

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



## **Actualización Grados de Desempeño (PG) para zona Centro - Sur de Chile**

Memoria de titulación presentada por

**ALEJANDRO ESTEBAN VARGAS MARCHANT**

Como requisito para optar al título de

**CONSTRUCTOR CIVIL**

Profesor Guía

**CARLOS WAHR**

Profesor Correferente

**RODRIGO DELGADILLO**

Agosto de 2024

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



## **Actualización Grados de Desempeño (PG) para zona Centro - Sur de Chile**

Memoria de titulación presentada por

**ALEJANDRO ESTEBAN VARGAS MARCHANT**

Como requisito para optar al título de

**CONSTRUCTOR CIVIL**

Profesor Guía

**CARLOS WAHR**

Profesor Correferente

**RODRIGO DELGADILLO**

Agosto de 2024

## Actualización Grados de Desempeño (PG) para zona Centro-Sur de Chile

### RESUMEN

Actualmente en nuestro país la especificación asfáltica de desempeño superior (**SU**perior **PER**forming Asphalt **PAVE**ment, SUPERPAVE) se encuentra en el Manual de Carreteras Volumen N°8, no obstante aún no se encuentra en la norma vigente de asfaltos para pavimentos, es por ello que el Instituto Nacional de Normalización (INN), organismo encargado de la elaboración de normas técnicas nacionales (normalización) y quien está a cargo de la norma vigente NCh2440:1998 Asfaltos para pavimentos - Clasificación y requisitos, se encuentra en un proceso de actualización de la norma donde se incorporará la especificación SUPERPAVE.

El objetivo del presente trabajo es presentar una actualización de los grados de desempeño (PG) para la zona centro-sur de Chile al año 2022, usando como referencia el trabajo “Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico” (Arteaga, 2017). Para ello, se recopiló información de temperaturas máximas y mínimas de las estaciones climatológicas que cumplieran con los criterios SUPERPAVE en el área comprendida entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, recopiladas desde la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la Dirección General de Aguas (DGA). Utilizando los modelos de cálculo de grados de desempeño (PG, Performance Grade) implementados en los programas LTPPBind 2.1 y LTPPBind 3.1 de la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration) de EE.UU., se obtuvo las temperaturas de pavimentos para la posterior selección de los ligantes asfálticos que cumplan tanto la temperatura alta, baja e intermedia.

Como resultado, se actualizó la base de datos de las estaciones climáticas añadiendo 3 nuevas estaciones: Rengo, Tricauco y Los Ángeles a las previamente estudiadas por Arteaga. Se obtuvo los PG de cada estación climática con cada uno de los modelos de cálculo y se les asignó las opciones de ligantes asfálticos tradicionales que cumplieran con las temperaturas requeridas. Los resultados obtenidos muestran que, para una confiabilidad del 50% y 98%, con ambos métodos es posible cubrir la zona centro-sur de Chile con 3 ligantes asfálticos tradicionales: PG 64-22, PG 58-28 y PG 52-34.

**Palabras claves:** *SUperior PERforming Asphalt PAVEment, SUPERPAVE, Pavimentos asfálticos, Strategic Highway Research Program, SHRP, Performance grade, PG, Long-Term Pavement Performance, LTPP, LTPPBind 2.1, LTPPbind 3.1*

## ABSTRACT

Currently, in our country, the SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVement) asphalt specification is included in the Highway Manual Volume No. 8 (Manual de Carreteras Volumen N°8). However, it is not yet included in the current asphalt standards for pavements. This is why the National Institute of Standardization (Instituto Nacional de Normalización, INN), the body responsible for the development of national technical standards (standardization) and which is in charge of the current standard NCh2440:1998 Asphalts for pavements - Classification and requirements, is in the process of updating the standard to incorporate the SUPERPAVE specification.

The objective of the present work is to provide an update of the performance grades (PG) for the central-southern zone of Chile for the year 2022, using as a reference the work “Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico” (Arteaga, 2017). To achieve this, information on maximum and minimum temperatures from weather stations that met the SUPERPAVE criteria in the area between the Metropolitan Region and the Magallanes and Chilean Antarctic Region was collected from the Chilean Meteorological Directorate (Dirección Meteorológica de Chile, DMC) and the General Directorate of Water (Dirección General de Aguas, DGA). Using the performance grade (PG) calculation models implemented in the LTPPBind 2.1 and LTPPBind 3.1 programs of the U.S. Federal Highway Administration, pavement temperatures were obtained for the subsequent selection of asphalt binders that meet the high, low, and intermediate temperature requirements.

As a result, the database of weather stations was updated by adding 3 new stations: Rengo, Tricauco, and Los Ángeles to those previously studied by Arteaga. The PG of each weather station was obtained with each of the calculation models, and traditional asphalt binder options that met the required temperatures were assigned to them. The results show that, for a reliability of 50% and 98%, with both methods it is possible to cover the central-southern zone of Chile with 3 traditional asphalt binders: PG 64-22, PG 58-28, and PG 52-34.

**Keywords:** *SUPERior Performing Asphalt PAVement, SUPERPAVE, Asphalts pavements, Strategic Highway Research Program, SHRP, Performance grade, PG, Long-Term Pavement Performance, LTPP, LTPPBind 2.1, LTPPbind 3.1*

## INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes generales .....	1
1.2	Objetivos del estudio .....	2
1.2.1	Objetivos generales .....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
1.3	Alcances del estudio .....	3
1.4	Metodología de trabajo .....	4
2	MARCO TEÓRICO.....	5
2.1	Ligantes asfálticos .....	5
2.1.1	Propiedades del ligante asfáltico .....	5
2.2	Pavimentos asfálticos .....	5
2.2.1	Deterioros pavimentos asfálticos.....	6
2.3	SUPERPAVE .....	8
2.3.1	Ensayos SUPERPAVE .....	8
2.3.2	Grados de desempeño (PG).....	13
2.3.3	Confiability.....	18
2.4	Cálculo Temperatura del pavimento .....	18
2.4.1	Método LTPPBind 2.1 .....	18
2.4.2	Método Software LTPP 3.1(Basado en Daño) .....	19
2.5	Asignación de grado del ligante .....	21
3	Revisión Bibliográfica .....	22
3.1	Zonificación SUPERPAVE con método SHRP, Mauricio Segovia .....	22
3.2	Zonificación SUPERPAVE para Chile con método LTPPBind 2.1 y LTPPBind 3.1, Arteaga, 2017	25
4	DETERMINACIÓN GRADO PG SEGÚN SOFTWARE LTPPBIND 2.1 .....	30
4.1	Estaciones climáticas a utilizar.....	30
4.2	Calculo temperatura máxima y mínima del pavimento y asignación de grado de desempeño (PG) a estaciones estudiadas.....	36
4.3	Asignación de ligantes tradicionales a cada estación por región. ....	39
4.3.1	Región Metropolitana .....	40
4.3.2	Región del Libertador General Bernardo O’Higgins .....	41
4.3.3	Región del Maule.....	42

4.3.4	Región del Ñuble .....	43
4.3.5	Región del Biobío.....	44
4.3.6	Región de La Araucanía .....	45
4.3.7	Región de Los Ríos .....	46
4.3.8	Región de Los Lagos.....	47
4.3.9	Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo .....	48
4.3.10	Región de Magallanes y la Antártica Chilena .....	49
4.4	Comparación de resultados .....	50
5	DETERMINACIÓN GRADO PG SEGÚN SOFTWARE LTPPBIND 3.1 BASADO EN DAÑO .....	55
5.1	Estaciones climáticas a utilizar.....	57
5.2	Cálculo.....	59
5.3	Asignación de ligantes tradicionales a cada estación por región .....	63
5.3.1	Región Metropolitana .....	63
5.3.2	Región del Libertador General Bernardo O'Higgins .....	64
5.3.3	Región del Maule.....	65
5.3.4	Región del Ñuble .....	66
5.3.5	Región del Biobío.....	67
5.3.6	Región de La Araucanía .....	68
5.3.7	Región de Los Ríos .....	69
5.3.8	Región de Los Lagos.....	70
5.3.9	Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo .....	71
5.3.10	Región de Magallanes y la Antártica Chilena .....	72
5.4	Comparación de resultados .....	73
6	COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES .....	76
7	GLOSARIO .....	78
8	REFERENCIAS.....	79

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2 - 1: Ahuellamiento en pavimentos asfálticos. ....	6
Figura 2 - 2: Agrietamiento térmico en pavimentos asfálticos. ....	7
Figura 2 - 3: Agrietamiento por fatiga en pavimentos asfálticos. ....	7
Figura 2 - 4: Horno de película delgada rotatorio (RTFO). ....	9
Figura 2 - 5: Cámara de envejecimiento a presión (PAV). ....	10
Figura 2 - 6: Reómetro de corte dinámico (DSR). ....	10
Figura 2 - 7: Viscosímetro rotacional (RV). ....	11
Figura 2 - 8: Reómetro de viga a flexión (BBR). ....	12
Figura 2 - 9: Equipo de ensayo de tracción directa (DTT) ....	12
Figura 4 - 1: Mapa georreferenciado de las estaciones climáticas a utilizar en el estudio. ....	33
Figura 4 - 2: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región Metropolitana. ....	40
Figura 4 - 3: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. ....	41
Figura 4 - 4: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Maule. ....	42
Figura 4 - 5: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Ñuble. ....	43
Figura 4 - 6: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Biobío. ....	44
Figura 4 - 7: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de La Araucanía. ....	45
Figura 4 - 8: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Los Ríos. ....	46
Figura 4 - 9: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Los Lagos. ....	47
Figura 4 - 10: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo Lagos. ....	48
Figura 4 - 11: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. ....	49
Figura 5 - 1: Comparación temperatura máxima anual entre estación Melipilla y Lonquimay. ....	55
Figura 5 - 2: Comparación temperaturas máximas diarias entre estación Melipilla y Lonquimay para el año 2011-2012. ....	56

Figura 5 - 3: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región Metropolitana. ....	63
Figura 5 - 4: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. ....	64
Figura 5 - 5: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Maule. ....	65
Figura 5 - 6: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Ñuble. ....	66
Figura 5- 7: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Biobío. ....	67
Figura 5 - 8: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de La Araucanía. ....	68
Figura 5 - 9: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Los Ríos. ....	69
Figura 5 - 10: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Los Lagos. ....	70
Figura 5 - 11: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo Lagos. ....	71
Figura 5 - 12: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. ....	72

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2 - 1: Grados de desempeño PG.....	13
Tabla 2 - 2: Requisitos clasificación SUPERPAVE para diferentes grados de desempeño (PG). (Tabla 8.301.8 A del M.C V.8, 2022).....	15
Tabla 2 - 2: Requisitos clasificación SUPERPAVE para diferentes grados de desempeño (PG). (Tabla 8.301.8 A del M.C V.8, 2022). Continuación. ....	16
Tabla 2 - 2: Requisitos clasificación SUPERPAVE para diferentes grados de desempeño (PG). (Tabla 8.301.8 A del M.C V.8, 2022). Continuación. ....	17
Tabla 2 - 3: Ejemplo asignación de grado de ligante.....	21
Tabla 3 - 1: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según SHRP. (Segovia, 2015).....	23
Tabla 3 - 1: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50 y 98% según SHRP. Continuación. (Segovia, 2015).....	24
Tabla 3 - 2: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPBind 2.1. (Arteaga, 2017).....	26
Tabla 3 - 2: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPBind 2.1. Continuación. (Arteaga, 2017). ....	27
Tabla 3 - 3: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPbind 3.1. (Arteaga, 2017).....	28
Tabla 3 - 3: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPBind 3.1. Continuación. (Arteaga, 2017). ....	29
Tabla 4 - 1: Ejemplo año válido criterio número 2.....	31
Tabla 4 - 2: Ejemplo para año válido criterio número 3.....	31
Tabla 4 - 3: Estaciones climáticas una vez aplicados los criterios 1, 2 y 3.....	32
Tabla 4 - 4: Años válidos por estación para temperatura máxima una vez aplicados los criterios 1,2 y 3.....	34
Tabla 4 - 5: Años válidos por estación para temperatura mínima una vez aplicados los criterios 1,2 y 3.....	35
Tabla 4 - 6: Ejemplo asignación grado de desempeño.....	37
Tabla 4 - 7: Clasificación SUPERPAVE por estación según modelo LTPPBind 2.1. ....	38
Tabla 4 - 8: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región Metropolitana según modelo LTPP 2.1.....	40
Tabla 4 - 9: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Libertador Bernardo O’Higgins según modelo LTPP 2.1. ....	41
Tabla 4 - 10: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Maule según modelo LTPP 2.1. ....	42

Tabla 4 - 11: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Ñuble según modelo LTPP 2.1.....	43
Tabla 4 - 12: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Biobío según modelo LTPP 2.1.....	44
Tabla 4 - 13: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de La Araucanía según modelo LTPP 2.1.....	45
Tabla 4 - 14: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región Los Ríos según modelo LTPP 2.1.....	46
Tabla 4 - 15: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Los Lagos según modelo LTPP 2.1.....	47
Tabla 4 - 16: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo según modelo LTPP 2.1.....	48
Tabla 4 - 17: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena según modelo LTPP 2.1.....	49
Tabla 4 - 18: Comparación grados de desempeño calculados entre la investigación realizada por Arteaga en 2017 y el presente trabajo para LTPP 2.1.....	51
Tabla 5 - 1: Ejemplo asignación de grado de desempeño entre estación Melipilla y Lonquimay según LTPP 2.1.....	56
Tabla 5 - 2: Ejemplo asignación de grado de desempeño entre estación Laguna acúleo y Lonquimay según LTPP 3.1.....	56
Tabla 5 - 3: Años válidos por estación para alta temperatura una vez aplicados los criterios 1,2 y 3. .....	58
Tabla 5 - 4: Grados-Días (DD) para cada estación de estudio.....	61
Tabla 5 - 5: Clasificación SUPERPAVE por estación según modelo LTPPBind 3.1.....	62
Tabla 5 - 6: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región Metropolitana según modelo LTPP 3.1.....	63
Tabla 5 - 7: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins según modelo LTPP 3.1.....	64
Tabla 5 - 8: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Maule según modelo LTPP 3.1.....	65
Tabla 5 - 9: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Ñuble según modelo LTPP 3.1.....	66
Tabla 5 - 10: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Biobío según modelo LTPP 3.1.....	67
Tabla 5 - 11: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de La Araucanía según modelo LTPP 3.1.....	68
Tabla 5 - 12: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Los Ríos según modelo LTPP 3.1.....	69

Tabla 5 - 13: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Los Lagos según modelo LTPP 3.1. ....	70
Tabla 5 - 14: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo según modelo LTPP 3.1. ....	71
Tabla 5 - 15: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Magallanes y la Antártica Chilena según modelo LTPP 3.1.....	72
Tabla 5 - 16: Comparación grados de desempeño calculados entre la investigación realizada por Arteaga en 2017 y el presente trabajo para LTPP 3.1.....	73

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes generales

La especificación asfáltica de desempeño superior (**SU**perior **PER**forming Asphalt **PAVE**ment, SUPERPAVE), se basa en un enfoque de diseño por desempeño, bajo esta especificación y utilizando los modelos de cálculo implementados en el software LTPP (Long-Term Pavement Performance) es que se hará la determinación de los Grados de Desempeño (PG). Los Grados de Desempeño (PG) se pueden definir como el rango de temperaturas a las que un ligante asfáltico presenta un buen desempeño y tendrá las propiedades físicas para cumplir con las condiciones climáticas previstas en la zona. Los grados PG se definen de la manera PG XX-YY, donde XX indica la temperatura máxima a la que el asfalto puede ser utilizado sin deformarse permanentemente, e YY indica la temperatura mínima a la que puede ser utilizado sin agrietarse.

