absorción HR65% / Fase evaporación 50°C.

Cuando se aumenta la humedad a un 65%, se registra un leve aumento de la humedad absorbida de las muestras con respecto a los otros suelos, llegando al 2,8% de humedad para la muestra M1, mientras que las mezclas M2, M3 y M4 alcanzan un porcentaje de humedad del 2,4% en promedio al final

del período de acondicionamiento. La muestra patrón sin sales es la que posee una menor capacidad de absorción llegando al 2,1% de humedad. Con respecto a la tendencia de absorción de las muestras, en las primeras 2 horas se presenta el mayor incremento de absorción, para luego mantener una tendencia lineal creciente durante todo el período, y seguir aumentando al final de las 30 horas de la fase de absorción.

Con respecto a la fase de evaporación, a una temperatura de secado de 20°C se presenta en general al igual que en los casos anteriores una leve disminución del porcentaje de humedad de todas las muestras, llegando a mantenerse constante durante el período de secado, la que se alcanza durante las primeras 6 horas, y que corresponde a una variación cercana al 0,4% de humedad.

Para una temperatura de secado de 30°C se presenta una tendencia casi lineal de pérdida de humedad durante las primeras 24 horas, para mantenerse relativamente constante para el final del período. La mezcla M3 presenta una disminución considerable respecto a las otras muestras en el período de 6 horas, igualando en porcentaje de humedad a la muestra patrón.

Para una temperatura de secado de 50°C, se presenta en las últimas 6 horas de este período un incremento en la tasa de evaporación de las muestras, llegando algunas de ellas al 0% de humedad. Las mezclas M2 y M4 alcanzan a evaporar completamente el agua absorbida durante el período de 30 horas de secado, mientras que las demás llegan al 0,4% de humedad en promedio. Por otra parte, se observa que las mezclas con algún contenido de NaCl (M3 y M4) presentan una disminución considerable de la humedad respecto a las otras muestra durante las primeras 2 horas de esta fase.

iii. Curvas de humedad con fase de absorción a HR 90% y fases de evaporación a 20°C (Figura 4-33), 30°C (Figura 4-34) y 50°C (Figura 4-35).

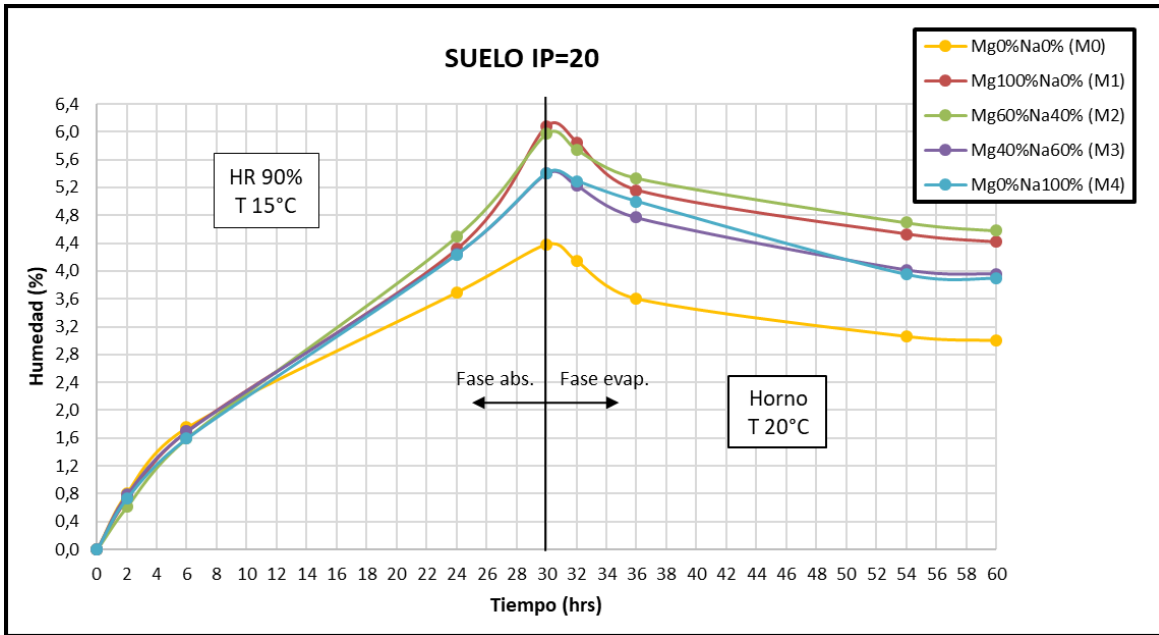


Figura 4-33: Suelo IP=20 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 20°C.

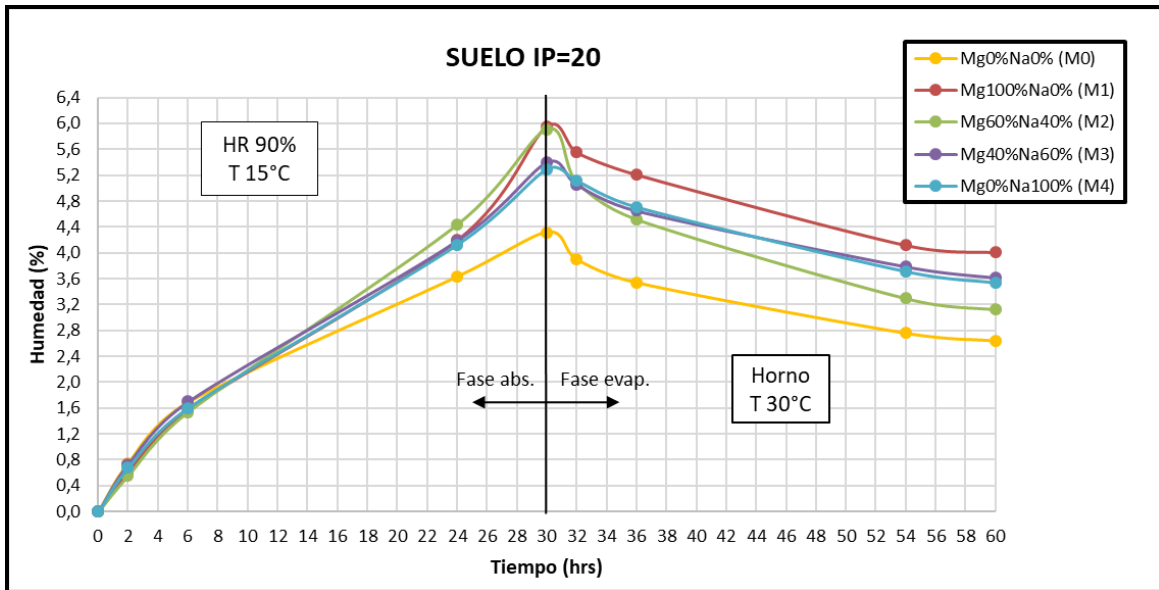


Figura 4-34: Suelo IP=20 / Fase absorción HR90% / Fase evaporación 30°C.

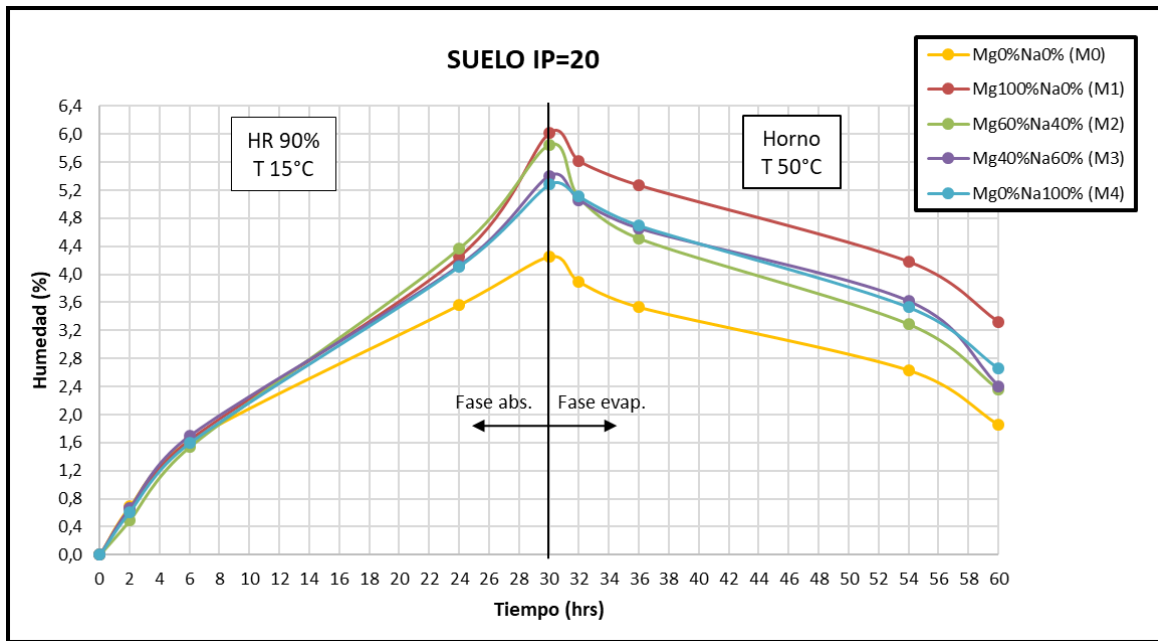


Figura 4-35: Suelo IP=20 /Fase absorción HR90% / Fase evaporación 50°C.

A una humedad de acondicionamiento del 90%, las muestras presentan un aumento considerable en su porcentaje de humedad absorbida respecto a las humedades expuestas anteriormente. Las mezclas con mayor contenido de bischofita (M1 y M2) alcanzan un valor cercano al 6% de humedad al final del período de acondicionamiento de 30 horas, mientras que las mezclas con mayor contenido de NaCl (M3 y M4) alcanzan valores de un 5,4% de humedad en promedio. La mezcla patrón sin sales alcanza aproximadamente un 4,4% de humedad absorbida en 30 horas. Por otro lado, la tendencia de las curvas es a seguir absorbiendo humedad al final del período expuesto de forma relativamente lineal creciente, a excepción de las mezclas con bischofita (M1 y M2) que presentan un incremento en la tasa de absorción en las últimas 6 horas del período de acondicionamiento.

Con respecto a la fase de evaporación, las muestras expuestas a 20°C y 30°C presentan tendencia a mantenerse casi constante al final del período de 30 horas de secado, dado que en las últimas 6 horas no se presentan cambios considerables en la humedad de las muestras. Mientras que para una temperatura de secado de 50°C se presenta una mayor pérdida de humedad durante las primeras 2 horas de período, para luego mantener una tendencia lineal de evaporación de las muestras hasta las 24 horas. Entre las 24 y 30 horas se produce un aumento en la tasa de evaporación de las muestras, con tendencia a seguir perdiendo humedad en un tiempo mayor al del final del período de 30 horas de secado. Además, se

observa durante las 30 horas de secado a 50°C una variación del porcentaje de humedad para la muestra M1 del 2,8%, mientras que la mezcla M2, disminuye su humedad en un 3,6%. Las mezclas con mayor contenido de NaCl (M3 y M4) presentan una variación de humedad del 3% y para la muestra sin sales (M0) un 2,6% aproximadamente.

#### **4.1.5. ANALISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS**

De los capítulos anteriores y conforme los resultados obtenidos, la capacidad de absorción de humedad de una muestra con contenido de sales depende principalmente de la humedad relativa del aire circundante, y cesa cuando la presión de vapor de la solución salina se iguala a la presión de vapor de la atmósfera. Por otro lado, el cloruro de magnesio (bischofita) comienza a absorber agua cuando la humedad relativa es mayor a 32% y disminuye la tasa de evaporación del agua en 3,1 veces, mientras que el cloruro de sodio tiene una menor capacidad de absorber y retener humedad, ya que comienza a absorber agua cuando la humedad relativa está por sobre el 75% y disminuye la tasa de evaporación del agua en 1,3 veces. La disminución de la tasa de evaporación permite la retención de humedad en la superficie de rodado, por medio de una presión de vapor menor a la del agua.

En general, se debe considerar que 1% de humedad corresponde aproximadamente a 16 gramos de agua, esto medido para 1,6 kg de suelo en una bandeja de dimensiones 30x30x3 centímetros como las utilizadas en los ensayos.

Con respecto a las curvas obtenidas cabe notar que, para todos los suelos en estudio y en relación a la capacidad de absorción de las muestras, las mezclas con contenidos de bischofita (M1 y M2) mostraron una mayor capacidad de absorción de agua durante el período de acondicionamiento, mientras que, la mezcla patrón sin contenido de sales, fue la que tuvo una menor capacidad de absorción, cumpliéndose lo anterior para todos los tipos de suelos en estudio. Por otra parte, la absorción de las muestras es más significativa durante las primeras 2 horas del período, para posteriormente ir disminuyendo la pendiente de las curvas de absorción hasta el final de la fase de acondicionamiento.

Con respecto a la fase de evaporación, para todos los tipos de suelos en estudio se observa que a una temperatura de secado de 20°C las muestras no alcanzan a perder completamente su humedad en el período de acondicionamiento de 30 horas, manteniendo una humedad de equilibrio constante en el tiempo, mientras que a 50°C todas las muestras llegan al 0% de humedad al final del período de acondicionamiento, excepto cuando en la fase previa las muestras se encuentran expuestas a 90% de

humedad. Por otro lado, se observa que la mayor pérdida de humedad de las muestras para todos los tipos de suelos se produce durante las primeras 6 horas del período de acondicionamiento en horno, además queda en evidencia que en general el cambio de humedad de las muestras es más significativo al inicio de los ensayos que al final.

Finalmente, se puede decir que, al comparar la capacidad de absorción de los diferentes tipos de suelos en estudio, el suelo no plástico (NP) fue el que tuvo una menor capacidad de absorción de agua para una misma humedad, temperatura, tiempo de exposición y tipo de mezcla de sales que los suelos de mayor plasticidad. En relación con la capacidad de evaporación de humedad, los suelos con mayor plasticidad fueron los que tendieron a conservar la humedad por un mayor período de tiempo que los suelos menos plásticos.