Para la aplicación en nuestro país, existen zonificaciones SUPERPAVE desarrolladas por memoristas del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM (Segovia, 2015) (Arteaga, 2017). Ambas zonificaciones, utilizando diferentes métodos de cálculo, asignan grados PG y un ligante asfáltico tradicional a cada estación climática recolectada desde Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC) hasta el año 2014. Estas zonificaciones SUPERPAVE permiten seleccionar el ligante asfáltico más adecuado para cada estación climática de acuerdo con los grados PG establecidos, con lo que se busca optimizar el desempeño del pavimento asfáltico en cuanto a durabilidad y resistencia a las fallas mencionadas anteriormente.

A la fecha existen datos actualizados de las estaciones climáticas de Chile hasta el año 2022, por lo que se elaborará una actualización de los grados PG con los datos climáticos (temperatura máxima y mínima diaria) recopilados desde la Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC) de estaciones climáticas que cumplan con el requisito mínimo de 20 años de datos.

## **1.2 Objetivos del estudio**

### **1.2.1 Objetivos generales**

- Actualizar los grados de desempeño (PG) de las estaciones climáticas para la zona centro-sur de Chile comprendida entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena y generar un mapa georreferenciado de cada estación climática con sus respectivos ligantes asfálticos tradicionales.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Recopilar y analizar las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones climáticas obtenidas desde la dirección general de aguas (DGA) y dirección meteorológica de Chile (DMC), hasta el año 2022 para la zona centro-sur de Chile comprendida entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.
- Determinar la temperatura máxima y mínima del pavimento, utilizando modelos de cálculo implementados en el software LTPP en cada estación de estudio para una confiabilidad del 50% y 98%.
- Asignar grados de desempeños (PG) y ligantes asfálticos tradicionales a cada una de las estaciones climáticas de estudio.

### 1.3 Alcances del estudio

La recopilación de las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones climáticas utilizadas en el presente trabajo se realizó desde las páginas de la Dirección General de Aguas (<https://dga.mop.gob.cl/>) y la Dirección Meteorológica de Chile (<http://www.meteochile.gob.cl/>).

La metodología y criterios utilizados para determinar las temperaturas máximas y mínimas de cada estación así como cumplir con los requisitos SUPERPAVE de 20 años mínimo de datos fueron obtenidos de estudios anteriores titulados “Zonificación SUPERPAVE para Chile y Estudio Preliminar de la Influencia del Cambio Climático en el Desempeño de Pavimentos en Chile” (Segovia, 2015) y “Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico” (Arteaga, 2017).

Los modelos de cálculo (LTPPBind 2.1 y LTPPBind 3.1) para los grados de performance (PG) son extraídos de investigaciones realizadas por la Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos bajo el programa LTPP (Long-Term Pavement Performance).

## **1.4 Metodología de trabajo**

Se comienza por la revisión bibliográfica sobre el método SUPERPAVE, consideraciones necesarias, requisitos, métodos de cálculo y situación actual en Chile.

Posteriormente se estudian las investigaciones previas sobre zonificación SUPERPAVE, en especial los trabajos realizados por Segovia en 2015 y Arteaga en 2017 para analizar los métodos utilizados, criterios de selección y los datos necesarios para realizar el cálculo del grado de performance (PG).

Luego se recolecta la base climática disponible en la Dirección General de Aguas (DGA) y en la Dirección meteorológica de Chile (DMC) para las estaciones climáticas entre la región Metropolitana y región de Magallanes de Chile. Con estos datos se procede a calcular los grados de performance para cada estación utilizando los modelos de cálculo LTPPBind 2.1 y LTPPBind 3.1.

Finalmente, se le asigna a cada estación los ligantes asfálticos tradicionales que cumplan con las condiciones climáticas de la zona y se crea un mapa georreferenciado por región indicando cada estación.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Ligantes asfálticos**

El ligante asfáltico es un material bituminoso de color marrón oscuro a negro. Es posible encontrarlo en depósitos naturales, formados a partir de la descomposición de organismos marinos, aflorando a la superficie en lagos de asfalto o impregnados en las rocas. Sin embargo, la mayor parte del ligante asfáltico utilizado hoy en día se obtiene a partir del proceso de refinación del petróleo, es por esto por lo que la composición química del ligante asfáltico varía dependiendo del crudo a partir del cual se obtiene (Neira, 2019).

#### **2.1.1 Propiedades del ligante asfáltico**

- 1- PROPIEDADES QUÍMICAS: El asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano puede separarse en dos partes principales asfáltenos y máltenos (Neira, 2019).
- 2- PROPIEDADES FÍSICAS: Las principales propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: Durabilidad, adhesión, susceptibilidad térmica y susceptibilidad a cargas (Neira, 2019).

### **2.2 Pavimentos asfálticos**

Un pavimento asfáltico, también conocido como pavimento flexible, es un tipo de superficie utilizada comúnmente en la construcción de carreteras, calles, áreas de estacionamiento, pistas, zonas de rodaje y plataformas de aeropuertos. Está constituido por una carpeta o capa de rodadura, seguida por las capas inferiores, que corresponden a la base y subbase, construidas sobre la subrasante.

La carpeta asfáltica proporciona soporte a las solicitaciones de tránsito, absorbiendo los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales producidos por las cargas vehiculares. Los esfuerzos que no son absorbidos se transmiten a las capas inferiores (Neira, 2019).

### 2.2.1 Deterioros pavimentos asfálticos

Las principales deficiencias que suelen presentarse en los pavimentos flexibles están relacionadas con el impacto repetido de cargas y los cambios de temperatura, lo que resulta en la formación de grietas en la capa de asfalto y la acumulación de deformaciones permanentes en toda la estructura del pavimento (Bulnes, 2017).

Existen tres fallas principales en los pavimentos asfálticos:

#### 2.2.1.1 Ahuellamiento

El ahuellamiento es una deformación permanente que se puede observar a simple vista y que se produce debido a las cargas repetidas generadas por el paso de las ruedas de los vehículos. Este fenómeno puede ocurrir a baja velocidad o cuando la mezcla asfáltica no tiene suficiente resistencia para soportar los esfuerzos cortantes inducidos en el pavimento (Bulnes, 2017). Es más relevante en edad temprana del pavimento.

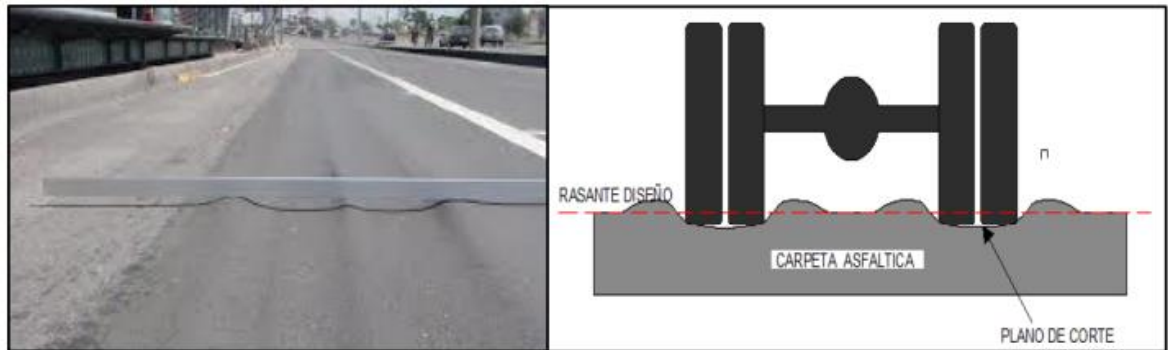


Figura 2- 1: Ahuellamiento en pavimentos asfálticos.

Fuente: "Análisis comparativo de noras SUPERPAVE para ligantes asfálticos", Bulnes, 2017.

#### 2.2.1.2 Agrietamiento térmico

El agrietamiento térmico ocurre cuando hay cambios bruscos de temperatura, especialmente en climas fríos, lo que genera tensiones en la capa de asfalto y resulta en la formación de grietas que atraviesan el pavimento.

Este fenómeno puede deberse a un sobrevejecimiento en el proceso de producción de la mezcla en planta o por mezclas con alto índice de vacíos, lo que facilita la oxidación del ligante y la rigidez de la mezcla (Bulnes, 2017).



Figura 2- 2: Agrietamiento térmico en pavimentos asfálticos.

Fuente: "Análisis comparativo de noras SUPERPAVE para ligantes asfálticos", Bulnes, 2017.

### 2.2.1.3 Agrietamiento por fatiga

Las grietas por fatiga se producen debido a la presencia de uno o varios factores, como cargas pesadas repetidas, alta deflexión del pavimento, drenaje deficiente, temperaturas intermedias y mezclas asfálticas muy rígidas.

Este tipo de deterioro suele ocurrir en etapas avanzadas de la vida útil del pavimento, ya que a medida que el asfalto envejece, se vuelve más rígido y, por lo tanto, más susceptible a este tipo de falla.

Además, la presencia de grietas por fatiga puede estar influenciada por deficiencias en el método de diseño utilizado, así como por métodos y procedimientos inadecuados de construcción y mantenimiento (Bulnes, 2017).



Figura 2- 3: Agrietamiento por fatiga en pavimentos asfálticos.

Fuente: "Análisis comparativo de noras SUPERPAVE para ligantes asfálticos", Bulnes, 2017.

## 2.3 SUPERPAVE

SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) es un método de diseño y evaluación de mezclas asfálticas utilizado en la construcción de carreteras. Fue desarrollado en Estados Unidos en la década de 1980 por el Strategic Highway Research Program (SHRP), con el objetivo de mejorar la durabilidad y el rendimiento de los pavimentos asfálticos (Asphalt Institute, 2003).

El método SUPERPAVE se basa en el análisis de las propiedades de los materiales asfálticos y los agregados utilizados en la mezcla, así como en la evaluación del tráfico y el clima esperados en la carretera. SUPERPAVE es un sistema que incluye especificaciones para los materiales (asfaltos y agregados), como así también nuevos ensayos de laboratorio y un renovado método de diseño para las mezclas asfálticas en caliente. Para el caso de los asfaltos, SUPERPAVE establece nuevos ensayos orientados a medir las propiedades reológicas de éstos y de relacionarlas con el desempeño que tienen frente a los tres tipos de fallas más clásicas que ocurren en los pavimentos durante su vida útil (ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y agrietamiento térmico) (Lazo, 2012).

### 2.3.1 Ensayos SUPERPAVE

El método SUPERPAVE utiliza una serie de ensayos y pruebas para caracterizar y evaluar las propiedades de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas. Un aspecto importante es que con los ensayos se simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto. La primera etapa: transporte, almacenamiento y manejo. La segunda etapa representa el asfalto durante la producción y construcción de la mezcla. Y, por último, la tercera etapa de envejecimiento a “largo plazo” ocurre en el ligante asfáltico después de varios años de servicio (Asphalt Institute, 2003).

Los ensayos tienen como objetivos:

1. Medir las propiedades físicas de los ligantes asfálticos que pueden ser relacionadas con los parámetros de desempeño en terreno para tres fallas críticas: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.

Los dispositivos utilizados para medir las propiedades de los ligantes asfálticos son los siguientes:

- Reómetro de corte dinámico (DSR: Dynamic Shear Rheometer),
  - Reómetro de viga a flexión (BBR: Bending Beam Rheometer),
  - Viscosímetro rotacional (RV: Rotational Viscometer),
  - Ensayo de tracción directa (DTT: Direct Tension Test).
2. Caracterizar las propiedades físicas de los ligantes asfálticos según las temperaturas y efectos del envejecimiento a los que estarán sometidos durante el proceso de construcción y su vida útil.

Para lograr dichos objetivos se emplean dos equipos para el proceso de envejecimiento del ligante.

- Horno de película delgada rotatorio (RTFO: Rolling Thin Film Oven), simula envejecimiento a corto plazo.
- Cámara de envejecimiento a Presión (PAV: Pressure Aging Vessel), simula envejecimiento a largo plazo.

### **Horno de película delgada rotatorio (RTFO)**

El procedimiento del horno de película delgada rotatorio (Rotating Thin Film Oven, RTFO) tiene dos propósitos. El primero es proporcionar un aglomerante asfáltico envejecido que se puede utilizar para realizar pruebas adicionales de las propiedades físicas. El segundo es determinar la cantidad másica de volátiles perdidos del asfalto, esta pérdida de masa volátil es una indicación del envejecimiento que puede ocurrir en el asfalto durante las operaciones de mezcla y construcción.

*El método se encuentra especificado en Manual de carreteras Vol8 cap 8.302.33.*



Figura 2- 4: Horno de película delgada rotatorio (RTFO).

Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras publicas, (CEDEX, s.f.).

### **Cámara de envejecimiento a presión (PAV)**

El método Superpave de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV, por sus siglas en inglés) es una técnica que mediante aire presurizado y temperaturas elevadas se utiliza para simular el envejecimiento que experimenta el asfalto en condiciones reales de campo a lo largo del tiempo. Como muestra se utiliza el residuo obtenido en el ensayo RTFO.

*El método se encuentra especificado en Manual de carreteras Vol8 cap 8.302.23.*



Figura 2- 5: Cámara de envejecimiento a presión (PAV).

Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras publicas, (CEDEX, s.f.).

### Reómetro de corte dinámico (DSR)

El Reómetro de Corte Dinámico se utiliza para medir las propiedades viscoelásticas de los ligantes asfálticos. Por medio de este ensayo, se mide el Módulo Complejo de Corte ( $G^*$ ), el cual es un indicador de la rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación bajo carga y el Ángulo de Fase ( $\delta$ ), que evalúa la razón entre la respuesta elástica y la viscosa durante el proceso de corte.

La temperatura utilizada en el ensayo se relaciona con la temperatura a la que estará sometido el pavimento de acuerdo al área geográfica en que se instalará.

*El método se encuentra especificado en Manual de carreteras Vol8 cap 8.302.22*



Figura 2- 6: Reómetro de corte dinámico (DSR).

Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras publicas, (CEDEX, s.f.).

## Viscosímetro rotacional (RV)

El viscosímetro rotacional permite medir las propiedades de consistencia relacionadas al bombeo y trabajabilidad. Consiste en someter una muestra de asfalto a un esfuerzo de corte controlado mientras se mide la resistencia al flujo del material.

En el ensayo, se coloca una muestra de asfalto en el viscosímetro rotacional, que consta de un rotor sumergido en el asfalto. El rotor gira a una velocidad constante, aplicando un esfuerzo de corte al asfalto. La viscosidad se determina midiendo el par de torsión necesario para mantener la rotación del rotor. Cuanto mayor sea el par de torsión, mayor será la viscosidad del asfalto.

Este ensayo permite además obtener el gráfico de temperatura vs viscosidad para la mezcla asfáltica estudiada, para así estimar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en caliente.

*El método se encuentra especificado en Manual de carreteras Vol8 cap 8.302.24.*



Figura 2- 7: Viscosímetro rotacional (RV).

Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras publicas, (CEDEX, s.f.).

## Reómetro de viga a flexión (BBR)

Este método determina la rigidez en fluencia por flexión a baja temperatura mediante una carga constante de ligantes asfálticos, para ello se utiliza un reómetro de viga de flexión. Es aplicable a materiales con valores de rigidez en flexión entre 20 [MPa] y 1[GPa] (valores de deformabilidad en flexión de 50 [ $\text{nPa}^{-1}$ ] a 1 [ $\text{nPa}^{-1}$ ]) y puede ser usado con material original o envejecido mediante RTFO.

*El método se encuentra especificado en Manual de carreteras Vol8 cap 8.302.25.*

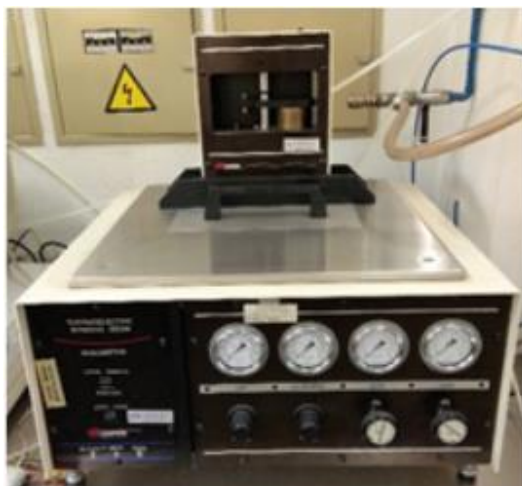


Figura 2- 8:Reómetro de viga a flexión (BBR).

Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras publicas, (CEDEX, s.f.).

### **Ensayo de tracción directa (DTT)**

Se utiliza para caracterizar los ligantes asfálticos a bajas temperaturas. En el ensayo de tracción directa, una muestra de asfalto en forma de “hueso de perro” es estirada a una velocidad constante, muy pequeña, hasta la falla. La deformación en la falla es usada para calcular la deformación específica a la falla, que es un indicador del comportamiento, frágil o dúctil, a baja temperatura.

Se utiliza residuo proveniente de PAV, el cual es calentado y vertido en el molde evitando la incorporación de burbujas de aire o vacíos. Se deja enfriar a temperatura ambiente para luego ser enrasado y desmoldado

*El método se encuentra especificado en Manual de carreteras Vol8 cap 8.302.26.*



Figura 2- 9: Equipo de ensayo de tracción directa (DTT)

Fuente: “Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico”, (Arteaga, 2017)

### 2.3.2 Grados de desempeño (PG)

Una parte importante del método SUPERPAVE son los Grados de Performance (PG, por sus siglas en inglés), son una clasificación utilizada para especificar y seleccionar los asfaltos según sus propiedades de resistencia a una cierta temperatura. Estos grados se basan en un sistema numérico que representa las temperaturas mínimas y máximas que un asfalto puede soportar sin sufrir fallas o daños prematuros.

La clasificación PG consta de dos números.

El primer número (XX) representa la temperatura máxima a la que el asfalto debe ser capaz de soportar sin volverse demasiado blando, conocida como Temperatura de Ablandamiento por Alta Temperatura (High-Temperature Softening, HT). El segundo número (YY) indica la temperatura mínima a la que el asfalto debe ser capaz de resistir sin agrietarse, conocida como Temperatura de Fractura por Baja Temperatura (Low-Temperature Fracture, LT).

La clasificación de los Cementos Asfálticos por PG establecida por SUPERPAVE es de la siguiente forma:

$$PG = XX - YY$$

Donde

*PG = Nomenclatura utilizada para la clasificación por Grado de Desempeño*

*XX = Temperatura máxima de diseño del pavimento (°C)*

*YY = Temperatura mínima de diseño del pavimento (°C)*

Los grados tanto de máxima como mínima temperatura se distancian a 6°C.

Tabla 2 - 1: Grados de desempeño PG.

XX	YY
46	34, 40, 46
52	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
58	16, 22, 28, 34, 40
64	10, 16, 22, 28, 34, 40
70	10, 16, 22, 28, 34, 40
76	10, 16, 22, 28, 34
82	10, 16, 22, 28, 34

Por ejemplo, consideremos un asfalto clasificado como PG 64-22:

- El primer número, 64, indica que el asfalto debe ser capaz de resistir temperaturas máximas de 64°C o inferiores sin volverse demasiado blando y deformarse bajo estas condiciones de temperatura.
- El segundo número, -22, indica que el asfalto debe ser capaz de soportar temperaturas mínimas de -22°C o superiores sin agrietarse debido a la contracción del material en condiciones de frío extremo.

Además de la máxima temperatura del pavimento y la mínima temperatura del pavimento existe una temperatura intermedia definida como:

$$T_{intermedia} = \frac{XX + YY}{2} + 4$$

*(Formula 2- 1)*

La temperatura intermedia resguarda al pavimento ante la falla de agrietamiento por fatiga, tomado el ejemplo anterior de un asfalto PG 64-22, la temperatura intermedia será de 25°C, esto quiere decir que tendrá buen comportamiento para zonas donde la temperatura intermedia del pavimento sea mayor o igual a 25°C.

Los ligantes asfálticos deben cumplir con los siguientes requisitos según su grado de desempeño SUPERPAVE:

Tabla 2 - 2: Requisitos clasificación SUPERPAVE para diferentes grados de desempeño (PG). (Tabla 8.301.8 A del M.C.V.8, 2022).

GRADO DE DESEMPEÑO	PG 46			PG 52						PG 58					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40
Temperatura máxima de diseño, media móvil (7 días) de temp. máx. de pavimento, °C <sup>(a)</sup>	< 46			< 52						< 58					
Temperatura mínima del pavimento de diseño, °C	> 34	> 40	> 46	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40	> 46	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40
<b>LIGANTE ASFALTICO ORIGINAL</b>															
Punto de inflamación, 8.302.9, temperatura mínima, °C	230														
Viscosidad, 8.302.24: máx. 3 Pa.s, temperatura ensaye, °C <sup>(b)</sup>	135														
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*seno <sup>(f)</sup> mín. 1,00 kPa, temp. ensaye, °C <sup>(c)</sup>	46			52						58					
<b>HORNO ROTATORIO DE PELICULA DELGADA RTFOT (8.302.33)</b>															
Pérdida de masa, porcentaje máx.	1,00														
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*seno <sup>(f)</sup> , mín. 2,2 kPa, temp. ensaye, °C	46			52						58					
<b>CAMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESION PAV (8.302.23)</b>															
Temp. de envejecimiento, °C <sup>(d)</sup>	90			90						100					
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*seno <sup>(f)</sup> , máx. 5000 kPa, temp. ensaye, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Rigidez en creep, 8.302.25, a 60 s: S máx 300 MPa, valor-m mín 0,300 temp. ensaye, °C <sup>(e)</sup>	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30
Tracción directa, 8.302.26, 1 mm/min: deformación de rotura, mín. 1,0% temperatura ensaye, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30
<p>(a) Temperaturas del pavimento son estimadas a partir de las temperaturas del aire usando un algoritmo incluido en SUPERPAVE, o serán provistas por la agencia específica.</p> <p>(b) El método referido será el 8.302.24 (usando un vástago No. 21 a 20 rpm), sin embargo se pueden usar métodos alternativos para ensayos de rutina y control de calidad. Este requerimiento puede ser omitido si así lo dispone la Inspección Fiscal, siempre y cuando se garantice que el ligante asfáltico puede ser adecuadamente bombeado y mezclado a temperaturas que satisfagan todos los estándares de seguridad y calidad aplicables.</p> <p>(c) Para el control de calidad de producción de cemento asfáltico no modificado, la medida de la viscosidad puede realizarse por medición de G*seno en el reómetro de corte dinámico, a temperaturas de ensaye donde el asfalto se comporta como fluido Newtoniano. Cualquier estándar adecuado de medida de viscosidad puede ser usado, incluyendo ensayos de viscosidad capilar o viscosímetros rotacionales.</p> <p>(d) La temperatura por usar en la cámara PAV está basada en la simulación de las condiciones climáticas y puede ser 90, 100 o 110°C. La temperatura para los grados asfálticos más altos, a partir de PG 64, es de 100°C, excepto en climas desérticos, donde es 110°C.</p> <p>(e) Si la rigidez en creep (S) es menor a 300 MPa, el ensaye de tracción directa no se requiere. Si está entre 300 y 600 MPa, se pueden usar los requerimientos de deformación de rotura en el ensaye de tracción directa en vez de los requerimientos de rigidez en creep. El valor-m, en ambos casos, debe ser mayor que 0,300.</p> <p>(f) G*seno = rigidez a altas temperaturas, G*seno = rigidez a bajas temperaturas.</p>															

Tabla 2 - 2: Requisitos clasificación SUPERPAVE para diferentes grados de desempeño (PG). (Tabla 8.301.8 A del M.C.V.8, 2022). Continuación.

GRADO DE DESEMPEÑO	PG 64						PG 70					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura máxima para el diseño, media móvil (7 días) de temp. máx. depavimento, °C <sup>(a)</sup>	< 64						< 70					
Temperatura mínima del pavimento para el diseño, °C	>- 10	>- 16	>- 22	>- 28	>- 34	>- 40	>- 10	>- 16	>- 22	>- 28	>- 34	>- 40
<b>LIGANTE ASFALTICO ORIGINAL</b>												
Punto de inflamación, 8.302.9, temperatura mínima, °C	230											
Viscosidad, 8.302.24: máx. 3 Pa.s, temperatura ensaye, °C <sup>(b)</sup>	135											
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*/senδ, mín. 1,00 kPa, temp. ensaye, °C <sup>(c)</sup>	64						70					
<b>HORNO ROTATORIO DE PELICULA DELGADA RTFOT (8.302.33)</b>												
Pérdida de masa, porcentaje máx.	1,00											
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*/senδ, mín. 2,2 kPa, temp. ensaye, °C	64						70					
<b>CAMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESION PAV (8.302.23)</b>												
Temp. de envejecimiento, °C <sup>(d)</sup>	100						100 (110)					
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*/senδ, máx. 5000 kPa, temp. ensaye, °C <sup>(e)</sup>	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Rigidez en creep, 8.302.25, a 60 s: S máx 300 MPa, valor-m mín 0,300 temp. ensaye, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tracción directa, 8.302.26, 1 mm/min: Deformación de rotura, mín. 1,0 % Temperatura ensaye, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Tabla 2 - 2: Requisitos clasificación SUPERPAVE para diferentes grados de desempeño (PG). (Tabla 8.301.8 A del M.C.V.8, 2022). Continuación.

GRADO DE DESEMPEÑO	PG 76					PG 82				
	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Temperatura máxima para el diseño, media móvil(7 días) de temp.máx. de pavimento, °C <sup>(a)</sup>	< 76					< 82				
Temperatura mínima del pavimento para el diseño, °C	>- 10	>- 16	>- 22	>- 28	>- 34	>- 10	>- 16	>- 22	>- 28	>- 34
<b>LIGANTE ASFALTICO ORIGINAL</b>										
Punto de inflamación, 8.302.9, temperatura mínima, °C	230									
Viscosidad, 8.302.24: máx. 3 Pa.s, temperatura ensaye, °C <sup>(b)</sup>	135									
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*/senδ, mín. 1,00 kPa, temp. ensaye, °C <sup>(c)</sup>	76					82				
<b>HORNO ROTATORIO DE PELICULA DELGADA RTFOT (8.302.33)</b>										
Pérdida de masa, porcentaje máx.	1,00									
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*/senδ, mín. 2,2 kPa, temp. ensaye, °C	76					82				
<b>CAMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESION PAV (8.302.23)</b>										
Temp. de envejecimiento, °C <sup>(d)</sup>	100 (110)					100 (110)				
Corte dinámico, 8.302.22, 10 rad/s: G*/senδ, máx. 5000 kPa, temp. ensaye, °C	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Rigidez en creep , 8.302.25, a 60 s: S máx 300 MPa, valor-m mín 0,300 Temp. ensaye, °C (e)	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tracción directa, 8.302.26, 1 mm/min: Deformación de rotura, mín. 1,0 % Temperatura ensaye, °C	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

### 2.3.3 Confiabilidad

Para el cálculo del grado de desempeño requerido para una zona, se debe tomar en cuenta la confiabilidad que se le quiere asignar. Esta confiabilidad puede tomar cualquier valor de 0% a 100%, los más usuales y trabajados en el presente estudio son 50% y 98% y se define como la probabilidad de no exceder la temperatura de diseño.