## 5. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE CURVAS DE HUMEDAD

### 5.1.1. INTRODUCCIÓN

Una modelación matemática es una representación de un sistema a través de un conjunto de símbolos matemáticos y funciones (ecuaciones matemáticas) mostrando las relaciones entre variables, es decir, es la formulación de un problema especificando las variables que intervienen en él. Las variables de un modelo matemático son las incógnitas que se determinan al resolver el problema. Los parámetros son las variables independientes del sistema, es decir, los valores conocidos que relacionan las variables.

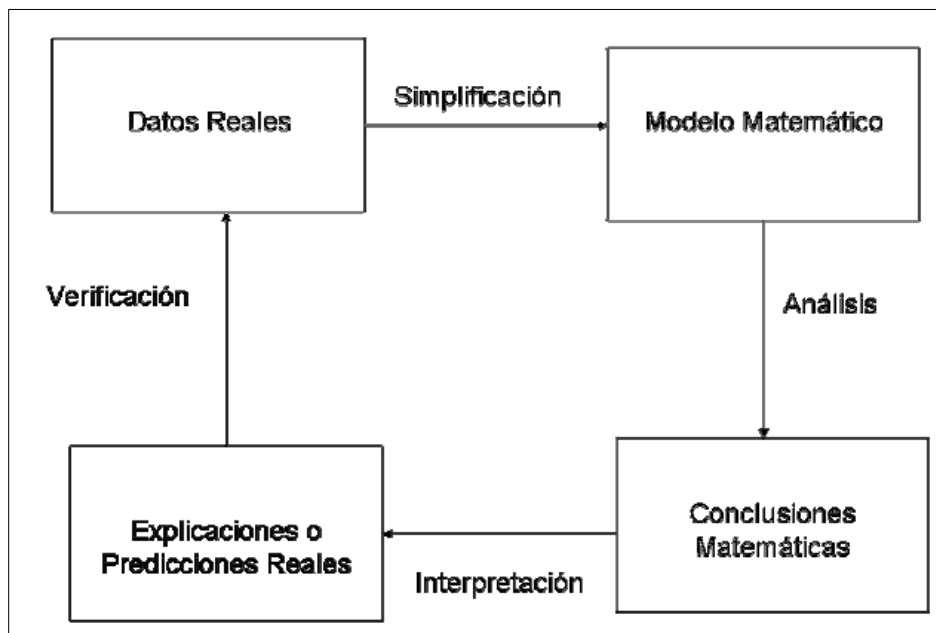


Figura 5-1: Proceso de modelación matemática.

A partir de un sistema real, se realiza un modelo partiendo de ciertas hipótesis que permiten determinar los parámetros que se incluyen o descartan de la ecuación, al igual que su estructura. Luego de realizar el modelo y sacar las conclusiones matemáticas del mismo (resolver la ecuación), se aplican estos resultados a la realidad, lo que permite realizar explicaciones y predicciones sobre el comportamiento del sistema. Finalmente, se compara si el resultado encontrado se adapta al contexto, de tal manera de validar la precisión del modelo.

Se pueden representar las propiedades de absorción, retención y pérdida de humedad de las muestras ensayadas anteriormente por medio de modelos matemáticos. Las curvas obtenidas por medio

de mediciones realizadas en el laboratorio tienen el problema que no pueden abarcar todo el rango de tiempo que afecta a las mezclas. Es por esto que los modelos matemáticos tienen la ventaja de representar en forma aproximada al suelo en los puntos donde se realizaron las mediciones, y permiten obtener valores en todos los estados del mismo donde no se obtuvieron datos a través de mediciones en el tiempo.

En particular, existen diversos modelos constitutivos para materiales viscoelásticos lineales. Esos modelos incluyen el modelo de Maxwell, el modelo de Kelvin-Voigt y el modelo de sólido viscoelástico lineal estándar que combina los dos modelos anteriores. Todos estos modelos descomponen la tensión y deformación en dos, uno que representa los efectos elásticos y otro que representa los efectos viscosos, siendo estos modelos, interpretables en términos de resortes y amortiguadores. Cada uno de estos modelos difiere en la disposición de los resortes y amortiguadores. Otra propiedad interesante es que las ecuaciones constitutivas también pueden ser interpretadas en términos de circuitos eléctricos, en los que la tensión mecánica sería el equivalente del voltaje y la velocidad de deformación sería equivalente a la intensidad de corriente. El módulo elástico sería equivalente a la capacitancia del circuito (que mide la capacidad de almacenaje de energía) y la viscosidad a la resistencia del circuito (que mide la capacidad de disipar energía). Por otra parte, las aplicaciones principales de estos modelos son la modelización de polímeros orgánicos, goma, caucho y madera cuando la carga no es muy elevada.

Para esta investigación, se plantea utilizar el modelo matemático de Kelvin-Voigt que modela materiales de comportamiento viscoelástico, el cual se ajusta en forma al comportamiento que poseen las curvas de humedad obtenidas anteriormente, durante las fases de absorción y evaporación de las mezclas en estudio.

### 5.1.2. ADAPTACIÓN DEL MODELO DE KELVIN-VOIGT

El modelo de Kelvin-Voigt simula la deformación viscoelástica de un material, mediante la conexión en paralelo de un amortiguador newtoniano y un resorte que sigue la ley de Hooke, como muestra la Figura 5-2.

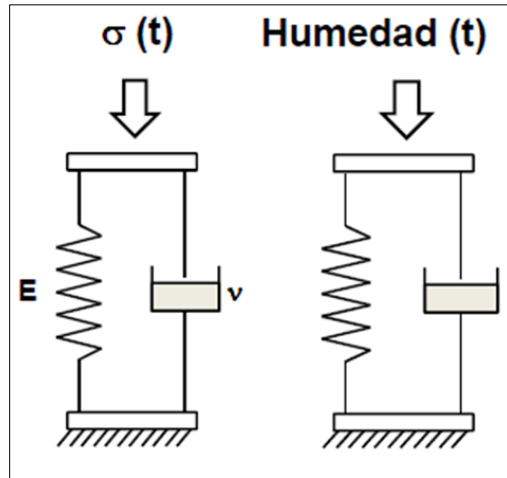


Figura 5-2: Representación esquemática del modelo de Kelvin-Voigt.

La ecuación constitutiva del modelo puede expresarse como la ecuación diferencial de primer orden:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Este modelo representa un sólido que sufre deformación viscoelástica reversible. Bajo la aplicación de una tensión constante (creep), el modelo es bastante realista y predice deformaciones que tienden al límite  $\sigma/E$  para tiempos grandes. El material se deforma a un ritmo progresivamente más lento, llegando asintóticamente a un estado cuasiestacionario. Resolviendo la ecuación anterior para  $\sigma(t) = \sigma_0$ , se llega a:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} * (1 - e^{-\lambda t})$$

Donde  $\lambda$  es igual a la expresión  $E/\eta$ .

Cuando se eliminan las fuerzas exteriores que generan las tensiones ( $\sigma(t) = 0$ ) en  $t = t_1$ , el material se relaja hasta su estado no deformado original. Integrando la ecuación que gobierna el comportamiento del modelo se obtiene:

$$\varepsilon(t > t_1) = \varepsilon(t_1) * e^{-\lambda(t-t_1)}$$

Donde  $t_1$  es el tiempo transcurrido desde la eliminación de la tensión y  $\varepsilon(t_1)$  es la deformación existente inmediatamente antes de su eliminación, produciéndose una recuperación exponencial de la deformación.

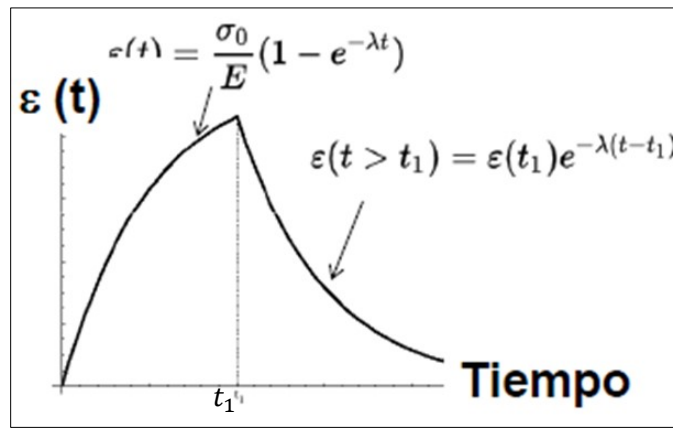


Figura 5-3: Respuesta del modelo de Kelvin-Voigt en fluencia y recuperación de fluencia.

En esta investigación, para el estudio de la absorción y pérdida de humedad de las mezclas en estudio, se ha utilizado un análogo al modelo matemático descrito anteriormente, en donde en este caso la tensión o carga aplicada sería el equivalente a la humedad relativa del aire, mientras que la respuesta viscoelástica correspondería a la humedad del suelo en cuestión.

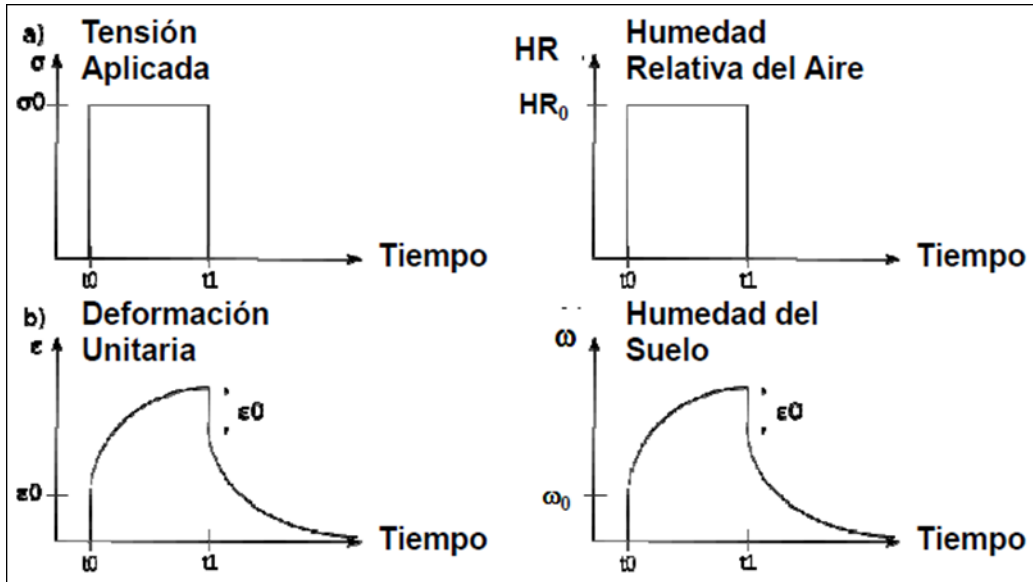


Figura 5-4: Análogo modelo matemático de Kelvin-Voigt a utilizar.

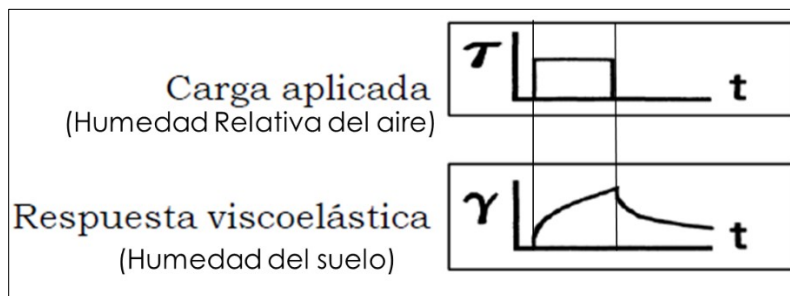


Figura 5-5: Analogía de parámetros a calcular utilizando modelo de Kelvin-Voigt.

Así, bajo la aplicación de una carga constante (creep), que en este caso corresponde a la Humedad Relativa del aire, se puede modelar la fase de absorción de las curvas de humedad obtenidas en laboratorio mediante la siguiente ecuación:

$$w_{suelo}(t) = \frac{HR}{E} * (1 - e^{-\lambda t}); \quad \text{para } t < t_1$$

Donde:

$\varepsilon(t) = w_{\text{suelo}}(t)$  = Humedad del suelo en el instante t (hrs).

$\sigma_0 = \text{HR}$  = Humedad Relativa del aire (%).

$E, \lambda$  = Parámetros a calibrar que dependen de las propiedades del suelo y sales.

Cuando se eliminan la tensión aplicada (Humedad Relativa) en  $t = t_1$ , es decir, se comienza la fase de evaporación, el material se relaja hasta su estado no deformado original (suelos pierden humedad). La ecuación del comportamiento queda de la siguiente manera:

$$w_{\text{suelo}}(t) = w_{\text{suelo}}(t_1) * e^{-\lambda(t-t_1)}; \quad \text{para } t > t_1$$

Donde:

$w_{\text{suelo}}(t)$ : Humedad del suelo en el instante t (hrs).

$w_{\text{suelo}}(t_1)$ : Humedad del suelo en el instante  $t_1$  (hrs).

$t_1$ : Instante de tiempo en que finaliza la fase de absorción y comienza la fase de evaporación.

$\lambda$ : Parámetro a calibrar que depende de las propiedades del suelo y sales.

De esta manera, mediante la adaptación del modelo matemático antes descrito, es posible determinar la humedad de un suelo o camino no pavimentado tratado con sales para cualquier período de tiempo requerido, conociendo la Humedad Relativa del ambiente en el tiempo y los valores de los parámetros  $E$  y  $\lambda$ , los cuales dependerán del tipo de suelo y sales utilizadas. Estos son calculados para cada tipo de suelo y mezclas de sales en estudio como se presenta en la siguiente sección.

### 5.1.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS PARA AJUSTE DEL MODELO

Mediante los datos de humedad obtenidos en laboratorio, por medio de iteración se determinan los valores de los parámetros E y  $\lambda$ , a través de la diferencia de mínimos cuadrados como se muestra en la Tabla 5-1. Esto se realiza utilizando el complemento 'Solver' de Microsoft Excel.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para un solo caso como ejemplo (Suelo IP=10, Mezcla 1 (M1), Humedad 90% y temperatura secado a 20°C). La matriz completa de los cálculos para todos los casos en estudio se muestra en planilla de Microsoft Excel adjunta en el CD.

Tabla 5-1: Valores de los parámetros obtenidos para el suelo y la mezcla en estudio.

#### Suelo IP=10 / HR90% / Secado 20°C / Mezcla 1

	t exp	HR	%H ensayos	%H modelo	Dif.
Cámara Humedad	0	90	0.00	0.00	0.000
	2	90	0.62	0.39	0.051
	6	90	1.30	1.15	0.022
	24	90	4.03	4.18	0.024
	30	90	5.21	5.07	0.020
Secado en horno	32	20	5.03	4.95	0.006
	36	20	4.56	4.74	0.031
	54	20	3.79	3.87	0.006
	60	20	3.73	3.62	0.014
<b>Error min. cuad</b>					<b>0.174</b>

<b>E</b>	5.1
<b><math>\lambda</math></b>	0.011

De esta manera encontrando los valores de los parámetros, se presenta la correlación que existe entre los porcentajes de humedad obtenidos en laboratorio con los calculados por el modelo, los que se presentan para el caso como ejemplo, a través del siguiente gráfico junto con el valor de  $R^2$  y la recta que mejor se ajusta a los datos.

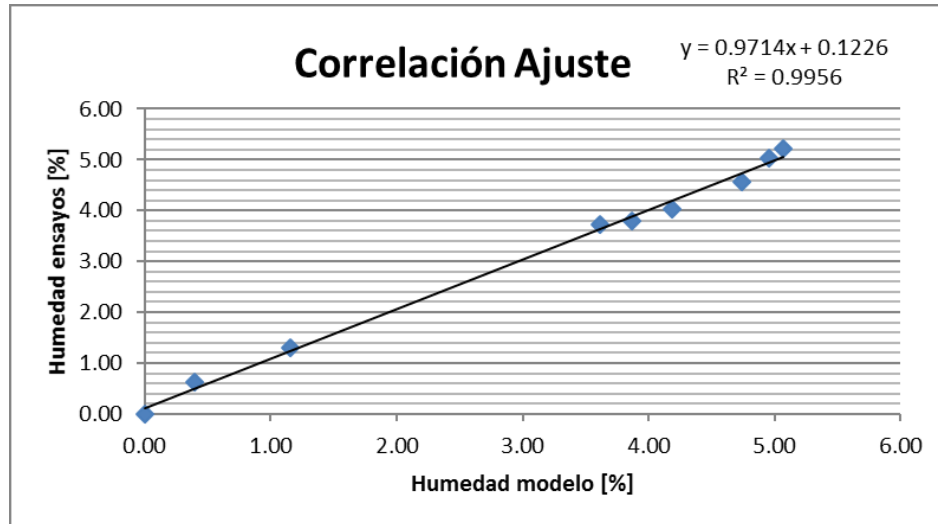


Figura 5-6: Correlación de datos experimentales v/s teórico.

Finalmente se grafican los valores de porcentaje humedad obtenidos en los ensayos de laboratorio versus los calculados por el modelo para todo el período de acondicionamiento. Se observa claramente que el modelo se ajusta de buena manera según lo esperado para el caso como ejemplo.

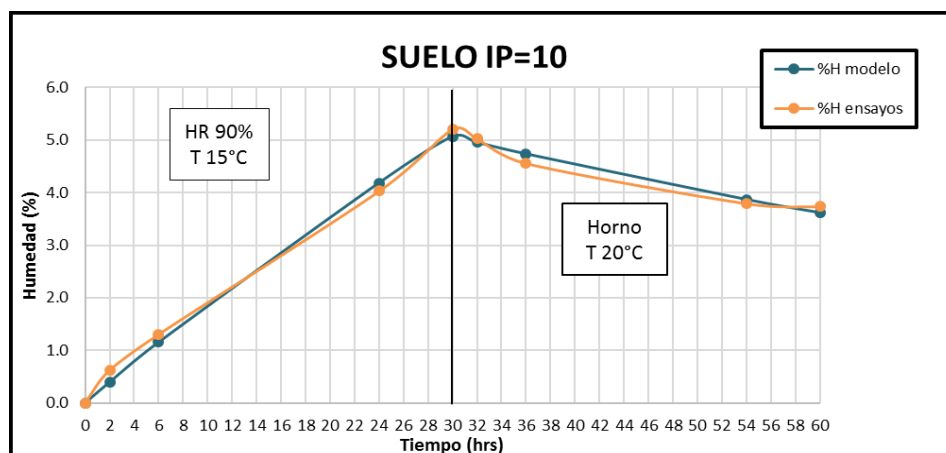


Figura 5-7: Ajuste de curvas de humedad ensayos v/s modelo.

De igual forma a lo anterior, se calculan los parámetros para cada tipo de suelo, mezcla, humedad y temperatura de secado en estudio. En la Tabla 5-2 y

Tabla 5-3, se muestra un resumen de los resultados para todos los casos en estudio.

Tabla 5-2 Parámetros E y  $\lambda$  obtenidos para suelos NP e IP=10.

SUELO	MEZCLA	%HR	T° SECADO	E	$\lambda$
NP	0%MgCl-0%NaCl (M0)	40	20	25.1	0.025
			30	40.6	0.070
			50	51.4	0.298
		65	20	28.8	0.024
			30	30.5	0.027
			50	58.1	0.137
		90	20	23.6	0.021
			30	23.7	0.020
			50	50.2	0.151
	100%MgCl-0%NaCl (M1)	40	20	3.2	0.006
			30	15.4	0.059
			50	16.0	0.068
		65	20	23.6	0.049
			30	23.9	0.051
			50	25.4	0.062
		90	20	6.2	0.013
			30	9.1	0.022
			50	15.1	0.054
	60%MgCl-40%NaCl (M2)	40	20	6.8	0.010
			30	24.7	0.086
			50	25.6	0.111
		65	20	28.6	0.049
			30	28.0	0.046
			50	32.0	0.071
		90	20	5.1	0.010
			30	10.2	0.024
			50	16.4	0.055
	40%MgCl-60%NaCl (M3)	40	20	9.2	0.011
			30	28.8	0.083
			50	25.4	0.060
		65	20	39.8	0.058
			30	40.6	0.061
			50	36.5	0.051
		90	20	5.0	0.009
			30	13.1	0.032
			50	17.4	0.058
0%MgCl-100%NaCl (M4)	40	20	12.8	0.014	
		30	32.4	0.066	
		50	35.7	0.114	
	65	20	38.4	0.038	
		30	36.9	0.035	
		50	45.6	0.062	
	90	20	3.4	0.005	
		30	17.0	0.037	
		50	18.7	0.049	
IP=10	0%MgCl-0%NaCl (M0)	40	20	7.1	0.015
			30	24.4	0.210
			50	25.1	0.229
		65	20	4.1	0.007
			30	13.7	0.020
			50	34.9	0.193
		90	20	4.9	0.009
			30	15.6	0.048
			50	16.8	0.054
	100%MgCl-0%NaCl (M1)	40	20	3.4	0.009
			30	15.7	0.126
			50	16.3	0.143
		65	20	4.1	0.007
			30	15.4	0.036
			50	26.9	0.168
		90	20	5.1	0.011
			30	13.7	0.046
			50	14.5	0.051
	60%MgCl-40%NaCl (M2)	40	20	4.0	0.010
			30	18.3	0.164
			50	18.3	0.165
		65	20	5.6	0.008
			30	16.4	0.031
			50	31.8	0.212
		90	20	6.0	0.013
			30	14.0	0.044
			50	15.0	0.050
	40%MgCl-60%NaCl (M3)	40	20	4.3	0.010
			30	20.8	0.181
			50	21.3	0.194
		65	20	6.3	0.008
			30	16.6	0.028
			50	36.7	0.257
		90	20	6.4	0.013
			30	15.0	0.047
			50	16.0	0.053
0%MgCl-100%NaCl (M4)	40	20	5.5	0.012	
		30	20.3	0.140	
		50	20.9	0.158	
	65	20	6.6	0.008	
		30	13.8	0.019	
		50	39.7	0.290	
	90	20	6.4	0.012	
		30	15.5	0.045	
		50	16.8	0.051	

Tabla 5-3: Parámetros E y  $\lambda$  obtenidos para suelo IP=20.

SUELO	MEZCLA	%HR	T° SECADO	E	$\lambda$
IP=20	0%MgCl-0%NaCl (M0)	40	20	5.6	0.011
			30	14.5	0.045
			50	15.0	0.056
		65	20	7.8	0.010
			30	21.1	0.039
			50	22.4	0.050
		90	20	7.4	0.015
			30	9.0	0.019
			50	11.3	0.026
	100%MgCl-0%NaCl (M1)	40	20	2.8	0.007
			30	9.5	0.034
			50	10.1	0.042
		65	20	3.7	0.006
			30	19.1	0.048
			50	15.2	0.038
		90	20	3.9	0.009
			30	4.9	0.012
			50	6.1	0.016
	60%MgCl-40%NaCl (M2)	40	20	3.5	0.008
			30	10.4	0.037
			50	12.3	0.054
		65	20	5.4	0.008
			30	16.8	0.035
			50	20.5	0.054
		90	20	3.4	0.008
			30	7.6	0.020
			50	8.7	0.025
	40%MgCl-60%NaCl (M3)	40	20	3.3	0.007
			30	15.0	0.062
			50	14.3	0.058
65		20	3.5	0.005	
		30	20.2	0.045	
		50	19.6	0.044	
90		20	4.8	0.011	
		30	5.7	0.014	
		50	8.1	0.022	
0%MgCl-100%NaCl (M4)	40	20	3.6	0.008	
		30	11.0	0.036	
		50	13.1	0.054	
	65	20	5.2	0.007	
		30	17.2	0.033	
		50	21.1	0.051	
	90	20	4.9	0.012	
		30	5.9	0.014	
		50	7.7	0.020	

Con el fin de construir las curvas de humedad de suelos para distintas condiciones de humedad relativa del aire, se debe utilizar un único valor de los parámetros E y  $\lambda$  para la ecuación que determinará la humedad del suelo en un instante de tiempo. Para esto, se determinó utilizar un valor promedio de los

datos para cada tipo de suelo y mezcla en estudio, dado que así se abarcan todas las humedad y temperaturas de ensayos.

Tabla 5-4: Obtención parámetros promedio.

SUELO	MEZCLA	%HR	T° SECADO	E	$\lambda$
NP	0%MgCl-0%NaCl (M0)	40	20	25.1	0.025
			30	40.6	0.070
			50	51.4	0.298
		65	20	28.8	0.024
			30	30.5	0.027
			50	58.1	0.137
		90	20	23.6	0.021
			30	23.7	0.020
			50	50.2	0.151
	100%MgCl-0%NaCl (M1)	40	20	3.2	0.006
			30	15.4	0.059
			50	16.0	0.068
		65	20	23.6	0.049
			30	23.9	0.051
			50	25.4	0.062
		90	20	6.2	0.013
			30	9.1	0.022
			50	15.1	0.054
	60%MgCl-40%NaCl (M2)	40	20	6.8	0.010
			30	24.7	0.086
			50	25.6	0.111
		65	20	28.6	0.049
			30	28.0	0.046
			50	32.0	0.071
90		20	5.1	0.010	
		30	10.2	0.024	
		50	16.4	0.055	
40%MgCl-60%NaCl (M3)	40	20	9.2	0.011	
		30	28.8	0.083	
		50	25.4	0.060	
	65	20	39.8	0.058	
		30	40.6	0.061	
		50	36.5	0.051	
	90	20	5.0	0.009	
		30	13.1	0.032	
		50	17.4	0.058	
0%MgCl-100%NaCl (M4)	40	20	12.8	0.014	
		30	32.4	0.066	
		50	35.7	0.114	
	65	20	38.4	0.038	
		30	36.9	0.035	
		50	45.6	0.062	
	90	20	3.4	0.005	
		30	17.0	0.037	
		50	18.7	0.049	

$$E_{prom} = 36,9$$

$$\lambda_{prom} = 0,086$$

De esta forma, los valores de los parámetros a utilizar en las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

Tabla 5-5: Valores de parámetros  $E$  y  $\lambda$  a utilizar.

SUELO	MEZCLA	E	$\lambda$
NP	M0	36.9	0.086
	M1	15.3	0.043
	M2	19.7	0.051
	M3	24.0	0.047
	M4	26.8	0.047

SUELO	MEZCLA	E	$\lambda$
IP=10	M0	16.3	0.087
	M1	12.8	0.066
	M2	14.4	0.077
	M3	15.9	0.088
	M4	16.2	0.082

SUELO	MEZCLA	E	$\lambda$
IP=20	M0	12.7	0.030
	M1	8.4	0.024
	M2	9.8	0.028
	M3	10.5	0.030
	M4	10.0	0.026

#### 5.1.4. CASO EJEMPLO DE OBTENCIÓN DE CURVAS DE HUMEDAD DEL SUELO EN EL TIEMPO

En esta sección, se pretende calcular la humedad del suelo o camino no pavimentado, para cualquier instante de tiempo, a partir de datos de humedad relativa del ambiente recabados para un determinado lugar en estudio. Por medio de los parámetros obtenidos en la sección anterior, es posible establecer una ecuación para cada tipo de suelo y mezcla de sales que permita conocer la humedad del suelo en un instante de tiempo determinado, dadas las condiciones medioambientales del lugar en estudio donde se conozca la humedad relativa.

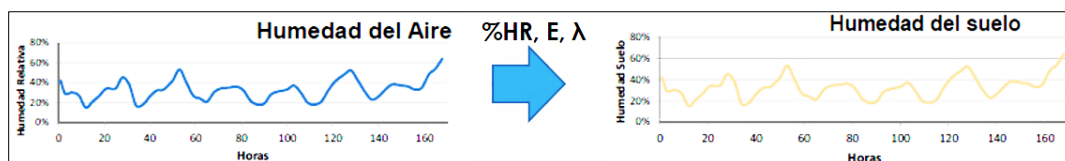


Figura 5-8: Esquema de obtención de la humedad del suelo a partir de datos de humedad relativa.

Como se sabe, en general la humedad relativa disminuye durante el día produciéndose evaporación del agua en la carpeta de rodado, mientras que aumenta durante la noche produciendo absorción.