Cabe señalar que en la metodología SUPERPAVE, se asume que las temperaturas extremas, se distribuyen acorde a la distribución normal de probabilidades. Cada método aplica, de forma diferente la confiabilidad. El modelo LTPP 2.1 utiliza la variabilidad del aire y del modelo, para asignar la confiabilidad. El modelo basado en daño LTPP 3.1 utiliza un coeficiente de variación anual dependiendo de la zona geográfica.

## 2.4 Cálculo Temperatura del pavimento

### 2.4.1 Método LTPPBind 2.1

Método desarrollado por el “Programa de desempeño de pavimentos a largo plazo” (Long-Term Pavement Performance Program, LTPP) buscando mejorar el cálculo de las temperaturas del pavimento propuesto en un inicio por SHRP.

La investigación realizada por LTPP buscó mejorar los modelos previos y ya que presentaban falencias entregando resultados muy conservadores. Los grados de desempeño a baja temperatura determinados utilizando los métodos SHRP y LTPP a diferentes niveles de confiabilidad fueron significativamente diferentes en especial en grados de desempeño de -34 y menores. Mientras que los grados de alta temperatura determinados por el modelo LTPP generalmente coincidían con los determinados usando el modelo SHRP. (Mohseni, 1998).

Para el modelo de alta y baja temperatura se considera de mejor manera la confiabilidad, teniendo incorporado en las fórmulas la variabilidad del modelo y de la temperatura del aire.

Las fórmulas a continuación están presentes en el software LTPPBind 2.1.

#### Alta temperatura:

$$T_{H,pav} = 54,32 + 0,78 * T_{aire} - 0,0025 * Lat^2 - 15,14 * Log_{10}(H + 25) + Z * (9 + 0,61 * (\sigma_{AIRE})^2)^{0.5}$$

(Formula 2- 2)

Donde:

$T_{H,pav}$ : Máxima temperatura del pavimento a una profundidad de  $H$  [mm]                      [°C]

$T_{Aire}$ : Promedio móvil máximo de la temperatura del aire de 7 días consecutivos en [°C]

*Lat: Latitud geográfica de la estación climática en estudio en grados*

*H: Profundidad a la superficie en [mm]*

*$\sigma_{AIRE}$ : Desviación estándar de la temperatura media del aire de 7 días consecutivos [°C]*

*Z: Variable estandar de la distribución normal*

**Baja temperatura:**

$$T_{L,pav} = -1,56 + 0,72 * T_{aire} - 0,0004 * Lat^2 + 6,26 * Log_{10}(H + 25) - Z * (4,4 + 0,52 * (\sigma_{AIRE})^2)^{0,5}$$

*(Formula 2- 3)*

*Donde:*

*$T_{L,pav}$ : Temperatura mínima del pavimento en la superficie en [°C]*

*$T_{Aire}$ : Temperatura mínima del aire en [°C]*

*Lat: Latitud geográfica de la estación climática en estudio en grados*

*H: Profundidad a la superficie en [mm]*

*$\sigma_{AIRE}$ : Desviación estándar de la temperatura mínimas del aire en [°C]*

*Z: Variable estándar de la distribución normal*

#### **2.4.2 Método Software LTPP 3.1(Basado en Daño)**

En el año 2005 fue presentado en la Association of Asphalt Paving Technologists 2005 (AAPT 2005) una nueva metodología para el cálculo del grado de alta temperatura, desarrollada por Alaeddin Mohseni, Samuel Carpenter y Jhon D'Angelo. Esta nueva metodología busca corregir un problema de los modelos anteriores en cuanto al cálculo de la alta temperatura de los pavimentos, por ejemplo, en los estados de Oregón y Florida, se tenía una temperatura de diseño similar según el modelo SHRP, pero en Florida, las temperaturas altas se extienden por más tiempo que en Oregón, por lo cual los pavimentos asfálticos en Florida eran más susceptibles al ahuellamiento. (mayor tiempo expuesto a alta T° = mayor ahuellamiento) (Arteaga, 2017).

La información meteorológica utilizada por LTPP 3.1 considera las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire. El modelo de baja temperatura fue desarrollado mediante análisis de regresión del Programa de Monitoreo Estacional (SMP) de LTPP, el cual relaciona la temperatura del aire con la temperatura del pavimento a través de la latitud y la profundidad (Mohseni, 1998).

El modelo de alta temperatura utiliza una combinación de un análisis mecanicista del ahuellamiento para estimar la "temperatura base" y una ecuación para ajustar esta temperatura según la profundidad del pavimento (Mohseni, Carpenter, & D'Angelo, 2005).

$$PG_{H,d} = 48,2 + 14DD - 0,96 * DD^2 - 2RD$$

(Formula 2- 4)

Donde:

$PG_{H,d}$ : Grado de desempeño basado en daño [°C]

$DD$ : Promedio anual Grados – Días del aire sobre 10°C [1000°C – Días]

$RD$ : Profundidad del ahuellamiento permitido (5 – 13 mm)

El parámetro  $DD$ : grados-días, es la suma de las altas temperaturas diarias del aire durante un año cuando la temperatura es superior a 10°C, promediada durante un período de observación.

$PG_{H,d}$  es una estimación base de la temperatura alta del pavimento con una confiabilidad del 50%, para velocidad de circulación rápida y tráfico moderado.  $PG_{H,d}$  se ajusta para mayor confiabilidad considerando un coeficiente de variación anual. El coeficiente de variación anual de alta temperatura del pavimento se estima como:

$$CV_{PG} = 0,000034 * (Lat - 20)^2 * RD^2$$

(Formula 2- 1)

Donde:

$CV_{PG}$ : Coeficiente de variación anual del PG [%]

$Lat$ : Latitud geográfica de la estación en estudio en grados

$RD$ : Profundidad del ahuellamiento permitido (5 – 13 mm) [mm]

El coeficiente de variación anual del PG ( $CV_{PG}$ ) se utiliza para modificar la temperatura base ( $PG_{H,d}$ ) utilizando el nivel de confiabilidad seleccionado.

$$PG_{H,conf} = PG_{H,d} + (Z) * (PG_{H,d}) * \frac{CV_{PG}}{100}$$

(Formula 2- 6)

Donde:

$PG_{H,conf}$ : Grado de alta temperatura para cierta confiabilidad [°C]

$CV_{PG}$ : Coeficiente de variación anual del PG [%]

$Z$ : Variable estándar de la distribución normal

$PG_{H,d}$ : Grado de alta temperatura [°C]

Para el cálculo del grado de desempeño a bajas temperaturas se utilizan las fórmulas descritas en LTPPBind 2.1

## 2.5 Asignación de grado del ligante

La elección de un grado PG implica un nivel de confiabilidad mayor debido al “redondeo hacia arriba”. Por ejemplo, para la estación Chile Chico, la temperatura del pavimento calculada utilizando el método LTPPBind 3.1 para una confiabilidad del 50% y 98% es la siguiente:

Tabla 2 - 3: Ejemplo asignación de grado de ligante.

Temperatura del pavimento			
LTPPBind 3.1 50%		LTPPBind 3.1 98%	
T <sup>°</sup> Máx	T <sup>°</sup> Mín	T <sup>°</sup> Máx	T <sup>°</sup> Mín
45,45	-11,43	48,96	-18,10

Es decir, para una confiabilidad de al menos 50%, el grado de alta temperatura, para esta localidad debe ser PG 46, esto implica un más alto nivel de confiabilidad, alrededor del 63%, debido al “redondeado hacia arriba” al próximo grado estándar.

El grado de baja temperatura debe ser un PG -16. Al igual que con el grado de alta temperatura, el redondeo a un grado estándar de baja temperatura resulta en casi un 92% de confiabilidad. Para el 98% de confiabilidad, el grado de alta temperatura necesario es PG 52; y el grado de baja temperatura es PG -22, ambas al haber sido redondeadas a un grado estándar resultan en una confiabilidad de 99,9%.

### 3 Revisión Bibliográfica

#### 3.1 Zonificación SUPERPAVE con método SHRP, Mauricio Segovia

Segovia (Segovia, 2015), realiza una zonificación SUPERPAVE de Chile utilizando las fórmulas SHRP. Para su trabajo recopila información desde la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y aplica una serie de criterios para definir un año como válido para el estudio, esto debido a lo a veces incompleta que se encuentra la información climática en Chile. Aplicado los criterios obtiene un total de 94 estaciones climáticas a lo largo de Chile que cumplen en su gran mayoría con 20 años mínimo de datos. Utilizando el método SHRP realiza los cálculos del grado de desempeño de cada estación y les asigna un ligante asfáltico logrando abarcar la totalidad del territorio con 4 ligantes, 3 tradicionales y 1 modificado (PG equivalente, en la tabla 3- 1).

Cabe mencionar que la selección del ligante asfáltico no es único para cada zona, por lo que estos fueron seleccionados de manera de mantener una continuidad geográfica de los ligantes recomendados y minimizar la cantidad de ligantes requeridos para cubrir la totalidad del territorio del país.

La tabla 3- 1, muestra los resultados obtenidos, tanto el PG teórico por estación como el ligante asfáltico asignado para una confiabilidad del 50% y del 98%. La columna "Temperatura promedio" hace referencia a la temperatura intermedia del grado de desempeño PG, calculada utilizando la fórmula 2-1 presentada anteriormente.

Tabla 3 - 1: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según SHRP. (Segovia, 2015)

Numero	Estaciones				PG				
	Nombre	50%	Temperatura promedio	Equivalenda	98%	Temperatura promedio	Equivalenda		
1	CHACALLUTA, ARICA AEROPUERTO	58	-10	28	58	-10	28	58	-28
2	DIEGO ARACENA IQUIQUE AP	58	-10	28	58	-10	28	58	-28
3	ELLOA, CALAMA AD	52	-16	22	58	-22	22	58	-28
4	CERRO MDRENO ANTOFAGASTA AP	52	-10	25	58	-28	28	58	-28
5	LA FLORIDA, LA SERENA AD	52	-10	25	52	-10	25	64	-10
6	SANTO DOMINGO, AD	52	-10	25	64	-22	25	64	-22
7	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	58	-10	28	64	-22	31	64	-22
8	EULOGIO SANCHEZ, TOLALABA AD	58	-10	28	64	-22	31	64	-22
9	PUDAHUEL, SANTIAGO	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
10	GENERAL FREIRE, CURICO AD	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
11	BERNARDO O'HIGGINS, CHILLAN AD	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
12	CARRILSUR, CONCEPCION	52	-10	25	64	-22	25	64	-22
13	MANQUEHUE, TEMUCO AD	58	-10	28	64	-22	25	64	-22
14	PICHAY, VAIDIVIA AD	52	-10	25	64	-22	28	64	-22
15	CAÑALBAO, OSORNO AD	52	-10	25	58	-28	22	58	-28
16	EL TERPUAL PUERTO MONTT, AP	52	-10	25	58	-28	25	58	-28
17	CHAITEN AD	46	-10	22	58	-28	25	58	-28
18	* FUTALEUFU AD	52	-16	22	58	-28	22	58	-28
19	ALTO PALENA AD	52	-16	22	58	-28	22	58	-28
20	PUERTO AYSEN AD	52	-10	25	58	-28	25	58	-28
21	TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	52	-22	19	58	-28	19	58	-28
22	**BALMACEDA AD	52	-28	16	52	-34	13	52	-34
23	OHIE CHICO AD	52	-16	22	58	-28	22	58	-28
24	LORD COCHRAN AD	52	-22	19	58	-28	19	58	-28
25	CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS AP	46	-22	16	52	-34	13	52	-34
26	GUARDIA MARINA ZANARTU, PUERTO WILLIAMS AD	46	-16	19	52	-34	16	52	-34
27	el bultre aeródromo	58	-10	28	58	-28	28	58	-28
28	AZAPATA	58	-10	28	58	-28	28	58	-28
29	CHUNGARA AJATA	46	-16	19	52	-34	16	52	-34
30	CODPA	52	-10	25	58	-28	28	58	-28
31	COYACAGUA	52	-28	16	52	-34	13	52	-34
32	**LAGUNILLAS (PAMPA URINA)	46	-28	13	52	-34	10	52	-34
33	CASPANA	52	-10	25	52	-34	25	58	-28
34	CHIU-CHIU	52	-16	22	58	-28	22	58	-28
35	CONCHI EMBALSE	52	-22	19	58	-28	19	58	-28
36	UNZOR	46	-22	16	52	-34	13	52	-34
37	PARSHALIN 2	52	-16	22	58	-28	19	58	-28
38	PEINE	58	-10	28	58	-28	31	64	-22
39	CANTO DE AGUA	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
40	LA COMPAÑIA (VALLENAR)	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
41	LAUTARO EMBALSE	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
42	LOS LOROS	58	-10	28	64	-22	31	64	-22
43	SAN FELIX	64	-10	31	64	-22	28	64	-22
44	SANTA JUANA	58	-10	28	64	-22	28	64	-22
45	CAREN	58	-10	28	64	-22	31	64	-22
46	COGOTI EMBALSE	58	-10	28	64	-22	31	64	-22
47	EL TRAPICHE	58	-10	28	64	-22	28	64	-22

Tabla 3 - 1: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50 y 98% según SHRP. Continuación.  
(Segovia, 2015)