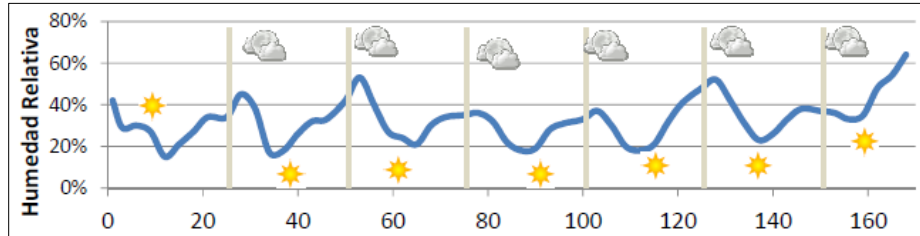


Figura 5-9: Ejemplo variación humedad relativa durante el día y la noche.

Para el caso ejemplo, utilizando los datos de humedad relativa de la comuna de Camarones perteneciente a la Provincia de Arica, se calculó la humedad del suelo en base a los ajustes de las ecuaciones del modelo y parámetros obtenidos anteriormente.



Figura 5-10: Ubicación comuna de Camarones, Región de Arica y Parinacota.

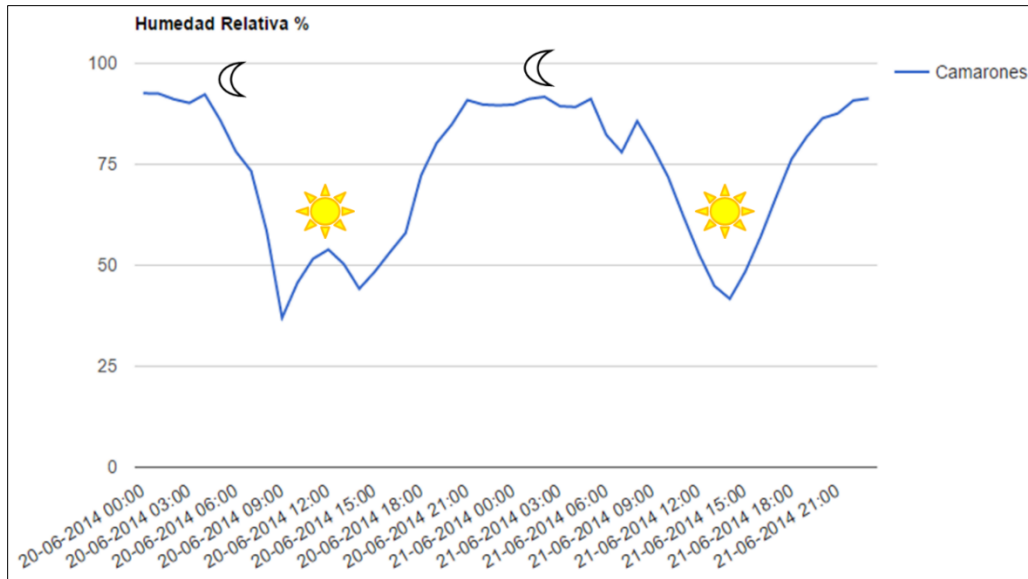


Figura 5-11: datos de Humedad Relativa, comuna de Camarones.

Para el caso en estudio, como criterio de cálculo se establece la humedad de equilibrio de las muestras en base a la literatura consultada y los resultados obtenidos para las distintas sales en estudio, correspondiendo los valores indicados a continuación:

*Para mezclas con 100%  $MgCl_2$ :*

*Fase evaporación  $\rightarrow HR < 32\%$*

*Fase absorción  $\rightarrow HR > 32\%$*

*Para mezclas con 100%  $NaCl$ :*

*Fase evaporación  $\rightarrow HR < 75\%$*

*Fase absorción  $\rightarrow HR > 75\%$*

Para las mezclas de sales, se estableció la ponderación respectiva de las mezclas en el cálculo de las humedades de equilibrio, obteniéndose los valores presentados a continuación:

*Para mezclas con 60% MgCl<sub>2</sub> – 40% NaCl:*

*Fase evaporación → HR < 49%*

*Fase absorción → HR > 49%*

*Para mezclas con 40% MgCl<sub>2</sub> – 60% NaCl:*

*Fase evaporación → HR < 58%*

*Fase absorción → HR > 58%*

En el caso de las muestras de suelo patrón sin contenido de sales (M0), se considera como humedad de equilibrio la correspondiente a una humedad mayor a la de las sales debido a su menor capacidad de absorción, en este caso se determina un valor arbitrario del 85% de humedad, valor que da buenos resultados para el modelo propuesto.

*Para suelos sin contenidos de sales:*

*Fase evaporación → HR < 85%*

*Fase absorción → HR > 85%*

Por lo que las ecuaciones y valores de los parámetros utilizados para el cálculo de la humedad del suelo para este ejemplo son:

$$w_{suelo}(t) = \frac{HR}{E} * (1 - e^{-\lambda t}); \quad \text{para fase absorción.}$$

$$w_{suelo}(t) = w_{suelo}(t_1) * e^{-\lambda(t-t_1)}; \quad \text{para fase evaporación.}$$

*Donde:*

$w_{suelo}$ : *Humedad del suelo en el instante t (hrs).*

$t_1$ : *Instante de tiempo anterior al comienzo de la fase de evaporación.*

Mientras que el valor de los parámetros a utilizar según el tipo de suelo en estudio (IP=10) son:

*Tabla 5-6: Valor de parámetros E y  $\lambda$  para suelo IP=10 según tipo de mezcla.*

<b>SUELO</b>	<b>MEZCLA</b>	<b>E</b>	<b><math>\lambda</math></b>
IP=10	M0	16.3	0.087
	M1	12.8	0.066
	M2	14.4	0.077
	M3	15.9	0.088
	M4	16.2	0.082

En la Tabla 5-7 se muestran los valores de humedad calculados por hora para cada una de las mezclas y gráfica en el tiempo.

Tabla 5-7: Cálculo humedad del suelo para distintas mezclas.

#	FECHA/HORA	%HR	%w suelo sin sales (M0)	%w suelo (M1)	%w suelo (M2)	%w suelo (M3)	%w suelo (M4)
0	0:00:00	93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1:00:00	93	0.47	0.46	0.48	0.49	0.45
2	2:00:00	91	0.89	0.88	0.91	0.92	0.85
3	3:00:00	90	1.27	1.27	1.30	1.31	1.21
4	4:00:00	92	1.67	1.68	1.71	1.71	1.59
5	5:00:00	86	1.86	1.89	1.92	1.91	1.78
6	6:00:00	78	1.71	2.01	2.02	2.01	1.87
7	7:00:00	73	1.56	2.13	2.13	2.11	1.73
8	8:00:00	59	1.43	1.88	1.88	1.85	1.59
9	9:00:00	37	1.31	1.30	1.74	1.70	1.47
10	10:00:00	46	1.20	1.73	1.61	1.55	1.35
11	11:00:00	52	1.10	2.09	2.06	1.42	1.25
12	12:00:00	54	1.01	2.31	2.27	1.30	1.15
13	13:00:00	50	0.93	2.27	2.22	1.19	1.06
14	14:00:00	44	0.85	2.09	2.05	1.09	0.97
15	15:00:00	48	0.78	2.39	1.90	1.00	0.90
16	16:00:00	53	0.71	2.73	2.63	0.92	0.83
17	17:00:00	58	0.65	3.07	2.95	2.82	0.76
18	18:00:00	72	0.60	3.94	3.77	3.60	0.70
19	19:00:00	80	0.55	4.49	4.30	4.08	3.91
20	20:00:00	85	0.50	4.88	4.65	4.40	4.22
21	21:00:00	91	4.68	5.34	5.08	4.80	4.61
22	22:00:00	90	4.70	5.39	5.11	4.82	4.63
23	23:00:00	90	4.75	5.48	5.18	4.87	4.69
24	0:00:00	90	4.83	5.59	5.27	4.95	4.77
25	1:00:00	91	4.96	5.78	5.43	5.08	4.91
26	2:00:00	92	5.04	5.89	5.52	5.16	4.99
27	3:00:00	89	4.96	5.83	5.45	5.08	4.92
28	4:00:00	89	4.99	5.89	5.49	5.12	4.96
29	5:00:00	91	5.15	6.09	5.67	5.27	5.11
30	6:00:00	82	4.72	5.56	5.16	4.79	4.65
31	7:00:00	78	4.32	5.32	4.93	4.57	4.44
32	8:00:00	86	4.93	5.90	5.46	5.05	4.91
33	9:00:00	79	4.52	5.51	5.09	4.70	4.57
34	10:00:00	72	4.14	5.04	4.64	4.28	4.21
35	11:00:00	62	3.80	4.38	4.03	3.71	3.88
36	12:00:00	53	3.48	3.75	3.45	3.40	3.58
37	13:00:00	45	3.19	3.21	3.19	3.12	3.30
38	14:00:00	42	2.92	3.00	2.95	2.85	3.04
39	15:00:00	48	2.68	3.50	2.73	2.61	2.80
40	16:00:00	57	2.46	4.15	3.79	2.39	2.58
41	17:00:00	67	2.25	4.89	4.46	4.08	2.38
42	18:00:00	76	2.06	5.60	5.10	4.67	4.57
43	19:00:00	82	1.89	6.04	5.49	5.02	4.91
44	20:00:00	86	5.18	6.40	5.81	5.30	5.20
45	21:00:00	88	5.26	6.51	5.90	5.39	5.28
46	22:00:00	91	5.47	6.77	6.14	5.59	5.48
47	23:00:00	91	5.50	6.83	6.18	5.63	5.53

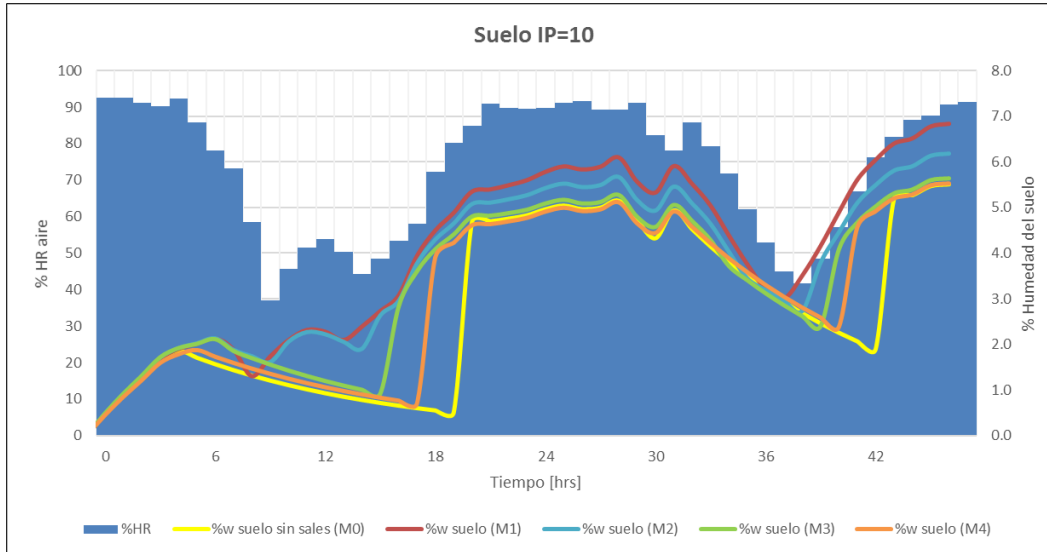


Figura 5-12: Gráfico humedad del suelo v/s humedad relativa v/s tiempo, para distintas mezclas de sales.

En los resultados obtenidos se observa el comportamiento en la absorción de humedad de las mezclas con sales, en donde se aprecia un aumento de la humedad del suelo en el instante en que la humedad relativa del aire se encuentra sobre la humedad de equilibrio de las mezclas, en caso contrario, se presenta una disminución de la humedad del suelo a medida que la humedad relativa disminuye. Esto permite establecer que el modelo matemático empleado para estimar la humedad del suelo en el tiempo a partir de datos de humedad relativa funciona y tiende a entregar resultados acordes a lo estudiado en el laboratorio.

Por otra parte, también se debe considerar en los cálculos la humedad inicial del suelo en terreno al momento de realizar el estudio. Para este caso de ejemplo, dado que no se tenía dicha información, se consideró el suelo sin humedad inicial.

Mayores detalles y conclusiones sobre el modelo utilizado se mencionan en el siguiente capítulo.

### 5.1.5. ENSAYOS DE COMPROBACIÓN EN LABORATORIO

Para el presente trabajo no se contó con un estudio de repetibilidad de los ensayos de medición de la humedad de las muestras, lo que permite determinar una mejor precisión y posibles errores en las mediciones durante el trabajo experimental. Esto debido principalmente a razones de equipamiento y tiempo, y por otro lado, al ser un metodología de elaboración propia, no se cuenta con valores referenciales con los cuales contrastar los resultados de las mediciones de laboratorio.

Sin embargo, con el fin de establecer un criterio de aceptación de los datos obtenidos mediante el modelo matemático propuesto, se determinó realizar un ensayo de comprobación para comparar y contrastar los datos calculados mediante el modelo con los obtenidos de manera experimental. De este modo, se desarrolló en el laboratorio una prueba de humedad a las muestras en estudio, en donde fueron sometidas a un período de acondicionamiento a distintas humedades durante una semana (165 horas), y se fue midiendo la absorción y/o evaporación de humedad de las muestras. Los datos completos de humedad de las muestras se pueden revisar en planilla de Microsoft Excel adjunta en CD.

En los gráficos a continuación, se presentan las curvas de humedad de las muestras versus la humedad relativa aplicada en el tiempo, para cada tipo de suelo en estudio.