Número	Nombre	PG				Equivalente		
		50%	Temperatura promedio	98%	Temperatura promedio	50%	98%	
46	HURTADO	58	-10	28	64	-22	64	-22
49	ILLAPELGA	58	-10	28	64	-22	58	-28
50	LAGUNA EMBALSE	58	-22	22	58	-28	58	-28
51	LA ORTIGA	58	-10	28	58	-28	58	-28
52	LA TRANQUILA	58	-10	28	64	-22	58	-28
53	LAS RAMADAS	58	-10	28	58	-28	64	-22
54	LOS CONDORES	58	-10	28	64	-22	64	-22
55	PALOMA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	58	-28
56	RECOLETA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	64	-22
57	RIVADAWA	58	-16	25	64	-22	64	-22
58	AUCAHUE	58	-10	28	64	-22	58	-28
59	LAGO PEÑUELAS	52	-10	25	64	-22	58	-28
60	LLULLUJ EMBALSE	58	-10	28	64	-22	64	-22
61	LOS ARMONOS	58	-10	28	64	-22	58	-28
62	QUELLUTA	58	-10	28	64	-22	64	-22
63	VILCUYA	58	-10	28	64	-22	64	-22
64	CERRO GALAN	58	-10	28	64	-22	64	-22
65	EL YESO EMBALSE	52	-22	29	58	-28	52	-34
66	LAGUNA AGUILA	58	-10	28	64	-22	64	-22
67	LOS PANQUILES	58	-10	28	64	-22	64	-22
68	MELUPILLA	58	-10	28	64	-22	64	-22
69	PIRQUE	58	-16	25	58	-28	58	-28
70	CONVENIO VIEJO	58	-10	28	64	-22	64	-22
71	ANCOA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	58	-28
72	COLORADO	58	-16	25	58	-28	58	-28
73	DI GUA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	64	-22
74	PARRAL	58	-10	28	64	-22	64	-22
75	PENCAHUE	64	-10	31	64	-22	64	-22
76	POTRERO GRANDE	58	-10	28	58	-28	58	-28
77	TALCA UC	58	-10	28	64	-22	64	-22
78	CARACOL	58	-10	28	64	-22	64	-22
79	COHUECO EMBALSE	64	-10	31	64	-22	64	-22
80	DIGULLIN	58	-10	28	64	-22	58	-28
81	QUILACO	58	-10	28	64	-22	64	-22
82	**LUCUMA	64	-34	39	64	-34	64	-34
83	**LONQUIMAY	58	-28	39	64	-34	64	-34
84	MAJACAHUELLO	52	-22	39	58	-28	58	-28
85	PUCON	58	-10	28	64	-22	64	-22
86	PUERTO SAAVEDRA	52	-10	25	64	-22	58	-28
87	TEODORO SCHMID	52	-10	25	64	-22	58	-28
88	TRAIGUE	58	-10	28	64	-22	64	-22
89	ADOLFO MATTHE	52	-10	25	58	-28	58	-28
90	COPAHUE (ESCUELA AGRICOLA)	52	-22	39	58	-28	58	-28
91	PUERTO PUPUHUAPI	52	-10	25	58	-28	58	-28
92	VILLA MANIHUALS	52	-16	22	58	-28	58	-28
93	PUNTA ARENAS	46	-16	39	52	-34	46	-34
94	TORRES DEL PAINE	46	-22	36	52	-34	52	-34

### **3.2 Zonificación SUPERPAVE para Chile con método LTPPBind 2.1 y LTPPBind 3.1, Arteaga, 2017**

Arteaga (Arteaga, 2017), realiza una zonificación SUPERPAVE de Chile, utilizando los métodos LTPPBind 2.1 y LTPPBind 3.1 disponibles en el software LTPP. Determina las temperatura de pavimento para luego seleccionar un ligante asfáltico en cada estación. Para el estudio utiliza las estaciones, información y criterios utilizados para la realización del estudio “Zonificación SUPERPAVE con método SHRP” (Segovia, M., 2015).

Los ligantes asfáltico seleccionados por Arteaga no son únicos para cada zona, sino que fueron elegidos de manera que se mantenga una continuidad geográfica de los ligantes recomendados y se minimice la cantidad de ligantes requeridos para cubrir la totalidad del territorio del país.

La tabla 3- 2 muestra los resultados obtenidos, tanto el PG teórico por estación como el ligante asfáltico tradicional (ligante asfáltico sin modificar) asignado para una confiabilidad del 50% y del 98% con el método LTPPBind 2.1.

La tabla 3- 3 muestra los resultados obtenidos, tanto el PG teórico por estación como el ligante asfáltico tradicional (ligante asfáltico sin modificar) asignado para una confiabilidad del 50% y del 98% con el método LTPPBind 3.1.

Tabla 3 - 2: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPBind 2.1. (Arteaga, 2017).

Número	Nombre	PG LTPP 2.1												
		50%						98%						
		Grado de desempeño PG			Ligante seleccionado			Grado de desempeño PG			Ligante seleccionado			
Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia			
1	CHACALLUTA, ARICA AEROPUERTO	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
2	Diego Aracena Iquique AP	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
3	EL LOA, CALAMA AD	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
4	CERRO MORENO ANTOFAGASTA, AP	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
5	LA FLORIDA, LA SERENA AD	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
6	SANTO DOMINGO, AD	46	-10	22	58	-28	19	28	58	-10	28	58	-28	19
7	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
8	EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
9	PUDAHUEL SANTIAGO	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
10	GENERAL FREIRE, CURICO AD	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
11	BERNARDO O'HIGGINS, CHILIAN AD	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
12	CARRIEL SUR, CONCEPCION	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
13	MANQUEHUE, TEMUCO AD	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
14	PICHUY, VALDIVIA AD	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-16	25	64	-22	25
15	CAÑAL BAJO, OSORNO AD	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-16	25	64	-22	25
16	EL TEPUAL PUERTO MONTT, AP	46	-10	22	58	-28	19	25	58	-16	25	58	-28	19
17	CHAITEN AD	46	-10	22	58	-28	19	25	58	-16	25	58	-28	19
18	FUTALEUFU AD	52	-10	25	58	-28	19	28	58	-16	25	58	-28	19
19	ALTO PALENAR AD	52	-10	25	58	-28	19	28	58	-16	25	58	-28	19
20	PUERTO AYSEN AD	46	-10	22	58	-28	19	28	58	-16	25	58	-28	19
21	TEMIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	52	-16	22	58	-28	19	22	58	-22	22	58	-28	19
22	BALMADEDA AD	52	-22	19	52	-34	13	16	52	-34	16	52	-34	13
23	CHILE CHICO AD	52	-16	22	58	-28	19	28	58	-28	22	58	-28	19
24	LORD COCHRANE AD	52	-16	22	58	-28	19	28	58	-22	22	58	-28	19
25	CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS AP	46	-22	16	52	-34	13	16	52	-34	16	52	-34	13
26	GUARDIA MARINA ZANARTU, PUERTO WILLIAMS AD el buitre aeródromo	46	-16	19	52	-34	13	16	52	-22	16	52	-34	13
27	AZAPATA	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
28	CHUNGARA AJATA	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
29	CODPA	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
30	CHUNGARA AJATA	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
31	COVACAGUA	52	-16	22	58	-28	19	28	58	-22	22	58	-28	19
32	LAGUNILLAS (PAMPA LIRINA)	46	-16	19	58	-28	19	28	58	-22	16	58	-28	19
33	CASPANA	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
34	CHU-CHU	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
35	GONCHI EMBALSE	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-16	25	64	-22	25
36	LINZOR	46	-10	22	58	-28	19	22	58	-16	22	58	-28	19
37	PARSHALL N 2	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-16	25	64	-22	25
38	PEINE	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
39	GANTO DE AGUA	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
40	LA COMPANIA (VALLENAR)	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
41	LAUTARO EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
42	LOS LOROS	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
43	SAN FELIX	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
44	SANTA JUANA	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
45	GAREN	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
46	COGOTI EMBALSE	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	31	64	-22	25
47	EL TRAPICHE	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25

Tabla 3 - 2: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPBind 2.1.  
Continuación. (Arteaga, 2017).

Número	Nombre	PG LTPP 2.1												
		50%						98%						
		Grado de desempeño PG			Ligante seleccionado			Grado de desempeño PG			Ligante seleccionado			
Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia			
48	HURTADO	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	28	64	-22	25
49	ILLAPEL DGA	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
50	LALAGUNA EMBALSE	52	-16	22	58	-28	19	22	58	-22	22	58	-28	19
51	LA ORTIGA	52	-10	25	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
52	LA TRANQUILLA	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
53	LAS RAMADAS	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
54	LOS CONDADORES	52	-10	25	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
55	PALOMA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	28	64	-22	25
56	RECOLETA EMBALSE	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
57	RIVADAVIA	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
58	AICAHUE	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
59	LAGO PEÑUELAS	52	-10	25	64	-22	25	28	58	-10	28	64	-22	25
60	LIU-LIU EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
61	LOS ARMONOS	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
62	QUILLOTA	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
63	VILCUYA	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
64	CERRO CALAN	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
65	EL YESO EMBALSE	52	-10	25	58	-28	19	22	58	-22	22	58	-28	19
66	LAGUNA AGUIEJO	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
67	LOS PANGUILLES	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
68	MEIPIILLA	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
69	PIRQUE	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
70	CONVENIO VIEJO	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
71	ANCOA EMBALSE	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
72	COLORADO	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
73	DIGUA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
74	PARRAL	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
75	PERCAHUE	58	-10	28	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
76	POTRERO GRANDE	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
77	TALCAUC	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
78	CARACOL	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
79	COIHUECO EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
80	DISGULLIN	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
81	QUILACO	58	-10	28	64	-22	25	28	64	-16	28	64	-22	25
82	LIUCURA	58	-22	22	58	-28	19	22	58	-28	22	58	-28	19
83	LONQUIMAY	58	-22	22	58	-28	19	22	58	-28	22	58	-28	19
84	MALCAHUELLO	84	-22	22	58	-28	19	22	58	-28	22	58	-28	19
85	PUCON	52	-10	25	64	-22	25	31	64	-10	31	64	-22	25
86	PUERTO SAavedra	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
87	TEODORO SCHMIDT	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
88	TRAIGDE	52	-10	25	64	-22	25	28	64	-10	28	64	-22	25
89	ADOLFO MATTHEI	52	-10	25	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
90	COYHAIQUE(ESCUELA AGRICOLA)	52	-16	22	58	-28	19	22	58	-22	22	58	-28	19
91	PUERTO PUYUHUAPI	52	-10	25	58	-28	19	25	58	-16	25	58	-28	19
92	VILLA MANIHUALES	52	-16	22	58	-28	19	22	58	-22	22	58	-28	19
93	PIUNTA ARENAS	46	-16	19	52	-34	13	13	52	-22	19	52	-34	13
94	TORRES DEL PANNE	46	-22	16	52	-34	13	16	52	-28	16	52	-34	13

Tabla 3 - 3: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPbind 3.1. (Arteaga, 2017).

Número	Estaciones	PG modelo de daño LTPP 3.1											
		50%						98%					
		PG Teórico			Ligante seleccionado			PG Teórico			Ligante seleccionado		
Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia		
1	CHACALUTA, ARICA AEROPUERTO	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
2	DIEGO ARACENA IQUIQUE AP	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
3	ELODA, CALAMA AD	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
4	CERRO MORENO ANTOFAGASTA AP	52	-10	25	58	-28	19	52	-10	25	58	-28	19
5	LA FLORIDA, LA SERENA AD	46	-10	22	58	-28	19	46	-10	22	58	-28	19
6	SANTO DOMINGO, AD	46	-10	22	58	-28	19	46	-10	22	58	-28	19
7	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	58	-10	28	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
8	EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	58	-10	28	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
9	PUDAHUEL, SANTIAGO	58	-10	28	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
10	GENERAL FREIRE, CURICO AD	58	-10	28	64	-22	25	64	-10	28	64	-22	25
11	BERNABDO HIGGINS, CHILIAN AD	58	-10	28	64	-22	25	64	-10	25	64	-22	25
12	CARRIEL SUR, CONCEPCION	52	-10	25	58	-28	19	52	-10	25	58	-28	19
13	MANQUEHUE, TEMUCO AD	52	-10	25	58	-28	19	52	-16	22	58	-28	19
14	PICHOY, VALDIVIA AD	52	-10	25	58	-28	19	52	-16	22	58	-28	19
15	CAÑAL BAJO, OSORNO AD	46	-10	22	58	-28	19	52	-16	22	58	-28	19
16	EL TEPUAL PUERTO MONTT, AP	46	-10	22	58	-28	19	46	-16	19	58	-28	19
17	CHAITEN AD	46	-10	22	52	-34	13	46	-16	19	52	-34	13
18	FLUTALEFU AD	46	-10	22	52	-34	13	52	-16	22	52	-34	13
19	ALTO PALEMA AD	46	-10	22	52	-34	13	46	-16	19	52	-34	13
20	PUERTO AYSEN AD	46	-10	22	52	-34	13	46	-16	19	52	-34	13
21	TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	46	-16	19	52	-34	13	46	-22	16	52	-34	13
22	BALMAVEDA AD	46	-22	16	52	-34	13	46	-34	10	52	-34	13
23	CHILE GHICO AD	46	-16	19	52	-34	13	52	-22	19	52	-34	13
24	LORD COCHRANE AD	46	-16	19	52	-34	13	46	-22	16	52	-34	13
25	CARLOS IBAÑEZ, PUNTA ARENAS AP	46	-22	16	52	-34	13	46	-28	13	52	-34	13
26	GUARDIA MARINA ZARATEL, PUERTO WILLIAMS AD	46	-16	19	52	-34	13	46	-22	16	52	-34	13
27	el bñaire aeródromo	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
28	AZAPATA	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
29	CHUNGARA AJATA	46	-10	22	52	-34	13	46	-16	19	52	-34	13
30	CODPA	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
31	COYACAGUA	46	-16	19	52	-34	13	46	-22	16	52	-34	13
32	LAGUNILLAS PAMPA LIRIMA)	46	-16	19	52	-34	13	46	-28	13	52	-34	13
33	CASPANA	46	-10	22	52	-34	13	46	-10	22	52	-34	13
34	CHIL-CHIU	52	-10	25	58	-28	19	52	-16	22	58	-28	19
35	CONCHI EMBALSE	52	-10	25	58	-28	19	52	-16	22	58	-28	19
36	LINZOR	46	-10	22	52	-34	13	46	-16	19	52	-34	13
37	PARSHALL N 2	46	-10	22	58	-28	19	46	-16	19	58	-28	19
38	PEINE	58	-10	28	58	-28	19	58	-10	28	58	-28	19
39	CANTO DE AGUA	58	-10	28	64	-22	25	58	-10	28	64	-22	25
40	LA COMPAÑIA (VALLENAR)	58	-10	28	64	-22	25	58	-10	28	64	-22	25
41	LAUTARO EMBALSE	64	-10	31	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
42	LOS LOROS	64	-10	31	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
43	SAN FELIX	64	-10	31	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
44	SANTA JUANA	58	-10	28	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
45	CAREN	64	-10	31	64	-22	25	64	-10	31	64	-22	25
46	COGOTI EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	58	-10	28	64	-22	25
47	EL TRAPICHE	52	-10	25	64	-22	25	58	-10	28	64	-22	25

Tabla 3 - 3: Clasificación SUPERPAVE para una de confiabilidad de 50% y 98% según LTPPBind 3.1.  
Continuación. (Arteaga, 2017).

Estaciones		PG modelo de daño LTPP 3.1												
		50%						98%						
		PG Teórico			Ligante seleccionado			PG Teórico			Ligante seleccionado			
Número	Nombre	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	Alta	Baja	Intermedia	
48	HURTADO	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
49	ILLAPEL DGA	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
50	LA LAGUNA EMBALSE	46	-16	19	52	-34	13	13	46	-22	16	52	-34	13
51	LA ORTIGA	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
52	LA TRANQUILLA	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
53	LAS RAMADAS	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
54	LOS CONDORES	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
55	PALOMA EMBALSE	64	-10	31	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
56	RECOLETA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
57	RIVADAVIA	64	-10	31	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
58	ALGARHUE	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-16	28	64	-22	25
59	LAGO PEÑUELAS	52	-10	25	64	-22	25	25	52	-10	25	64	-22	25
60	LLIU-LLIU EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
61	LOS AROMOS	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
62	QUILLOTA	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
63	VILCUIVA	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-16	28	64	-22	25
64	CERRO CALAN	64	-10	31	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
65	EL YESO EMBALSE	46	-10	22	52	-34	13	13	46	-22	16	52	-34	13
66	LAGUNA ACULEO	64	-10	31	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
67	LOS PANGUILLES	58	-10	28	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
68	MELIPILLA	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
69	PIRQUE	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
70	CONVENIO VIEJO	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
71	ANCOA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
72	COLORADO	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
73	DIGUA EMBALSE	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
74	PARRAL	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-10	28	64	-22	25
75	PENCAHUE	64	-10	31	64	-22	25	25	64	-10	31	64	-22	25
76	POTRERO GRANDE	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
77	TALCAUC	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	28	64	-22	25
78	CARACOL	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
79	COIHUECO EMBALSE	52	-10	25	58	-28	19	19	52	-10	25	58	-28	19
80	DIGULLIN	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
81	QUILACO	58	-10	28	64	-22	25	25	58	-16	25	64	-22	25
82	LIUCURA	52	-22	19	52	-34	13	13	52	-28	16	52	-34	13
83	LONQUIMAY	52	-22	19	52	-34	13	13	52	-28	16	52	-34	13
84	MALACAHUELLO	46	-16	19	52	-34	13	13	46	-22	16	52	-34	13
85	PUCON	52	-10	25	58	-28	19	19	52	-10	25	58	-28	19
86	PUERTO SAAVEDRA	46	-10	22	58	-28	19	19	46	-10	22	58	-28	19
87	TEODORO SCHMITD	52	-10	25	58	-28	19	19	52	-10	25	58	-28	19
88	TEBAGUE	52	-10	25	58	-28	19	19	52	-16	22	58	-28	19
89	ADOLFO MATTHEI	52	-10	25	58	-28	19	19	52	-16	22	58	-28	19
90	COYHAIQUE(ESCUELA AGRICOLA)	46	-16	19	52	-34	13	13	46	-22	16	52	-34	13
91	PUERTO PU YUHUAPI	46	-10	22	52	-34	13	13	46	-16	19	52	-34	13
92	VILLA MANIHUALES	46	-16	19	52	-34	13	13	46	-22	16	52	-34	13
93	PUNTA ARENAS	46	-16	19	52	-34	13	13	46	-22	16	52	-34	13
94	TORRES DEL PAINE	46	-22	16	52	-34	13	13	46	-28	13	52	-34	13

## 4 DETERMINACIÓN GRADO PG SEGÚN SOFTWARE LTPPBIND 2.1

### 4.1 Estaciones climáticas a utilizar

Para el presente estudio se utilizaron las estaciones climáticas recopiladas desde la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) comprendidas entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

SUPERPAVE posee como requisito un mínimo de 20 años de datos completos, lo cual es un problema, ya que en Chile no se posee una red meteorológica tan completa como en EE. UU. por lo que es necesario aplicar ciertos criterios (Segovia, 2015) que nos permitan rellenar datos faltantes y/o utilizar años que si bien no tiene la totalidad de días con temperaturas máximas y mínimas de todos modos sirven para el estudio.

#### Criterio 1: Determinación de un año completo de datos

Chile posee estaciones marcadas a lo largo del año, por lo que el clima tiene tendencia a tener sus temperaturas máximas y mínimas en ciertos periodos, esto permite que no sea necesario tener una estadística completa de temperaturas máximas en el periodo de invierno, ya que es poco probable que ocurran máximos de temperatura, mismo caso en el periodo de verano, donde tampoco es necesario tener una estadística completa de temperaturas mínimas ya que es poco probable que ocurran mínimos de temperatura.

- Temperatura máxima diaria: Un año se considera válido para el estudio, cuando posea un mínimo del 95% de los datos de temperatura máxima en el periodo caluroso comprendido entre el 21 de noviembre y el 21 de marzo (121 días), es decir, puede faltarle a lo más 6 días de datos.
- Temperatura mínima diaria: Un año se considera válido para el estudio, cuando posea un mínimo del 95% de los datos de temperatura mínima en el periodo frío comprendido entre el 21 de mayo y el 21 de septiembre (124 días), es decir, puede faltarle a lo más 6 días de datos.

#### Criterio 2: Días faltantes

Debido a la dificultad para encontrar años completos de datos es que se aplica el criterio 1, luego es necesario rellenar los datos faltantes para tener la estadística completa, no obstante, en el caso de la temperatura máxima diaria se utiliza una media móvil de 7 días consecutivos, lo cual en caso de tener más de un dato faltante en dicho periodo aumenta la incertidumbre. El criterio 2 limita los días faltantes en un periodo de 7 días consecutivos a solo 1 dato. La tabla siguiente ejemplifica el criterio.

Tabla 4 - 1: Ejemplo año válido criterio número 2.

Mes		Mes		Mes		Mes	
Día	¿Posee Dato?	Día	¿Posee Dato?	Día	¿Posee Dato?	Día	¿Posee Dato?
1	✓	1	✓	1	✓	1	✓
2	✓	2	✓	2	✓	2	✓
3	✓	3	✓	3	✓	3	✓
4	✗	4	✗	4	✓	4	✓
5	✓	5	✓	...	...	...	...
6	✓	6	✗	11	✓	11	✓
7	✓	7	✓	12	✗	12	✓
...	...	...	...	13	✓	13	✗
14	✓	14	✓	14	✓	14	✓
15	✓	15	✓	15	✓	15	✓
16	✓	16	✓	16	✓	16	✓
17	✓	17	✓	17	✓	17	✓
18	✓	18	✓	18	✓	18	✓
19	✗	19	✗	19	✗	19	✗
20	✓	20	✓	20	✓	20	✓
...	...	...	...	...	...	...	...
30	✓	30	✓	30	✓	30	✓
AÑO VÁLIDO		AÑO INVÁLIDO		AÑO VÁLIDO		AÑO INVÁLIDO	

La metodología para completar los datos es la media aritmética (promedio) entre el dato del día anterior y el dato del día posterior.

Criterio 3: Información actual de las estaciones.

Si bien la metodología SUPERPAVE exige un mínimo de 20 años de datos, los datos deben representar el comportamiento del clima en la actualidad, por ejemplo, si una estación posee datos climáticos entre los periodos 1960-1980, cumple con el requerimiento SUPERPAVE no obstante no representará el comportamiento del clima en la actualidad. Por esto el criterio 3 impone que las estaciones estudiadas deben poseer datos hasta por lo menos el año 2010. La tabla siguiente ejemplifica el criterio.

Tabla 4 - 2: Ejemplo para año válido criterio número 3.

Estación	PERIODOS CON DATOS		¿Cumple el criterio 3?
	Primer año válido	Último año válido	
1	1960	1980	✗
2	1970	2019	✓
3	1985	2009	✗
4	1972	2010	✓

Una vez aplicados los criterios, son 53 las estaciones climáticas entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena que cumplen, 33 estaciones correspondientes a la Dirección General de Aguas (DGA) y 20 estaciones correspondientes a la

Dirección Meteorológica de Chile (DMC). En la tabla 4- 3 se detallan las estaciones por región y ubicación en términos de latitud y longitud.

Tabla 4 - 3: Estaciones climáticas una vez aplicados los criterios 1, 2 y 3.

		Estaciones		Ubicación		
Región		Nombre	Altura	Latitud	Longitud	
1	D G A	Región Metropolitana (RM)	CERRO CALÁN	848	-33,3950	-70,5367
2			EL YESO EMBALSE	2475	-33,6767	-70,0886
3			LAGUNA ACULEO	360	-33,8858	-70,8775
4			LOS PANGUILES	190	-33,4386	-71,0256
5			MELIPILLA	168	-33,6803	-71,1997
6		PIRQUE	659	-33,6736	-70,5869	
7		Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (LI)	CONVENTO VIEJO	239	-34,7694	-71,1331
8			RENGO	310	-34,3817	-70,8453
9		Región del Maule (ML)	ANCOA EMBALSE	421	-35,9106	-71,2958
10			COLORADO	420	-35,6381	-71,5481
11			DIGUA EMBALSE	390	-36,2558	-71,5481
12			PARRAL	175	-36,1878	-71,8283
13			PENCAHUE	55	-35,3725	-71,8325
14			POTRERO GRANDE	445	-35,1833	-71,0978
15			TALCA UC	130	-35,4358	-71,6197
16		Región de Ñuble (NB)	CARACOL	610	-36,6511	-71,3950
17			COIHUECO EMBALSE	314	-36,6408	-71,7989
18			DIGULLÍN	670	-36,8686	-71,6425
19		Región del Biobío (BI)	QUILACO	231	-37,6850	-72,0058
20			LIUCURA	1043	-38,6517	-71,9319
21		Región de La Araucanía (AR)	LONQUIMAY	931	-38,4536	-71,3742
22			MALALCAHUELLO	950	-38,4703	-71,5753
23			PUCÓN	230	-39,2753	-71,9503
24			PUERTO SAAVEDRA	5	-38,7886	-73,3936
25			TEODORO SCHMIDT	13	-39,0278	-73,0781
26			TRAIQUÉN	234	-38,2561	-72,6536
27			TRICAUCO	520	-38,8439	-71,5514
28		Región de Los Lagos (LL)	ADOLFO MATTHEI	55	-40,5883	-73,1069
29			COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	343	-45,5739	-72,0286
30		Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (AI)	PUERTO PUYUHUAPI	10	-44,3228	-72,5597
31			VILLA MAÑIHUALES	150	-45,1733	-72,1478
32			Región de Magallanes y de la Antártica Chilena (MA)	PUNTA ARENAS	5	-53,1233
33		TORRES DEL PAINE		25	-51,1842	-72,9669
34	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	527		-33,4450	-70,6828	
35	Región Metropolitana (RM)	EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	650	-33,4553	-70,5486	
36		PUDAHUEL, SANTIAGO	480	-33,6561	-70,7878	
37	Región del Maule (ML)	GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	225	-34,9694	-71,2169	
38	Región de Ñuble (NB)	BERNARDO OHIGGINS, CHILLÁN AD	151	-36,5858	-72,0367	
39	Región del Biobío (BI)	CARRIEL SUR, CONCEPCIÓN	12	-36,7806	-73,0664	
40		MARIA DOLORES, LOS ANGELES AD	118	-37,3969	-72,4239	
41	Región de La Araucanía (AR)	MANQUEHUE, TEMUCO AD	92	-38,7700	-72,6369	
42	Región de Los Ríos (LR)	PICHOY, VALDIVIA AD	18	-39,6567	-73,0872	
43		CAÑAL BAJO, OSORNO AD	61	-40,6144	-73,0575	
44	Región de Los Lagos (LL)	EL TEPUAL, PUERTO MONTT AP	85	-41,4475	-73,0958	
45		FUTALEUFÚ AD	350	-43,1889	-71,8522	
46		ALTO PALENA AD	281	-43,6118	-71,8014	
47	Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (AI)	PUERTO AYSÉN AD	11	-45,3994	-72,6772	
48		TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	310	-45,5908	-72,1022	
49		BALMACEDA AD	520	-45,9183	-71,6778	
50		CHILE CHICO AD	328	-46,5850	-71,6853	
51		LORD COCHRANE AD	196	-47,2439	-72,5825	
52	Región de Magallanes y de la Antártica Chilena (MA)	CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS AP	39	-53,0017	-70,8386	
53		GUARDIA MARINA ZAÑARTU, PUERTO WILLIAMS AD	30	-54,9317	-67,6156	

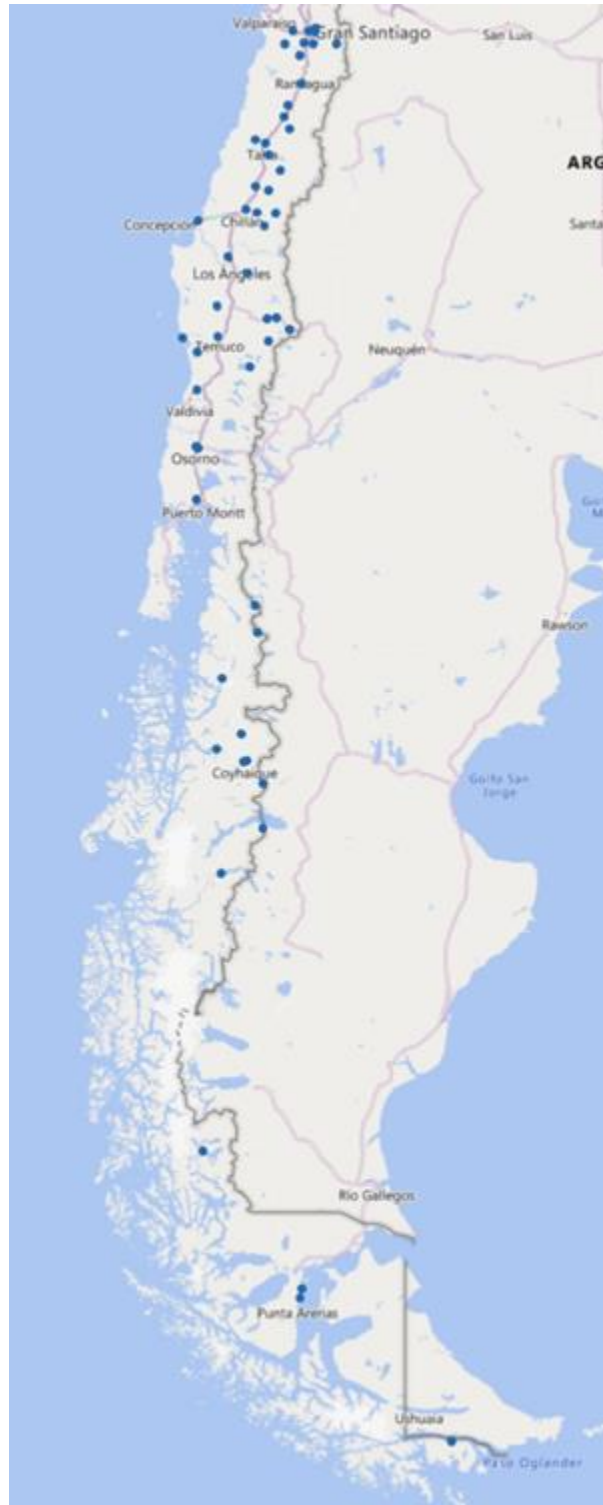


Figura 4- 1: Mapa georreferenciado de las estaciones climáticas a utilizar en el estudio.