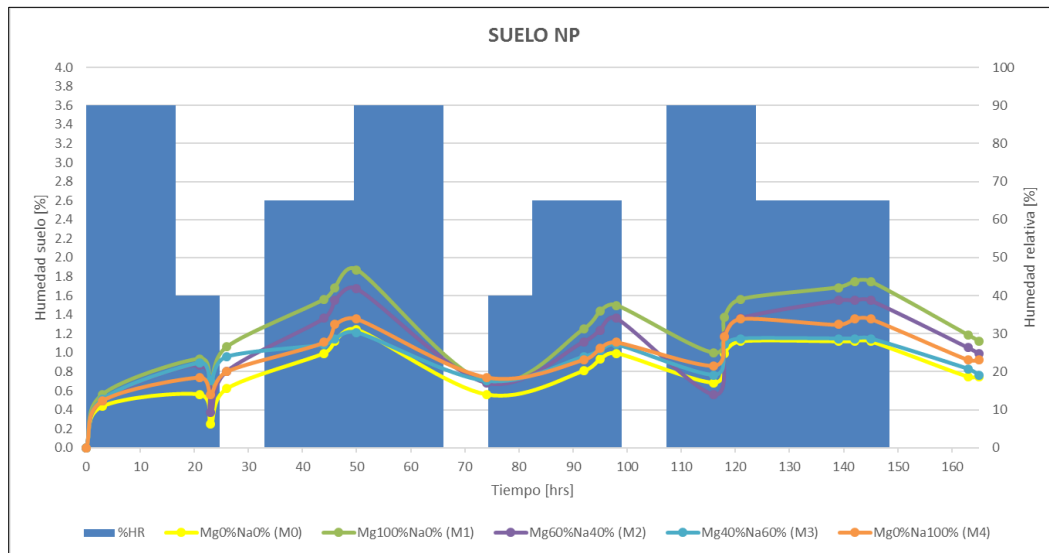


Figura 5-13: Ensayo de comprobación para suelo NP.

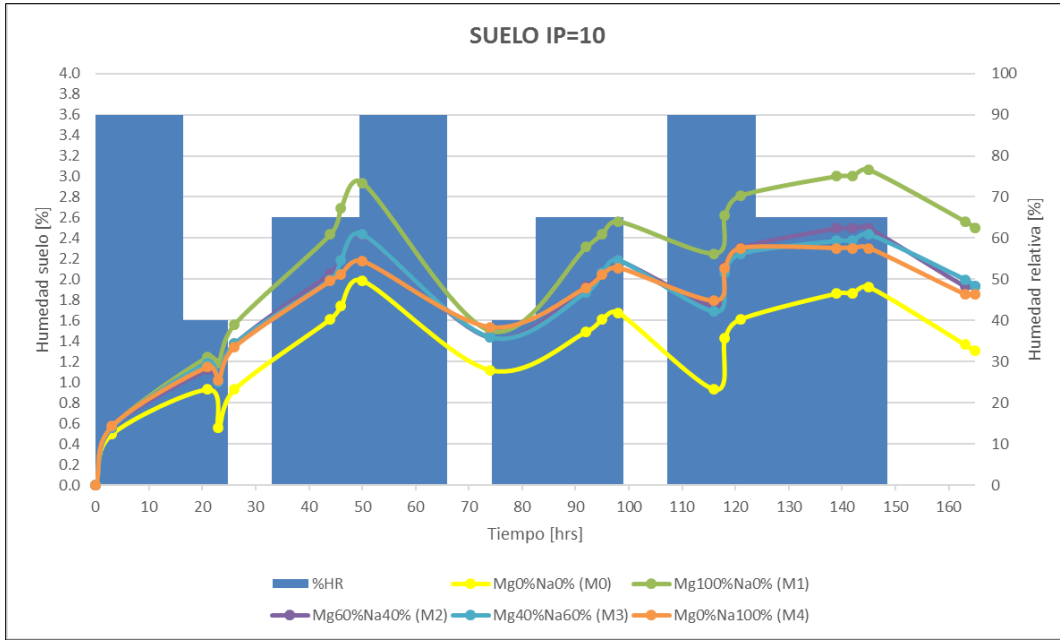


Figura 5-14: Ensayo de comprobación para suelo IP=10.

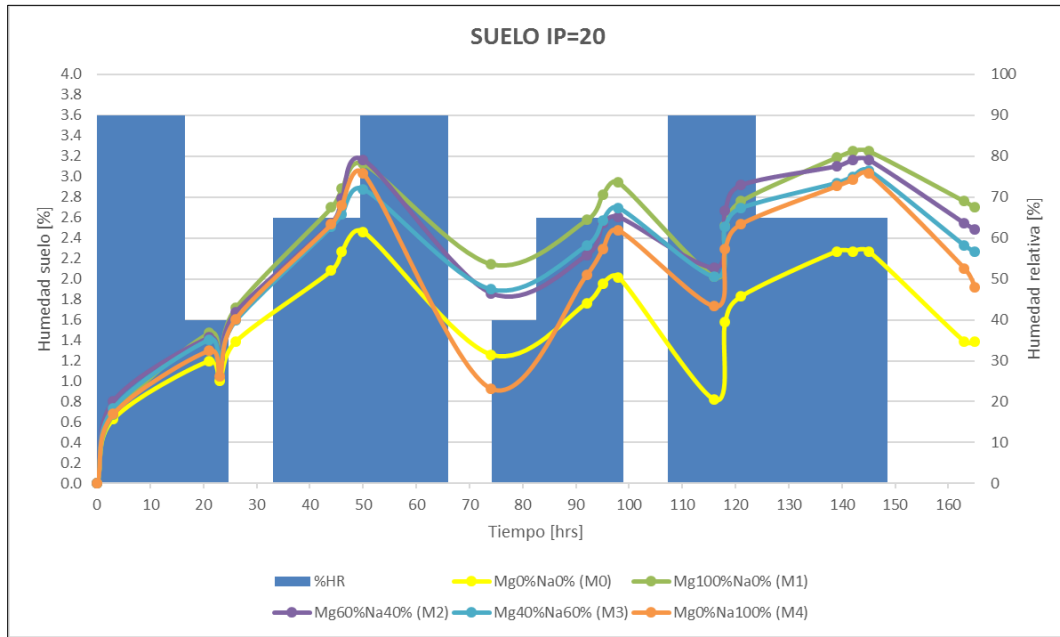


Figura 5-15: Ensayo de comprobación para suelo IP=20.

Al observar los gráficos se reafirma la mayor capacidad de absorción de las muestras con sales, especialmente las con contenido de sal bischofita. Por otra parte, comparando entre los distintos tipos de suelo, al aumentar la plasticidad del suelo se observa una mayor capacidad de absorción de humedad, sin embargo, estos poseen una menor capacidad de retención de humedad, aumentando la tasa de evaporación de agua de las mezclas, lo que se traduce en una mayor disminución de la humedad de los suelos para los intervalos donde se presenta una humedad relativa nula. En resumen, las curvas de humedad obtenidas en este ensayo presentan las mismas tendencias de absorción y pérdida de humedad que las curvas obtenidas durante los ensayos según la metodología en estudio, alcanzando valores bastante similares.

Por otro lado, al aplicar las fórmulas teóricas del modelo matemático estudiado anteriormente y comparar con las curvas de humedad obtenidas en base a la metodología de laboratorio, se aprecia principalmente que las curvas de humedad del suelo tienen tendencias similares de absorción y evaporación. Sin embargo, dadas las condiciones de humedad relativa del ensayo, el modelo no se ajusta de buena manera durante los eventos de cambios o saltos bruscos de humedad relativa establecidos durante este ensayo en laboratorio, dado que lo anterior no se produce en la realidad. Sin embargo, a pesar de esto, los valores alcanzados de humedad por ejemplo para el caso del suelo de IP=10 son adecuados y se ajustan a lo esperado (Figura 5-16).

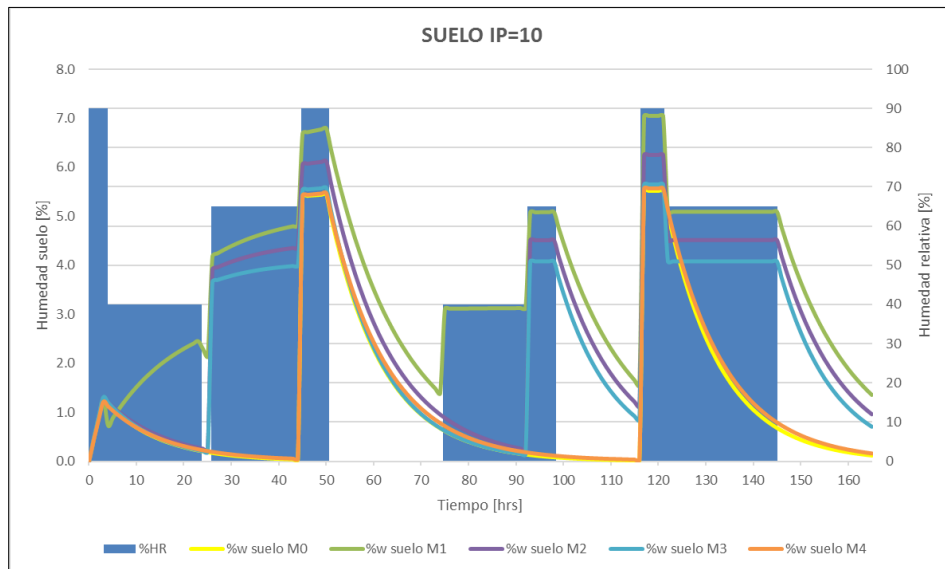


Figura 5-16: Humedad de suelo para IP=10 calculado en base al modelo matemático propuesto.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una de las principales deficiencias que afecta a los caminos no pavimentados es la generación de polvo, la cual se traduce en pérdida del material fino, baches, mala visibilidad, entre otros. Dado que los problemas descritos anteriormente dependen del tratamiento que se les da a los caminos, ya sea mediante estabilización o tratamiento de control de polvo, el consumo de agua utilizada para esto es un factor importante a considerar.

Es por esto que el objetivo general de la utilización de mezclas de sales en esta investigación pretende estudiar el comportamiento que tienen estas mezclas en su uso como tratamiento de supresión de polvo o estabilización bajo distintas condiciones medioambientales, con el fin de mitigar el problema del polvo durante la estación seca, sin perjudicar el funcionamiento de los caminos durante los meses lluviosos, además de reducir el consumo de agua para riego, lo que se traduce en una disminución de los costos de conservación y operación de los caminos, y por otro lado, asegurar un adecuado nivel de servicio.

Por otro lado, dado que los problemas funcionales en los caminos son generados por efecto de las condiciones medioambientales a las que están sometidos, al estudiar el efecto y comportamiento que tienen distintas mezclas de sales y tipos de suelos en la absorción y/o pérdida de humedad bajo distintas condiciones de humedad, se puede conocer directamente el contenido de humedad que presentará un tipo suelo estabilizado con una determinada mezcla de sales, lo que permite controlar y entregar información importante sobre las medidas a tomar según las condiciones climáticas imperantes en el lugar de estudio.

En general y como se mencionó en la revisión de la literatura, las principales propiedades de las sales que favorecen su uso para el tratamiento de caminos no pavimentados y que se observaron durante los ensayos realizados, son la higroscopía (mediante la absorción y retención de humedad de las muestras), aglomeración o cohesión de las partículas finas del suelo en presencia de humedad, y la cristalización en la superficie durante el secado en horno, en donde alguno de estos mecanismos estará más presente que otro dependiendo del tipo de suelo, de las sales y de las condiciones de humedad y temperatura a las que son sometidos.

En base a los objetivos y los resultados obtenidos en esta investigación, se presentan a continuación las siguientes conclusiones y recomendaciones.

## 6.1. CONCLUSIONES

- Se observó que los suelos tratados con bischofita presentaron un mayor contenido de humedad que los suelos con NaCl al final del período de acondicionamiento, y que el contenido de humedad es mayor mientras mayor sea la dosis de bischofita, mientras que las mezclas sin contenidos de sales, poseen una capacidad considerablemente menor de absorción y retención de humedad.
- Dado lo anterior, la bischofita en particular muestra una mayor capacidad de absorción y retención de la humedad en comparación a las otras mezclas con NaCl, lo que se debe fundamentalmente a que en teoría y según los resultados obtenidos, su humedad de equilibrio es menor, además de tener una menor presión de vapor en solución que una muestra con NaCl, lo que se traduce en una mayor retención de humedad. Por otro lado, la deliquesencia es un mecanismo propio de la bischofita que no se presenta en el cloruro de sodio, lo que permite mantener húmedos los finos de la superficie de los suelos.
- En general las muestras con mezclas de cloruros (M2 y M3) se comportaron de manera similar a las muestras con un solo tipo de sal (M1 y M4), mostrando tendencias similares en términos de absorción y evaporación de la humedad. Específicamente, las mezclas con mayor contenido de  $MgCl_2$  presentaron una mayor capacidad de absorción de humedad que las muestras sólo con contenido de NaCl, lo anterior para todos los tipos de suelos en estudio.
- Comparando las tres humedades de acondicionamiento a las que fueron sometidas las muestras, se observó que a una humedad de acondicionamiento del 40%, el agua absorbida por las muestras se encuentra en equilibrio con el agua en estado de vapor en el aire dentro de la cámara de humedad al final de la fase de absorción, es por esto que las curvas tienden a mantenerse constantes en el tiempo, mientras que para humedades del 90%, todas las mezclas tendieron a seguir absorbiendo humedad al final de dicho período.
- Al comparar las temperaturas a las que fueron expuestas las muestras en la fase de evaporación, en general se puede decir que durante el secado a 20°C las muestras no perdieron completamente su humedad, manteniendo casi constante la humedad absorbida al final del período. A una temperatura de 30°C, las muestras en algunos casos conservan algún grado de humedad al final del período, mientras que a 50°C en todas las muestras se observa una disminución drástica de la humedad, llegando a la pérdida total de humedad al final del período de 30 horas de secado, excepto para algunos casos en que la humedad previa en el período de absorción es del 90%, esto para los suelos con algún grado de plasticidad.

- Comparando la capacidad de absorción y evaporación de los tres tipos de suelos en estudio, en base a los resultados se puede decir que el suelo granular no plástico (NP) fue el que tuvo una menor capacidad de absorción de agua, dada la gran cantidad de partículas de sobretamaño y poco contenido de finos, lo que se traduce en una superficie poco cohesiva y con mucho material suelto, impidiendo una correcta absorción de agua de las mezclas. A mayor Índice de Plasticidad se presentó una mayor absorción de humedad, debido a un mayor contenido de fracción fina del material, y por otro lado, a la actividad eléctrica superficial de las partículas de arcilla, lo que rige su comportamiento dada la gran superficie específica en relación con su volumen y masa en comparación a un suelo granular.
- En el caso de las muestras con contenidos de sales, en general se observó un retardo en la evaporación de agua durante las primeras 6 horas de la fase de secado en horno, principalmente para temperaturas bajo los 30°C y para todos los tipos de suelos estudiados, dado que las sales minimizan la pérdida de agua por evaporación debido a sus propiedades, entre ellas la tensión superficial tendrá un incremento lo cual inhibe la evaporación del agua, debido a la fuerte unión que existe con las partículas del suelo. Mientras que después de las 6 primeras horas el contenido de humedad de las muestras se reduce drásticamente, sobre todo para temperaturas de secado sobre los 30°C.
- Durante la fase de evaporación de acondicionamiento en horno a distintas temperaturas y sin humedad, en todas las muestras con sales se formó una costra superficial, produciéndose el fenómeno de cristalización de las sales, lo cual puede ser favorable en caminos bajo condiciones lluviosas, mejorando el drenaje y escurrimiento superficial de las aguas para evitar la saturación de la carpeta de rodado.
- La metodología de ensayo definida en este estudio permitió observar y comparar de buena manera el efecto y comportamiento de las distintas mezclas de cloruros y tipos de suelos en la capacidad de absorción, retención y pérdida de humedad para los diferentes ciclos de acondicionamiento, obteniendo una buena representación de las condiciones medioambientales de terreno.
- Con respecto al modelamiento matemático de las curvas, se puede apreciar que se obtuvieron valores de coeficientes de correlación satisfactorios en la mayoría de los modelos, superiores al 0.9, considerando que el coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ) debe ser superior a 0.85 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales. En consecuencia, considerando las suposiciones y arreglos al modelo matemático estudiado, se puede decir que éste resultó adecuado para modelar la

absorción y/o evaporación de agua de las muestras en estudio, dado que se ajustó de buena manera a los resultados obtenidos en laboratorio.

- En general, el agua utilizada en el tratamiento de caminos mineros representa hasta un 10% del consumo total de una mina, por lo que la utilización de una correcta dosis de mezclas de sales como solución, incide directamente en un ahorro en costos de construcción y mantención de estos caminos.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la construcción de tramos de prueba tratados con mezclas sales, con el propósito de evaluar y determinar en terreno el comportamiento que tienen las distintas mezclas y suelos utilizados en este estudio en la absorción, retención y pérdida de humedad, así como observar y evaluar el comportamiento mecánico y funcional de la carpeta de rodado, esto bajo distintas condiciones climáticas. Para esto se propone utilizar medidores de humedad relativa del ambiente y sensores para medir la humedad de la carpeta, para así obtener valores reales de humedad.
- Dicho lo anterior, se recomienda contrastar los resultados de humedad del suelo obtenidos en terreno con los calculados mediante el modelo matemático propuesto.
- Se debe evaluar si es posible la aplicación de las mezclas en terreno, ya sea mediante estabilización o como riego en salmuera para el tratamiento de control de polvo. Además, considerar las mezclas de cloruros en distintas proporciones y dosis a las estudiadas en la presente investigación.
- Con respecto a la metodología de este estudio, se recomienda variar las dosificaciones de sales y porcentajes de cada sal en las mezclas de cloruros, además de los tipos de suelos utilizados. Por otro lado, el rango de humedad puede ser ampliado bajo el 40% con equipos que lo permitan, con el fin de obtener un mayor espectro de humedades sobre el comportamiento de las muestras.
- Es recomendable desarrollar un estudio de repetibilidad sobre los ensayos realizados con el fin de asegurar la calidad y exactitud de los resultados obtenidos en las mediciones de humedad de las distintas muestras bajo la metodología en estudio.
- El NaCl al ser higroscópico pero no deliquescente, y dada su menor capacidad de absorción de humedad con respecto al  $MgCl_2$ , mantendrá la carpeta de rodado con un menor nivel de humectación que otras sales, por lo que se recomienda para ser utilizado en zonas lluviosas o de humedades muy altas para evitar problemas de disminución de la seguridad vial producto de la reducción del coeficiente de deslizamiento que afecte al camino.
- Se recomienda realizar un estudio económico de costos con respecto al uso de mezclas de cloruros, donde la utilización de mezclas de sales se puede traducir en una disminución de los costos de construcción y mantenimiento, dado que el valor por tonelada del  $MgCl_2$  es considerablemente mayor al del NaCl, por lo que una mezcla de ambas sales permitiría un ahorro en términos de costos de material.

## REFERENCIAS

- Addo, J. Q., Sanders, T. G., & D, P. (2004). Road Dust Suppression : Effect on Maintenance Stability , Safety and the Environment Phases 1-3. *Measurement*, (May).
- Badillo, E., & Rico, A. (1976). *Mecánica de suelos*. Limusa. Retrieved from <https://books.google.cl/books?id=NRWzrQEACAAJ>
- Birst, S., & Hough, J. (1999). Chemical Additive Usage on Unpaved Roads in the Mountain Plains States, 149.
- Campos, G., & Espinoza, E. (2006). *Análisis comparativo de la eficiencia de supresores de polvo mediante el uso del equipo Dustmate y el efecto económico para la conservación rutinaria y periódica de carpetas granulares*.
- Cornejo, R. (2006). The stabilization of unsurfaced roads using Bischofite in the Atacama Region. *AIPCR PIARC Internet*.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.
- Dirección de Vialidad, M. de O. P. (2015a). Manual de Carreteras V8. *Volumen N°8 - Manual De Carreteras*, 161–168.
- Dirección de Vialidad, M. de O. P. (2015b). Red vial nacional. Dimensionamiento y características, 2015, 1–8.
- Gaete, R., & Visser, A. T. (1990). Un sistema de gestión para la mantención de caminos no pavimentados.
- Garnica, P., Pérez, A., Gómez, J. A., & Obil, E. Y. (2001). Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. *Instituto Mexicano Del Transporte*, (201), 68. Retrieved from <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt201.pdf>
- González, Á., Paniagua, F., Chamorro, A., & Montes, N. (2014). Skid resistance of Magnesium Chloride roads. In *11vo Congreso PROVIAL* (pp. 1–30).
- Graell, T. (2010). *Estudio de parámetros mecánicos de materiales granulares estabilizados con cloruro de sodio*.

- Halles, F. (2007). Uso de Sales para Estabilización y Supresor de Polvo en Caminos No Pavimentados.
- Han, C. (1992). *Dust Control On Unpaved Roads*.
- INN. (1979). Norma Chilena Oficial NCh 1515.Of79- Mecánica de suelos - Determinación de la humedad.
- INN. (2001). Estabilización química de suelos - Caracterización de producto y evaluación de las propiedades de desempeño del suelo. NCh 2505: Of 2001.
- Jones, T. E. (1984). Dust emission from unpaved roads in Kenya. *Crowthorne, Berkshire: Overseas Unit, Transport and Road Research Laboratory*, 31.
- Meruane, C., & Garreaud, R. (2006). Determinación de Humedad en la Atmósfera, 7.
- MOP. (2009). *Informe Final Programa de Caminos Básicos*.
- MOP. (2015). Manual de Carreteras V5. *Tabla 5.408.303.B*.
- Petrucci, R. H., Harwood, W. S., & Herring, F. G. (2002). *General Chemistry* (8th editio). Prentice-Hall.
- Pradena, M., Mery, J. P., & Novoa, E'. (2010). Estabilización y mantenimiento de caminos no pavimentados sometidos a condiciones de hielo-nieve en zona de montaña. *Revista de La Construccion*, 9(2), 97–107. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2010000200010>
- Shakil, S., & Ananya, T. (2015). Effectiveness of Environmental Impact of Road Dust Supressants. *Bangladesh E-Journal of ...*, (December). Retrieved from <http://www.bangladeshsociology.org/Effectiveness of Environmental12.1.pdf>
- Sierra Toro, M. E. (2006). *Modelo matemático para el control automático de un sistema térmico*.
- The World Bank. (2016). World Development Indicators 2016. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0683-4>
- Thenoux, G., & San Juan, M. (2000). Estabilización físico-química de suelos para caminos [Diapositiva]. *Santiago, PROVIAL*, 14.

Thenoux, G., Sandoval, G., Sepúlveda, M., Halles, F., & Graell, T. (2012). Estudio de la influencia del cloruro de sodio al ser utilizado en estabilización de suelos. In *10mo Congreso PROVIAL* (pp. 1–12).

Thenoux, G., & Vera, S. (2002). Evaluación de la efectividad del Cloruro de Magnesio hexahidratado ( Bischofita ) como estabilizador químico de capas de rodadura granulares. *Materiales de Construcción*, *52*, 5–22.

Thompson, R. J., & Visser, A. T. (2001). Mine haul road fugitive dust emission and exposure characterisation. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, *54*(1), 18–30.

## ANEXOS

### A. DETALLES DE ENSAYOS DE MUESTREO DE SUELOS

#### A.1. LIMITES DE ATTERBERG

Con respecto al suelo trabajado llamado comúnmente Maicillo, se puede decir que es un material común de algunas regiones del centro y sur del país, en donde las partículas que componen este suelo son fácilmente pulverizables, debido a que proviene de la desintegración o meteorización de la roca granítica, y al estar sometido a esfuerzos mecánicos, sus partículas tienden a desintegrarse. Al tratarse de un suelo no cohesivo, al deformarse se rompe o no recupera su forma inicial, por lo que su consistencia es quebradiza. En consecuencia, este suelo no presenta límite líquido ni límite plástico, determinándose como un suelo no plástico.

A continuación, se presentan los resultados para los otros tipos de suelos estudiados.

Tabla A-1: Resultados para determinación de LL y LP suelo Mezcla.

LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
Nº DE CAIDAS	17	24	33		
Nº DE CAPSULA	1	2	3	1	2
WTh , gr	24.7	26.2	25.8	13.2	13.5
WTs , gr	21.4	22.6	22.2	12.9	13.0
W CAPSULA	10.8	10.1	10.5	11.3	10.7
W $\omega$	3.4	3.6	3.6	0.3	0.5
W SECO , gr	10.6	12.5	11.7	1.6	2.2
$\omega$ , (%)	31.6	28.8	30.8	16.5	24.0

<b>LL:</b>	<b>30.3</b>	<b>LP:</b>	<b>20.2</b>	<b>IP:</b>	<b>10.1</b>
------------	-------------	------------	-------------	------------	-------------

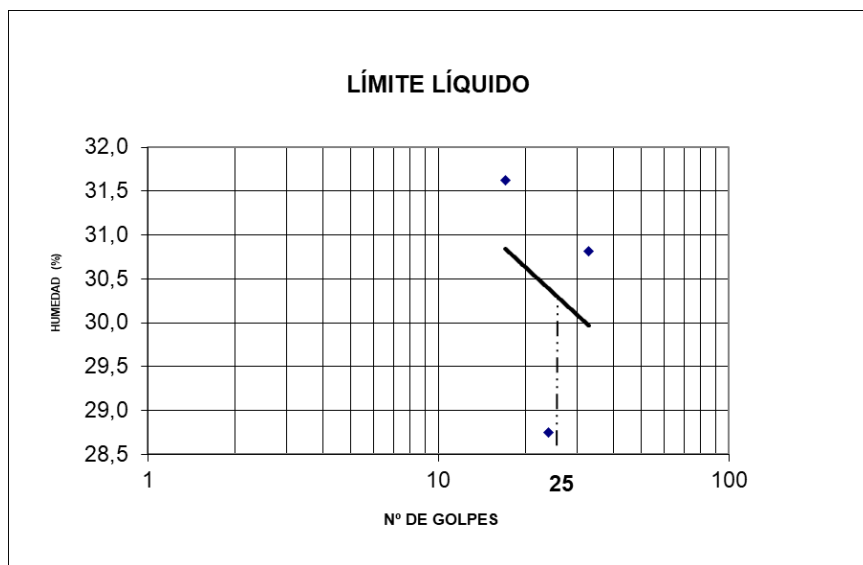


Figura A-1: Curva de fluidez y determinación gráfica LL para suelo Mezcla.

Para el caso del suelo arcilloso, los ensayos de Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor Modificado y Capacidad de Soporte (CBR) ya se encontraban determinados. Los resultados se muestran en la figura a continuación.

<b>Código de la Muestra</b>	:	N/A
<b>Identificación de la Muestra:</b>		Arcilla Lomas Coloradas
<b>Muestra N°</b>		<b>5</b>
		Arcilla Natural
<b>1. Granulometría (M. de C. 8.102.1 - LNV 105)</b>		
(% que pasa, en peso)		
Tamiz	3/8"	100,0
Malla N°	4	99,4
Malla N°	8	97,5
Malla N°	30	68,3
Malla N°	40	61,5
Malla N°	200	51,0
<b>2. Límites de Atterberg (LNV 89 - M. de C. 8.102.3) (LNV 90 - M. de C. 8.102.4)</b>		
Límite Líquido	(%)	53,3
Límite Plástico	(%)	33,5
Índice de Plasticidad	(%)	19,8
<b>3. Densidades del Ensayo</b>		
D.M.C.H.	(kg/dm <sup>3</sup> )	1,974
H. óptima	(%)	13,6
D.M.C.S.	(kg/dm <sup>3</sup> )	1,738
<b>4. Capacidad de Soporte CBR (M. de C. 8.102.11 - LNV 92)</b>		
CBR a 25 golpes	(%)	6,0

Figura A-2: Propiedades suelo Arcilloso en estudio.

## A.2. ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO

Las tablas a continuación muestran los resultados de Humedad Óptima y Densidad Máxima Compactada Seca (D.M.C.S.), además de las figuras que muestran la curva del ensayo Proctor, esto para los suelos Maicillo (NP) y Mezcla (IP=10) en estudio.

Tabla A-2: Resultados para determinación de humedad real para suelo NP.

Cápsula	1	2	3	4	5
Molde	1%	2	3	4	5
Humedad Ap.	6%	8%	10%	12%	14%
Peso cap.+mat. Húmedo	1.089	0.611	1.077	0.98	0.75
Peso cap.+mat. Seco	1.015	0.572	0.982	0.88	0.675
Peso cápsula	0.174	0.163	0.16	0.152	0.17
Peso agua	0.074	0.039	0.095	0.1	0.075
Peso material seco	0.841	0.409	0.822	0.728	0.505
Humedad real	8.8%	9.5%	11.6%	13.7%	14.9%

Tabla A-3: Resultados para determinación de D.M.C.S. para suelo NP.