## 4.2 Calculo temperatura máxima y mínima del pavimento y asignación de grado de desempeño (PG) a estaciones estudiadas.

Para la asignación del grado de desempeño (PG) de cada estación se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Determinar la temperatura mínima absoluta de cada año y calcular el promedio entre los valores obtenidos.
- 2) Calcular la desviación estándar entre las temperaturas mínimas anuales obtenidas (valores utilizados en el 1) para el cálculo del promedio).
- 3) Calcular la temperatura máxima promedio de los siete días consecutivos más calurosos para cada año.
- 4) Calcular el promedio y desviación estándar entre las temperaturas máximas promedio de los siete días consecutivos más calurosos de cada año, (valores obtenidos en el punto 3).
- 5) Calcular la temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20 [mm] utilizando el método implementado en LTPPBIND 2.1 mediante la fórmula 4- 1.

### Alta temperatura

$$T_{H,pav} = 54,32 + 0,78 * T_{aire} - 0,0025 * Lat^2 - 15,14 * Log_{10}(H + 25) + Z * (9 + 0,61 * (\sigma_{AIRE})^2)^{0,5}$$

(Formula 4- 1)

Donde:

$T_{H,pav}$ : Temperatura máxima del Pavimento a una profundidad H [mm] [°C]

$T_{Aire}$ : Alta temperatura del aire [°C](Punto 4)

$Lat$ : Latitud geográfica de la estación en estudio en grados

$H$ : Profundidad a la superficie 20 [mm]

$\sigma_{AIRE}$ : Desviación estándar de las temperaturas más altas del aire de 7 días [°C] (Punto 4)

$Z$ : Variable estándar de la distribución normal

Para una confiabilidad del 50%,  $Z = 0$ . Para una confiabilidad del 98%,  $Z = 2,055$ .

- 6) Calcular la temperatura mínima del pavimento en la superficie utilizando el método implementado en LTPPBIND 2.1 mediante la fórmula 4- 2.

### Baja temperatura

$$T_{L,pav} = -1,56 + 0,72 * T_{aire} - 0,0004 * Lat^2 + 6,26 * Log_{10}(H + 25) - Z * (4,4 + 0,52 * (\sigma_{AIRE})^2)^{0,5}$$

(Formula 4- 2)

Donde:

$T_{L,pav}$ : Temperatura mínima del Pavimento en la superficie en [°C]

$T_{Aire}$ : Temperatura mínima del aire [°C](Punto 1)

Lat: Latitud geográfica de la estación en estudio en grados

H: Profundidad a la superficie en [mm]

$\sigma_{AIRE}$ : Desviación estándar de las temperaturas mínimas del aire [°C] (Punto 2)

Z: Variable estándar de la distribución normal

Para una confiabilidad del 50%,  $Z = 0$ . Para una confiabilidad del 98%,  $Z = 2,055$ .

7) Se le asignó el grado de desempeño PG a cada estación según las temperaturas del pavimento obtenidas en el punto 5) para alta temperatura y punto 6) para baja temperatura, según lo siguiente:

- Grado de alta temperatura: Se le asigna el grado PG superior más cercano.
- Grado de baja temperatura: Se le asigna el grado PG inferior más cercano.

La siguiente tabla ejemplifica esto:

Tabla 4 - 6: Ejemplo asignación grado de desempeño.

Alta Temperatura [°C]	Baja Temperatura [°C]	PG
52,6	-4,3	58-10
63,5	-15,2	64-16
42	-10,2	46-16

En la tabla 4- 7, se detalla cada estación con su respectivo grado de performance (PG) asignado.

Tabla 4 - 7: Clasificación SUPERPAVE por estación según modelo LTPPBind 2.1.

Región	Estaciones	Temperatura aire										Temperatura del pavimento										F6 LTPP 2.1			
		Latitud	T° Min	Desv Min aire	T° Máx promedio móvil	Desv Máx aire	LTPPBind 2.1 50%	T° Min	T° Máx	LTPPBind 2.1 98%	T° Min	T° Máx	LTPPBind 2.1 50%	Baja	Alta	LTPPBind 2.1 98%	Baja	Alta							
1																									
2		-33,3950	-0,04	0,98	32,80	0,63	52,03	2,70	58,33	-1,85	58	64	58	-10	64	-10	64	-10	64						
3	PM	-33,6767	-10,50	2,06	24,50	1,15	45,57	-4,91	52,00	-10,19	46	58	-10	58	-10	58	-10	58	-16						
4		-33,8858	-4,20	1,70	32,80	0,74	52,00	-0,43	58,28	-5,42	58	64	-10	64	-10	64	-10	64	-10						
5		-33,4386	-1,10	1,38	31,90	1,28	51,38	1,93	57,88	-2,84	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
6		-33,6803	-0,70	1,07	30,20	0,76	50,01	2,15	58,29	-2,44	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
7		-33,6736	-4,60	1,59	31,00	0,82	50,71	-0,66	57,05	-5,57	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
8	LI	-34,7894	-2,10	1,34	31,80	1,20	51,07	0,84	57,53	-3,30	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
9		-34,3877	-3,40	1,57	31,60	1,11	50,98	0,01	57,40	-4,88	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
10		-35,3106	-2,40	2,02	29,30	1,14	49,33	0,30	55,62	-4,94	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
11		-35,6391	-8,00	3,56	29,60	2,74	49,20	-3,65	58,78	-10,46	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-16						
12	ML	-36,2558	-3,80	1,88	31,30	1,29	50,42	-0,80	58,92	-5,78	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
13		-36,1878	-2,90	1,88	32,10	1,95	51,05	-0,14	57,70	-5,27	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
14		-35,3125	-3,10	1,30	34,60	1,35	53,15	-0,05	59,69	-4,77	58	64	-10	64	-10	64	-10	64	-10						
15		-35,1833	-5,60	1,60	30,70	1,11	50,14	-1,79	58,56	-6,71	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
16		-35,4358	-3,50	1,24	32,30	0,98	51,35	-0,35	57,71	-5,04	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
17	NB	-36,8511	-1,80	1,90	30,10	1,26	49,41	0,52	58,90	-4,63	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
18		-36,8608	-4,80	1,96	33,30	2,32	51,91	-1,64	59,11	-6,83	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
19	G	-36,8686	-3,40	1,83	29,20	1,54	48,67	-0,69	55,31	-5,79	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
20		-37,6850	-5,30	1,51	32,20	1,45	50,86	-2,31	57,45	-7,16	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
21	A	-38,8517	-19,40	5,07	30,60	2,39	49,42	-8,43	58,66	-17,09	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-22						
22		-38,4536	-10,80	3,89	30,70	1,81	49,94	-8,50	58,35	-13,70	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-16						
23		-38,4703	-8,80	2,95	27,10	1,76	46,73	-5,06	53,51	-10,80	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-16						
24	AR	-39,2153	-2,50	0,96	28,40	2,02	47,59	-0,78	54,55	-5,32	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
25		-38,7886	-1,50	1,88	22,10	2,44	42,77	0,09	50,07	-4,88	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10						
26		-38,0278	-2,80	2,31	26,00	1,92	45,76	-1,32	52,85	-6,42	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10						
27		-38,8439	-4,40	1,79	29,20	1,72	48,29	-2,01	55,05	-7,07	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
28	LL	-40,5883	-4,70	1,24	27,53	1,70	46,85	-2,78	53,39	-7,47	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
29		-45,5739	-10,50	3,34	25,30	2,14	43,83	-6,88	50,89	-15,24	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
30	AI	-44,3228	-4,80	1,40	23,70	2,95	42,87	-4,12	50,27	-8,91	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
31		-45,1733	-7,90	2,75	26,80	3,54	45,09	-6,66	53,48	-12,59	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
32	MA	-53,1233	-7,10	1,95	18,40	1,25	36,59	-9,21	43,07	-14,40	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
33		-51,1842	-11,40	2,67	21,90	1,94	39,35	-11,90	46,26	-17,35	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-22						
34	PM	-33,4450	-1,90	0,94	32,24	0,89	51,64	1,35	57,97	-3,18	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
35		-33,4553	-1,80	1,03	31,83	0,83	51,32	1,42	57,63	-3,15	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
36		-33,6561	-3,70	1,35	32,24	0,95	51,61	0,00	57,95	-4,78	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
37	ML	-34,3694	3,80	1,27	32,02	1,08	51,21	5,04	57,61	0,33	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
38	NB	-36,9868	-3,90	1,26	32,31	1,31	51,15	-0,37	57,66	-5,67	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
39	BI	-36,7806	-1,29	0,96	24,79	1,00	45,24	0,85	51,62	-3,69	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10						
40		-37,9869	-4,80	1,17	32,91	1,66	51,46	-1,86	58,31	-6,51	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
41	AR	-38,7700	-4,30	1,07	28,78	1,78	47,98	-1,92	54,78	-6,51	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
42	LR	-38,6567	-4,00	1,19	28,10	1,73	47,28	-1,98	54,04	-6,64	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10						
43	LL	-40,6144	-5,30	1,09	26,72	3,35	46,05	-3,22	54,23	-7,83	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10						
44		-41,4475	-4,30	1,11	23,12	1,34	43,03	-2,78	49,56	-7,39	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10						
45	C	-43,1889	-7,30	1,69	28,03	1,93	46,49	-5,53	53,39	-10,51	52	58	-10	58	-10	58	-10	58	-16						
46		-43,6178	-6,68	1,84	27,17	1,83	45,73	-5,23	52,56	-10,33	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
47		-45,3994	-5,10	1,32	22,88	1,80	41,98	-4,73	48,79	-9,46	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
48	AI	-45,9308	-10,90	3,52	25,32	2,35	43,84	-8,97	51,07	-15,74	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
49		-45,9383	-16,43	4,83	24,20	2,49	42,90	-13,07	50,24	-21,43	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-22						
50		-46,9960	-8,70	2,13	27,01	1,60	44,93	-7,75	51,61	-13,10	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
51		-47,2439	-9,20	2,52	25,51	2,21	43,61	-8,36	50,72	-14,06	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
52	MA	-53,0017	0,00	0,00	0,00	0,00	36,59	-10,60	43,04	-18,09	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						
53		-54,3317	-9,10	2,30	18,35	1,21	35,18	-10,49	41,68	-15,41	46	52	-10	52	-10	52	-10	52	-16						

### **4.3 Asignación de ligantes tradicionales a cada estación por región.**

Se le asignará a cada estación en estudio ligantes asfálticos tradicionales. Los ligantes tradicionales son ligantes asfálticos comúnmente derivados de la refinación del petróleo, sin modificaciones. En general, estos ligantes conllevan un menor costo, facilidad de manipulación, almacenamiento y transporte. Estos poseen una diferencia entre la temperatura alta y baja de hasta 86°C. Para el presente trabajo, se les asignarán a las estaciones 3 ligantes tradicionales:

- PG 52-34
- PG 58-28
- PG 64-22

La clasificación SUPERPAVE se basa en los tres principales deterioros que puede presentar la capa asfáltica.

- 1- Ahuellamiento (Temperatura Máxima)
- 2- Agrietamiento térmico (Temperatura mínima)
- 3- Agrietamiento por fatiga (Temperatura intermedia)

Por tanto, Los ligantes asfálticos asignados deben cumplir con el grado de alta y baja temperatura, además de la temperatura intermedia.

A continuación, se muestran las estaciones climáticas estudiadas separadas por región con su respectivo PG teórico y los ligantes tradicionales asignados que cumplen para una confiabilidad del 50% y una del 98%.

### 4.3.1 Región Metropolitana

Tabla 4 - 8: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región Metropolitana según modelo LTTP 2.1.

Estaciones	Ubicación		LTTP 2.1											
			50% Confiabilidad			Alternativas ligante tradicional			98% Confiabilidad					
			Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34
CERRO CALÁN	-33,3950	-70,5367	58	-10	28				64	-10	31			
EL YESO EMBALSE	-33,6767	-70,0886	46	-10	22				68	-16	25			
LAGUNA ACULEO	-33,8858	-70,8775	58	-10	28				64	-10	31			
LOS PANGULES	-33,4386	-71,0256	52	-10	25				68	-10	28			
MELIPILLA	-33,6803	-71,1997	52	-10	25				68	-10	28			
PIRQUE	-33,6736	-70,5863	52	-10	25				68	-10	28			
QUINTA NORMAL SANTIAGO	-33,4450	-70,6828	52	-10	25				68	-10	28			
EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	-33,4553	-70,5486	52	-10	25				68	-10	28			
PUDAHUEL SANTIAGO	-33,8561	-70,7878	52	-10	25				68	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

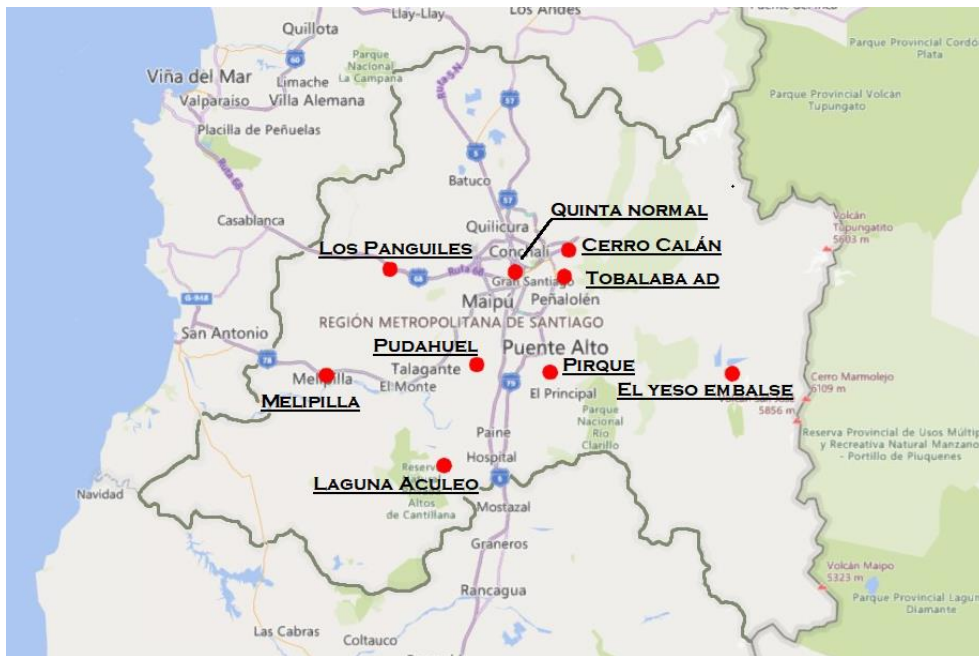


Figura 4- 2: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTTP 2.1 para la Región Metropolitana.