Molde	Golpe	Humedad		Peso mol+material	Peso molde	Peso Mat.	Vol. Molde [l]	D.M.C.H [Kg/dm3]	D.M.C.S [kg/dm3]	
		Aparente	Real						Aparente	Real
1	25	6%	8.8%	6.178	4.078	2.100	0.940	2.234	2.233	2.232
2	25	8%	9.5%	6.194	4.078	2.116	0.940	2.251	2.249	2.249
3	25	10%	11.6%	6.177	4.078	2.099	0.940	2.233	2.231	2.230
4	25	12%	13.7%	6.138	4.078	2.060	0.940	2.191	2.189	2.188
5	25	14%	14.9%	6.098	4.078	2.020	0.940	2.149	2.146	2.146

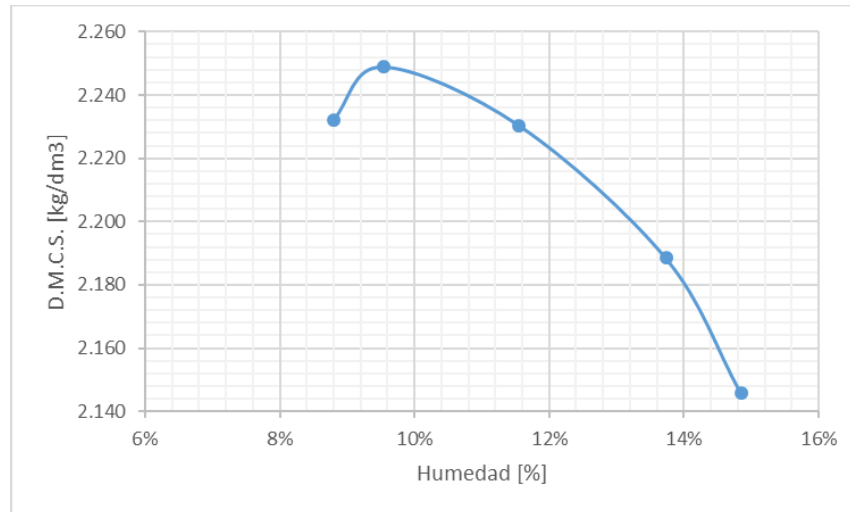


Figura A-3: Curva ensayo Proctor Modificado para suelo NP.

Tabla A-4: Resultados para determinación de humedad real para suelo IP=10.

Cápsula	1	2	3
Molde	1	2	3
Humedad Ap.	10%	12%	14%
Peso cap.+mat. Húmedo	0.638	0.631	0.573
Peso cap.+mat. Seco	0.586	0.568	0.511
Peso cápsula	0.197	0.151	0.159
Peso agua	0.052	0.063	0.062
Peso material seco	0.389	0.417	0.352
Humedad real	<b>13.4%</b>	<b>15.1%</b>	<b>17.6%</b>

Tabla A-5: Resultados para determinación de D.M.C.S. para suelo IP=10.

Molde	Golpe	Humedad		Peso mol+material	Peso molde	Peso Mat.[kg]	Vol. Molde [cm <sup>3</sup> ]	D.M.C.H [Kg/dm <sup>3</sup> ]	D.M.C.S [kg/dm <sup>3</sup> ]	
		Aparente	Real						Aparente	Real
1	25	10%	13.4%	3.997	1.994	2.003	947.870	2.113	2.111	2.110
2	25	12%	15.1%	4.04	1.994	2.046	947.870	2.159	2.156	2.155
3	25	14%	17.6%	4.004	1.994	2.010	947.870	2.121	2.118	2.117

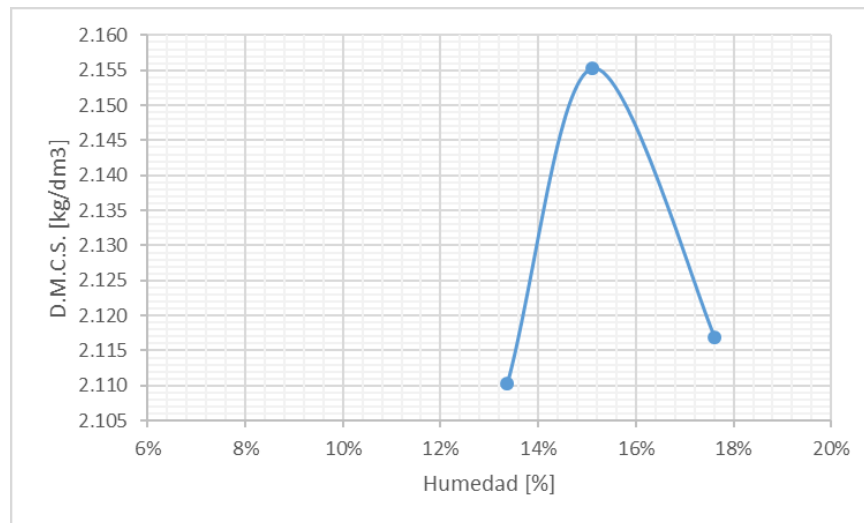


Figura A-4: Curva ensayo Proctor Modificado para suelo IP=10.

### A.3. ENSAYOS CAPACIDAD DE SOPORTE CBR

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de CBR a 25 golpes realizados en laboratorio (según MC V8 sección 8.102.11), además de las curvas de Carga vs. Penetración obtenidas para los suelos en estudio Maicillo (NP) y suelo mezcla (IP=10).

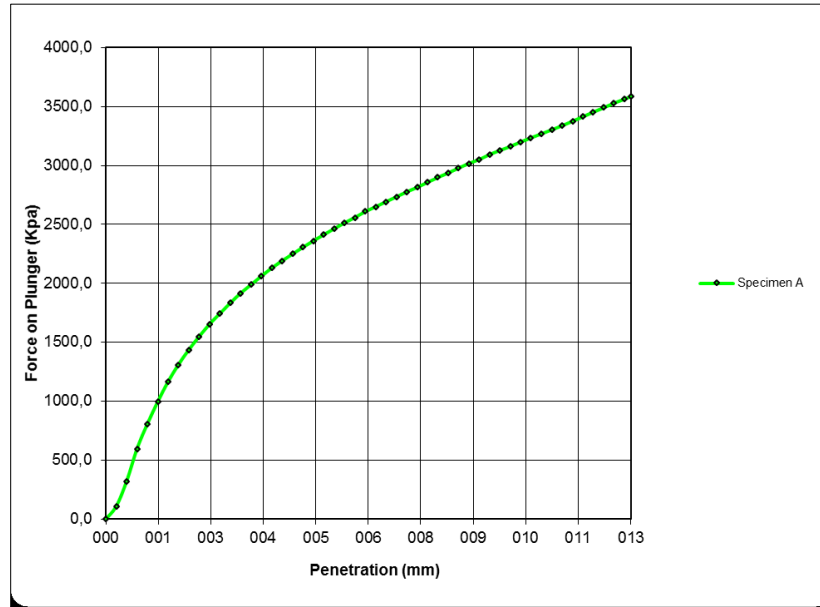


Figura A-5: Curva Carga vs. Penetración suelo NP.

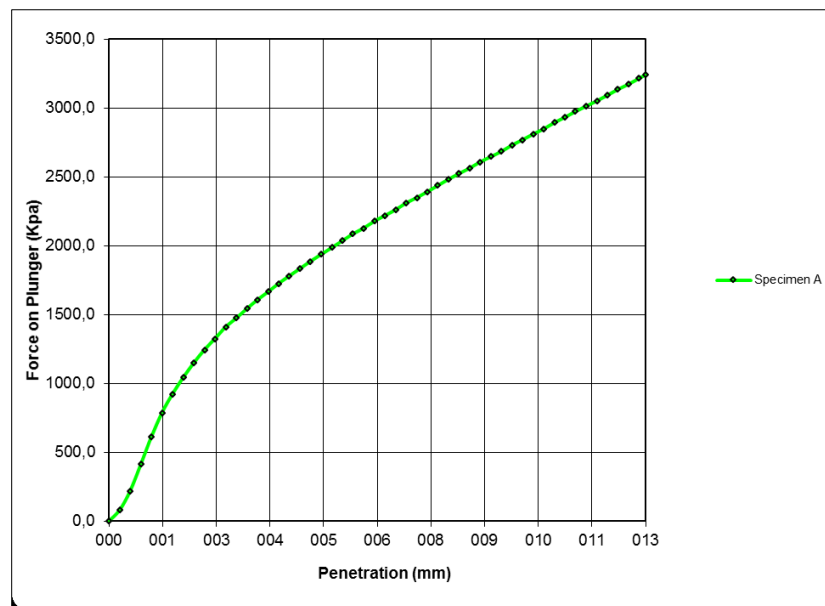


Figura A-6: Curva Carga vs. Penetración suelo IP=10.

Tabla A-6: Datos test ensayo CBR suelo NP.

Read Number	Load (Kn)	Disp. (mm)	Force on Plunger (Kpa)	Penetration (mm)	CBR
0	0,044	13,714	0,0	0,000	
1	0,251	13,966	107,0	0,252	
2	0,665	14,218	320,9	0,504	
3	1,198	14,469	595,9	0,754	
4	1,612	14,722	809,8	1,008	
5	1,974	14,973	997,0	1,258	
6	2,299	15,219	1165,0	1,505	
7	2,580	15,470	1310,2	1,755	
8	2,824	15,722	1436,3	2,007	
9	3,046	15,974	1550,9	2,259	
10	3,246	16,223	1654,0	2,508	
11	3,423	16,478	1745,7	2,763	33,32
12	3,593	16,725	1833,5	3,011	
13	3,756	16,977	1917,6	3,263	35,81
14	3,896	17,231	1990,1	3,516	
15	4,037	17,481	2062,7	3,767	
16	4,170	17,733	2131,5	4,019	
17	4,288	17,984	2192,6	4,269	
18	4,399	18,234	2249,9	4,520	
19	4,510	18,486	2307,2	4,772	
20	4,613	18,734	2360,7	5,020	
21	4,717	18,990	2414,1	5,276	31,34
22	4,813	19,238	2463,8	5,523	
23	4,909	19,490	2513,4	5,775	
24	4,998	19,738	2559,3	6,023	
25	5,094	19,992	2608,9	6,278	
26	5,175	20,243	2651,0	6,528	
27	5,257	20,495	2693,0	6,780	
28	5,338	20,743	2735,0	7,028	
29	5,419	20,995	2777,0	7,280	
30	5,493	21,247	2815,2	7,532	
31	5,574	21,493	2857,2	7,779	29,81
32	5,656	21,746	2899,3	8,032	
33	5,730	21,997	2937,4	8,283	
34	5,811	22,249	2979,5	8,534	
35	5,885	22,495	3017,7	8,781	
36	5,952	22,751	3052,0	9,037	
37	6,033	22,998	3094,1	9,284	
38	6,099	23,249	3128,4	9,534	
39	6,166	23,503	3162,8	9,789	
40	6,240	23,754	3201,0	10,039	
41	6,306	23,999	3235,4	10,285	28,40
42	6,373	24,252	3269,8	10,538	
43	6,439	24,505	3304,2	10,791	
44	6,506	24,752	3338,5	11,038	
45	6,580	25,005	3376,7	11,291	
46	6,654	25,257	3414,9	11,543	
47	6,728	25,504	3453,1	11,789	
48	6,802	25,758	3491,3	12,044	
49	6,876	26,008	3529,5	12,293	
50	6,942	26,257	3563,9	12,542	
51	6,987	26,419	3586,8	12,704	28,01

Tabla A-7: Datos test ensayo CBR suelo IP=10.

Read Number	Load (Kn)	Disp. (mm)	Force on Plunger (Kpa)	Penetration (mm)	CBR
0	0,052	9,429	0,0	0,000	
1	0,207	9,684	80,2	0,255	
2	0,473	9,931	217,7	0,501	
3	0,850	10,185	412,5	0,756	
4	1,235	10,433	611,2	1,004	
5	1,575	10,686	786,9	1,257	
6	1,841	10,936	924,4	1,506	
7	2,070	11,187	1042,8	1,758	
8	2,277	11,439	1149,8	2,010	
9	2,462	11,693	1245,3	2,263	
10	2,617	11,940	1325,5	2,511	
11	2,780	12,190	1409,5	2,760	20,44
12	2,906	12,444	1474,5	3,015	
13	3,039	12,695	1543,2	3,266	
14	3,164	12,945	1608,1	3,516	
15	3,275	13,197	1665,4	3,768	
16	3,393	13,447	1726,6	4,017	
17	3,497	13,695	1780,0	4,265	
18	3,600	13,948	1833,5	4,518	
19	3,704	14,197	1887,0	4,768	
20	3,800	14,448	1936,7	5,018	
21	3,896	14,704	1986,3	5,274	19,21
22	3,992	14,953	2036,0	5,523	
23	4,088	15,201	2085,6	5,771	
24	4,170	15,454	2127,6	6,025	
25	4,266	15,706	2177,3	6,277	
26	4,347	15,959	2219,3	6,530	
27	4,429	16,211	2261,3	6,782	
28	4,525	16,462	2311,0	7,032	
29	4,599	16,711	2349,2	7,282	
30	4,680	16,959	2391,2	7,529	
31	4,769	17,209	2437,1	7,780	18,60
32	4,857	17,464	2482,9	8,035	
33	4,939	17,715	2524,9	8,285	
34	5,013	17,960	2563,1	8,530	
35	5,101	18,216	2608,9	8,786	
36	5,175	18,466	2647,1	9,037	
37	5,249	18,717	2685,3	9,287	
38	5,338	18,967	2731,2	9,538	
39	5,412	19,214	2769,4	9,785	
40	5,493	19,469	2811,4	10,039	
41	5,567	19,722	2849,6	10,292	17,97
42	5,656	19,974	2895,4	10,544	
43	5,730	20,222	2933,6	10,792	
44	5,811	20,470	2975,6	11,040	
45	5,885	20,720	3013,8	11,291	
46	5,959	20,973	3052,0	11,544	
47	6,040	21,225	3094,1	11,796	
48	6,122	21,473	3136,1	12,044	
49	6,195	21,727	3174,3	12,297	
50	6,277	21,976	3216,3	12,546	
51	6,329	22,130	3243,0	12,700	18,09

## B. DATOS ENSAYOS DE HUMEDAD DE BANDEJAS

A continuación se presentan en detalle los valores de humedad obtenidos durante los ensayos de las muestras en laboratorio durante las fases de absorción en Cámara de Humedad y fase de evaporación en horno.

### B.1. SUELO MAICILLO (NP)

Tabla B-1: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 20°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,32	0,55	0,37	0,43	0,31
	6	0,51	0,86	0,68	0,62	0,55
	24	0,70	1,97	1,42	1,23	1,04
	30	0,70	2,16	1,54	1,30	1,04
secado en horno	32	0,58	1,97	1,30	1,11	0,86
	36	0,45	1,85	1,24	0,99	0,80
	54	0,39	1,85	1,17	0,99	0,74
	60	0,39	1,85	1,17	0,99	0,74

Tabla B-2: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 30°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,45	0,49	0,43	0,31	0,37
	6	0,64	0,80	0,80	0,62	0,55
	24	0,83	1,97	1,48	1,17	1,10
	30	0,90	2,16	1,54	1,23	1,10
secado en horno	32	0,77	1,98	1,42	1,11	0,92
	36	0,51	1,25	0,63	0,69	0,62
	54	0,39	0,59	0,45	0,26	0,44
	60	0,39	0,59	0,45	0,26	0,38

Tabla B-3: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 50°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,45	0,56	0,43	0,31	0,31
	6	0,58	0,93	0,62	0,62	0,55
	24	0,77	2,04	1,42	1,11	1,04
	30	0,90	2,22	1,60	1,17	1,04
secado en horno	32	0,51	1,98	1,42	1,11	0,98
	36	0,13	1,62	0,63	0,99	0,56
	54	0,07	0,77	0,33	0,56	0,25
	60	0,07	0,17	0,09	0,01	0,07

Tabla B-4: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 20°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,19	0,43	0,31	0,25	0,37	0,37
	6	0,64	0,81	0,74	0,62	0,68	0,68
	24	0,77	1,86	1,43	1,12	0,99	0,99
	30	1,15	2,30	1,80	1,30	1,23	1,23
secado en horno	32	1,03	2,05	1,61	1,12	1,05	1,05
	36	0,77	1,33	0,82	0,69	0,75	0,75
	54	0,65	0,66	0,58	0,26	0,50	0,50
	60	0,58	0,66	0,58	0,26	0,50	0,50

Tabla B-5: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 30°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,38	0,37	0,50	0,37	0,31	0,31
	6	0,77	0,81	0,87	0,81	0,55	0,55
	24	1,03	1,80	1,61	1,12	0,92	0,92
	30	1,28	2,17	1,92	1,43	1,17	1,17
secado en horno	32	1,09	1,99	1,74	1,31	0,99	0,99
	36	0,84	1,26	0,95	0,88	0,68	0,68
	54	0,71	0,59	0,77	0,45	0,50	0,50
	60	0,59	0,53	0,71	0,39	0,44	0,44

Tabla B-6: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 50°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,45	0,31	0,25	0,31	0,19	0,19
	6	0,77	0,81	0,74	0,62	0,56	0,56
	24	0,96	1,74	1,36	1,12	0,86	0,86
	30	1,28	2,23	1,80	1,43	1,23	1,23
secado en horno	32	0,97	1,99	1,68	1,31	1,11	1,11
	36	0,59	1,63	0,88	1,19	0,81	0,81
	54	0,46	0,72	0,58	0,76	0,50	0,50
	60	0,14	0,11	-0,03	0,08	0,02	0,02

Tabla B-7: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 20°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,58	0,81	0,68	0,74	0,55	
	6	1,22	1,61	1,61	1,49	1,17	
	24	1,67	3,84	3,71	3,47	2,77	
	30	1,67	5,02	4,76	4,40	3,94	
secado en horno	32	1,54	4,78	4,52	4,28	3,76	
	36	1,29	4,07	3,76	3,86	3,46	
	54	1,16	3,43	3,58	3,45	3,29	
	60	1,16	3,43	3,58	3,45	3,29	

Tabla B-8: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 30°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,58	0,68	0,62	0,68	0,62	
	6	1,15	1,73	1,48	1,42	1,23	
	24	1,67	3,84	3,58	3,40	2,83	
	30	1,67	4,83	4,63	4,27	4,00	
secado en horno	32	1,29	4,36	3,92	3,80	3,23	
	36	1,16	3,89	3,81	3,26	2,58	
	54	1,10	2,76	2,45	1,90	1,40	
	60	1,10	2,65	2,27	1,72	1,40	

Tabla B-9: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 50°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,64	0,56	0,74	0,81	0,49	
	6	1,35	1,49	1,73	1,61	1,29	
	24	1,74	3,84	3,65	3,53	2,83	
	30	1,74	5,02	4,76	4,46	4,06	
secado en horno	32	1,42	4,37	4,05	3,93	3,41	
	36	1,04	3,90	3,29	3,39	3,00	
	54	0,22	1,30	1,75	1,08	1,46	
	60	0,16	0,48	0,28	0,49	0,45	

## B.2. SUELO MEZCLA (IP=10)

Tabla B-10: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 20°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,25	0,62	0,50	0,44	0,44
	6	0,81	1,19	1,00	0,94	0,94
	24	1,81	2,56	2,25	2,12	2,06
	30	1,88	2,87	2,50	2,24	2,19
secado en horno	32	1,69	2,63	2,38	2,12	2,00
	36	1,57	2,51	2,25	2,00	1,82
	54	1,32	2,33	2,07	1,88	1,70
	60	1,26	2,26	2,01	1,82	1,64

Tabla B-11: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 30°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,44	0,44	0,50	0,44	0,50
	6	0,94	0,94	0,94	0,87	1,00
	24	1,82	2,50	2,37	1,93	2,00
	30	2,01	2,62	2,43	2,24	2,06
secado en horno	32	0,90	1,71	1,34	1,09	1,33
	36	0,29	0,92	0,42	0,29	0,72
	54	0,16	0,07	0,06	0,05	0,10
	60	0,10	0,01	0,06	-0,01	0,10

Tabla B-12: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 50°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,44	0,50	0,50	0,44	0,38
	6	0,88	1,06	1,06	1,00	0,88
	24	1,82	2,62	2,31	2,06	1,88
	30	1,94	2,75	2,50	2,25	2,06
secado en horno	32	0,71	1,65	1,46	1,03	1,21
	36	0,28	0,86	0,55	0,42	0,59
	54	0,10	0,13	0,12	0,11	0,04
	60	0,10	0,13	0,12	0,11	0,04

Tabla B-13: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 20°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,63	0,68	0,62	0,49	0,74	
	6	0,95	1,18	1,05	0,93	1,04	
	24	1,84	2,41	2,23	2,04	1,97	
	30	2,03	2,72	2,42	2,16	2,09	
secado en horno	32	1,91	2,60	2,23	1,98	1,91	
	36	1,78	2,48	2,17	1,86	1,85	
	54	1,60	2,42	2,11	1,80	1,79	
	60	1,53	2,36	2,05	1,80	1,73	

Tabla B-14: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 30°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,57	0,68	0,68	0,56	0,61	
	6	1,02	1,18	1,12	0,99	0,86	
	24	1,84	2,35	2,29	1,92	1,78	
	30	2,03	2,72	2,48	2,17	2,03	
secado en horno	32	1,91	2,54	2,24	2,04	1,85	
	36	1,66	1,82	1,45	1,62	1,55	
	54	1,35	1,16	1,27	1,20	1,36	
	60	1,22	1,16	1,21	1,14	1,30	

Tabla B-15: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 50°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,64	0,74	0,56	0,62	0,61	
	6	1,08	1,18	0,99	1,05	0,86	
	24	1,97	2,48	2,17	1,98	1,78	
	30	2,10	2,91	2,35	2,17	1,97	
secado en horno	32	1,16	1,71	1,08	0,83	0,64	
	36	0,54	0,74	0,30	0,17	0,04	
	54	0,11	0,20	0,05	0,11	0,04	
	60	0,11	0,20	0,05	0,11	0,04	

Tabla B-16: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 20°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2		0,64	0,74	0,68	0,62	0,62
	6		1,53	1,43	1,49	1,49	1,23
	24		3,69	4,09	3,85	3,66	3,51
	30		4,58	5,33	5,03	4,84	4,50
secado en horno	32		4,34	5,04	4,79	4,66	4,26
	36		4,09	4,57	4,50	3,95	3,85
	54		3,55	3,80	3,43	3,30	3,20
	60		3,49	3,74	3,37	3,24	3,08

Tabla B-17: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 30°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2		0,64	0,62	0,50	0,56	0,55
	6		1,40	1,24	1,30	1,36	1,23
	24		3,56	4,03	3,72	3,60	3,51
	30		4,52	5,21	4,84	4,77	4,50
secado en horno	32		4,15	4,74	4,55	4,36	4,09
	36		3,30	3,79	3,84	3,53	3,38
	54		1,23	1,32	1,29	1,16	1,20
	60		1,11	1,26	1,29	1,16	1,20

Tabla B-18: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 50°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2		0,45	0,56	0,50	0,50	0,49
	6		1,27	1,18	1,30	1,30	1,23
	24		3,56	3,97	3,60	3,53	3,33
	30		4,45	5,15	4,84	4,71	4,38
secado en horno	32		3,97	4,56	4,37	4,24	3,90
	36		3,11	3,61	3,66	3,35	3,20
	54		1,04	1,14	1,11	0,98	1,01
	60		0,86	1,08	0,99	0,86	0,89

### B.3. SUELO ARCILLOSO (IP=20)

Tabla B-19: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 20°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,38	0,68	0,43	0,55	0,43
	6	0,88	1,05	1,05	1,03	0,93
	24	1,94	2,46	2,22	2,31	2,22
	30	2,07	2,65	2,59	2,31	2,35
secado en horno	32	1,89	2,47	2,23	2,07	2,23
	36	1,76	2,35	2,17	2,07	2,17
	54	1,64	2,29	2,05	2,01	2,05
	60	1,58	2,23	1,99	1,95	1,99

Tabla B-20: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 30°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,38	0,62	0,43	0,43	0,43
	6	0,88	1,05	1,05	0,91	0,93
	24	1,94	2,34	2,22	2,19	2,22
	30	2,01	2,65	2,47	2,19	2,35
secado en horno	32	1,82	2,47	2,41	2,01	2,17
	36	1,33	1,99	2,11	1,30	1,74
	54	0,78	1,21	1,02	0,64	1,08
	60	0,72	1,15	0,96	0,52	0,96

Tabla B-21: Cámara Humedad HR40%, Secado en horno 50°C.

	TIEMPO (hr)	HUMEDAD (%)				
		M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,31	0,55	0,43	0,36	0,43
	6	0,82	0,92	1,05	0,79	0,93
	24	1,88	2,40	2,22	2,07	2,22
	30	1,94	2,59	2,53	2,07	2,35
secado en horno	32	1,88	2,53	2,47	1,89	2,05
	36	1,76	2,41	2,23	1,77	1,99
	54	0,84	1,33	1,03	0,94	1,02
	60	0,04	0,31	0,12	0,04	0,05

Tabla B-22: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 20°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,62	0,49	0,55	0,54	0,48	
	6	0,93	1,04	0,92	0,90	0,85	
	24	1,99	2,33	2,20	2,17	2,12	
	30	2,18	2,76	2,51	2,47	2,42	
secado en horno	32	2,00	2,58	2,27	2,30	2,25	
	36	1,88	2,46	2,21	2,30	2,19	
	54	1,75	2,40	2,09	2,24	2,07	
	60	1,69	2,34	2,03	2,18	2,01	

Tabla B-23: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 30°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,56	0,43	0,43	0,54	0,42	
	6	0,87	0,98	0,80	0,84	0,85	
	24	1,93	2,27	2,08	2,11	2,12	
	30	2,12	2,70	2,39	2,35	2,30	
secado en horno	32	1,94	2,16	2,39	2,23	2,18	
	36	1,45	1,68	2,09	1,53	1,77	
	54	0,90	0,91	1,01	0,88	1,12	
	60	0,84	0,85	0,95	0,76	1,00	

Tabla B-24: Cámara Humedad HR65%, Secado en horno 50°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,50	0,43	0,43	0,36	0,36	
	6	0,81	0,98	0,80	0,78	0,85	
	24	1,87	2,27	2,08	2,05	2,12	
	30	2,06	2,76	2,39	2,35	2,30	
secado en horno	32	2,00	2,70	2,39	2,12	2,07	
	36	1,87	2,58	2,09	2,00	2,01	
	54	0,96	1,51	0,89	1,17	1,06	
	60	0,16	0,49	0,06	0,29	0,05	

Tabla B-25: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 20°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,81	0,73	0,62	0,79	0,74	0,74
	6	1,75	1,70	1,60	1,70	1,60	1,60
	24	3,69	4,32	4,50	4,25	4,24	4,24
	30	4,38	6,08	5,97	5,40	5,41	5,41
secado en horno	32	4,14	5,85	5,74	5,23	5,29	5,29
	36	3,60	5,16	5,33	4,77	5,00	5,00
	54	3,06	4,53	4,69	4,02	3,95	3,95
	60	3,00	4,42	4,58	3,96	3,89	3,89

Tabla B-26: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 30°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,75	0,61	0,55	0,73	0,68	0,68
	6	1,69	1,58	1,54	1,70	1,60	1,60
	24	3,63	4,19	4,43	4,19	4,12	4,12
	30	4,32	5,96	5,91	5,40	5,28	5,28
secado en horno	32	3,90	5,56	5,10	5,06	5,11	5,11
	36	3,54	5,21	4,52	4,65	4,70	4,70
	54	2,76	4,12	3,30	3,79	3,71	3,71
	60	2,64	4,01	3,12	3,62	3,53	3,53

Tabla B-27: Cámara Humedad HR90%, Secado en horno 50°C.

		HUMEDAD (%)					
		TIEMPO (hr)	M0	M1	M2	M3	M4
Cámara humedad	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,69	0,67	0,49	0,67	0,61	0,61
	6	1,63	1,64	1,54	1,70	1,60	1,60
	24	3,57	4,26	4,37	4,13	4,12	4,12
	30	4,26	6,02	5,85	5,40	5,28	5,28
secado en horno	32	3,90	5,62	5,09	5,06	5,11	5,11
	36	3,54	5,28	4,51	4,65	4,70	4,70
	54	2,63	4,19	3,29	3,62	3,53	3,53
	60	1,85	3,33	2,36	2,41	2,66	2,66