### 4.3.2 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Tabla 4 - 9: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins según modelo LTPP 2.1.

Estaciones	Ubicación		LTPP 2.1											
			50% Confiabilidad			Alternativas ligante tradicional			98% Confiabilidad					
			Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
CONVENTO VIEJO	-34.7694	-71.1331	62	-10	25				58	-10	28			
RENGO	-34.3817	-70.8463	62	-10	25				58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 4- 3: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

### 4.3.3 Región del Maule

Tabla 4 - 10: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Maule según modelo LTPP 2.1.

Estaciones	Ubicación		LTPP 2.1											
			50% Confiabilidad			Alternativas ligante tradicional			98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG			PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia				Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
ANCOA EMBALSE	-35,9106	-71,2958	52	-10	25				58	-10	28			
COLORADO	-35,6391	-71,5481	52	-10	25				58	-16	25			
DIGUA EMBALSE	-36,2558	-71,5481	52	-10	25				58	-10	28			
PARRAL	-36,1878	-71,8283	52	-10	25				58	-10	28			
PENCAHUE	-35,3725	-71,8325	58	-10	28				64	-10	31			
POTRERO GRANDE	-35,1833	-71,0978	52	-10	25				58	-10	28			
TALCA UC	-35,4358	-71,6187	52	-10	25				58	-10	28			
GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	-34,9694	-71,2163	52	-10	25				58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 4- 4: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Maule.

### 4.3.4 Región del Ñuble

Tabla 4 - 11: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Ñuble según modelo LTPP 2.1.

Estaciones	Ubicación		LTPP 2.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34
CARACOL	-36,8511	-71,2960	52	-10	25				58	-10	25			
COIHUECO EMBALSE	-36,8468	-71,7389	52	-10	25				64	-10	31			
DIGULLÍN	-36,8686	-71,6425	52	-10	25				58	-10	28			
BERNARDO OHIGGINS, CHILLÁN AD	-36,5858	-72,0367	62	-10	25				58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 4- 5: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Ñuble.

### 4.3.5 Región del Biobío

Tabla 4 - 12: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Biobío según modelo LTPP 2.1.

Estaciones	Ubicación		LTPP 2.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34
QUILACO	-37,6850	-72,0058	52	-10	25				58	-10	28			
CARMIEL SUR, CONCEPCIÓN	-36,7806	-73,0654	46	-10	22				52	-10	25			
MARIA DOLORES, LOS ANGELES AD	-37,2853	-72,4239	52	-10	25				64	-10	31			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 4- 6: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región del Biobío.

### 4.3.6 Región de La Araucanía

Tabla 4 - 13: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de La Araucanía según modelo LTPP 2.1.

Estaciones Nombre	Ubicación		LTPP 2.1											
	Lat	Long	50% Confiabilidad			Alternativas ligante tradicional			98% Confiabilidad					
			Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34
LIUCURA	-38,6517	-71,0919	52	-10	25				58	-22	22			
LONGUIMAY	-38,4536	-71,3742	52	-10	25				58	-16	25			
MALALCAHUELLO	-38,4703	-71,5753	52	-10	25				58	-16	25			
PUCÓN	-39,2753	-71,9503	52	-10	25				58	-10	28			
PUERTO SAAVEDRA	-38,7886	-73,3336	46	-10	22				62	-10	25			
TEODORO SCHMIDT	-39,0278	-73,0781	46	-10	22				58	-10	28			
TRAIQUÉN	-38,2561	-72,8536	52	-10	25				58	-10	28			
TRICAUCO	-38,8439	-71,5514	52	-10	25				58	-10	28			
MANQUEHUE, TEMUCO AD	-38,7700	-72,6369	52	-10	25				58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

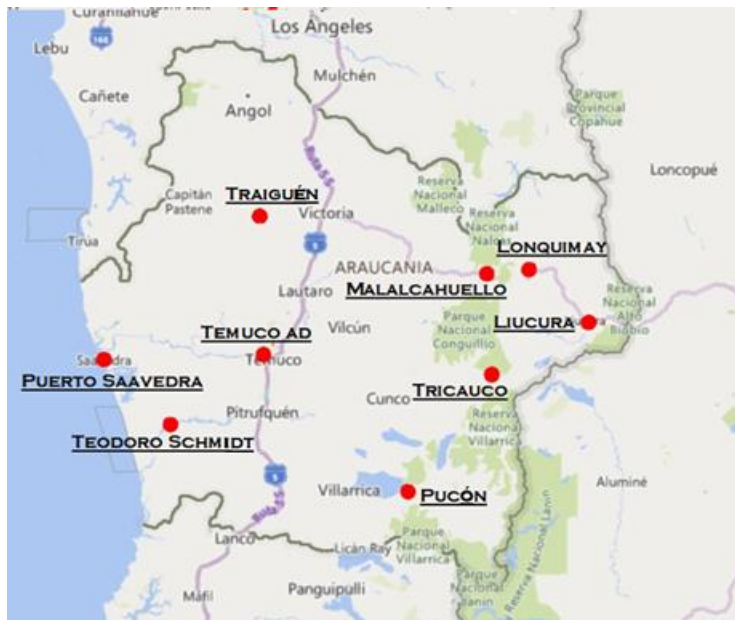


Figura 4- 7: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de La Araucanía.

### 4.3.7 Región de Los Ríos

Tabla 4 - 14: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región Los Ríos según modelo LTPP 2.1.

Estaciones	Ubicación		LTPP 2.1											
			50% Confiabilidad			Alternativas ligante tradicional			98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional					
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34
FICHROY, VALDIVIA AD	-39,8567	-73,0872	62	-10	25	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	58	-10	28	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

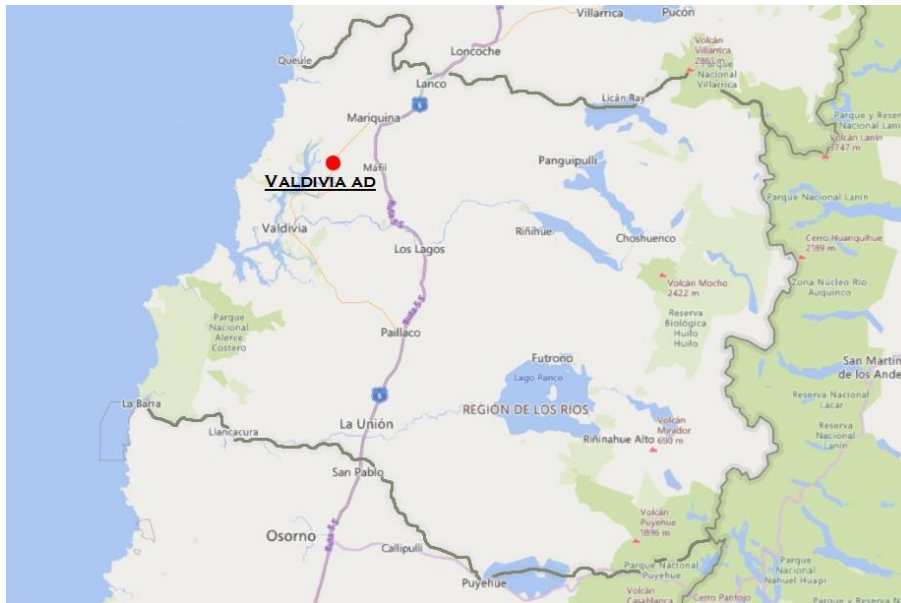


Figura 4- 8: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Los Ríos.

### 4.3.8 Región de Los Lagos

Tabla 4 - 15: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Los Lagos según modelo LTPP 2.1.

Región	Estaciones Nombre	Ubicación		LTPP 2.1										
		Lat	Long	50% Confiabilidad						90% Confiabilidad				
				Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional	
Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG-52-34			
LL	ADOLFO MATTHEI	-40,5883	-73,1069	52	-10	25				58	-10	28		
LL	CAÑAL BAJO, OSORNO AD	-40,6144	-73,0575	52	-10	25				58	-10	28		
LL	EL TEPUAL, PUERTO MONTT AP	-41,4475	-73,0968	46	-10	22				52	-10	25		
LL	FUTALEUFÚ AD	-43,1689	-71,8522	52	-10	25				58	-16	25		
LL	ALTO PALENA AD	-43,6118	-71,8014	46	-10	22				58	-16	25		

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 4- 9: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Los Lagos.

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

Tabla 4 - 16: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo según modelo LTTP 2.1.

Región	Estaciones	Ubicación		LTTP 2.1											
				50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
				Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional		
Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34				
AI	COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	-45,6739	-72,0286	46	-10	22				52	-16	22			
AI	PUERTO PUYUHUAPI	-44,3228	-72,5597	46	-10	22				52	-10	25			
AI	VILLA MAÑIHUALES	-45,1733	-72,1478	46	-10	22				58	-16	25			
AI	PUERTO AYSÉN AD	-45,3984	-72,6772	46	-10	22				52	-10	25			
AI	TEÑENTE VIDAL COYHAIQUE AD	-45,5908	-72,8022	46	-10	22				52	-16	22			
AI	BALMACEDA AD	-45,8183	-71,6778	46	-16	19				52	-22	19			
AI	CHILE CHICO AD	-46,5860	-71,6863	46	-10	22				52	-16	22			
AI	LORD COCHRANE AD	-47,2439	-72,6825	46	-10	22				52	-16	22			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

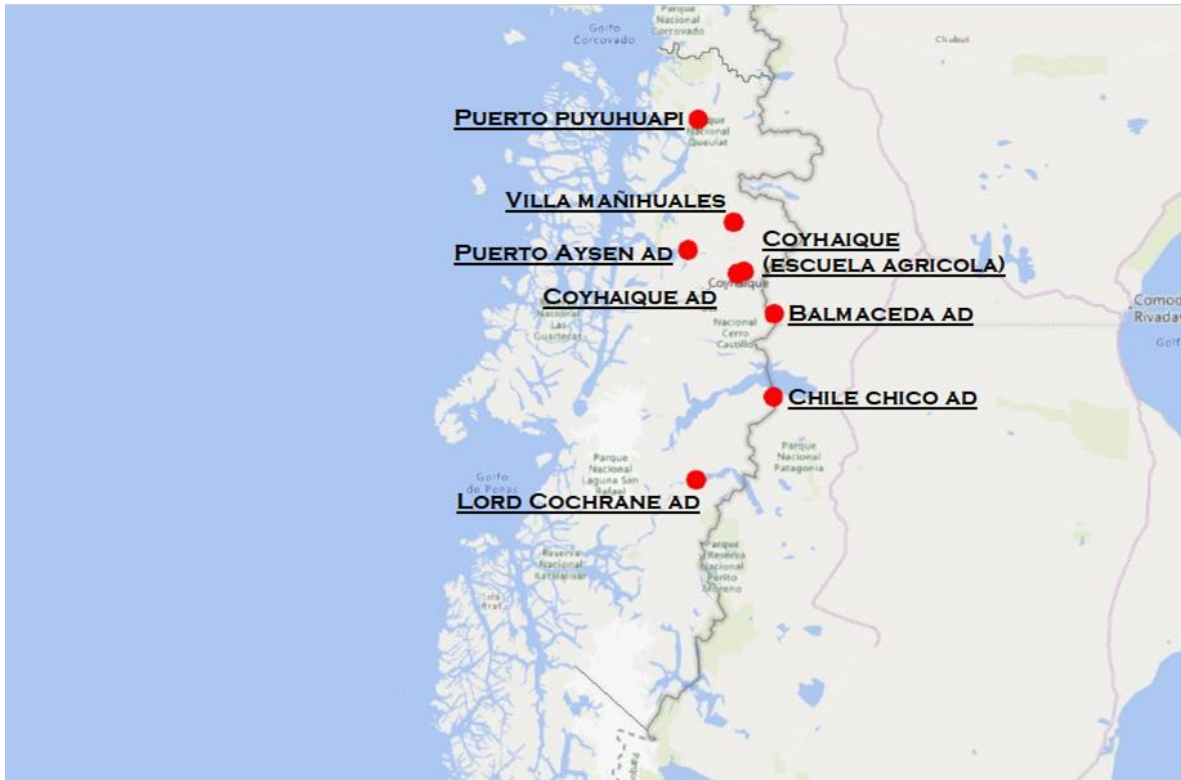


Figura 4- 10: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTTP 2.1 para la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

### 4.3.10 Región de Magallanes y la Antártica Chilena

Tabla 4 - 17: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena según modelo LTPP 2.1.

Región	Estaciones Nombre	Ubicación Lat Long		LTPP 2.1											
				50% Confiabilidad			90% Confiabilidad								
				Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG			Alternativas ligante tradicional		
Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34				
MA	PUNTA ARENAS	-53,1233	-70,8772	46	-30	22				46	-16	19			
MA	TORRES DEL PAINE	-51,1842	-72,3689	46	-16	19				52	-22	19			
MA	CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS AP	-53,0017	-70,9386	46	-16	19				46	-22	16			
MA	GUARDIA MARINA ZANARTU, PUERTO WILLIAMS AD	-54,8317	-67,6366	46	-16	19				46	-16	19			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

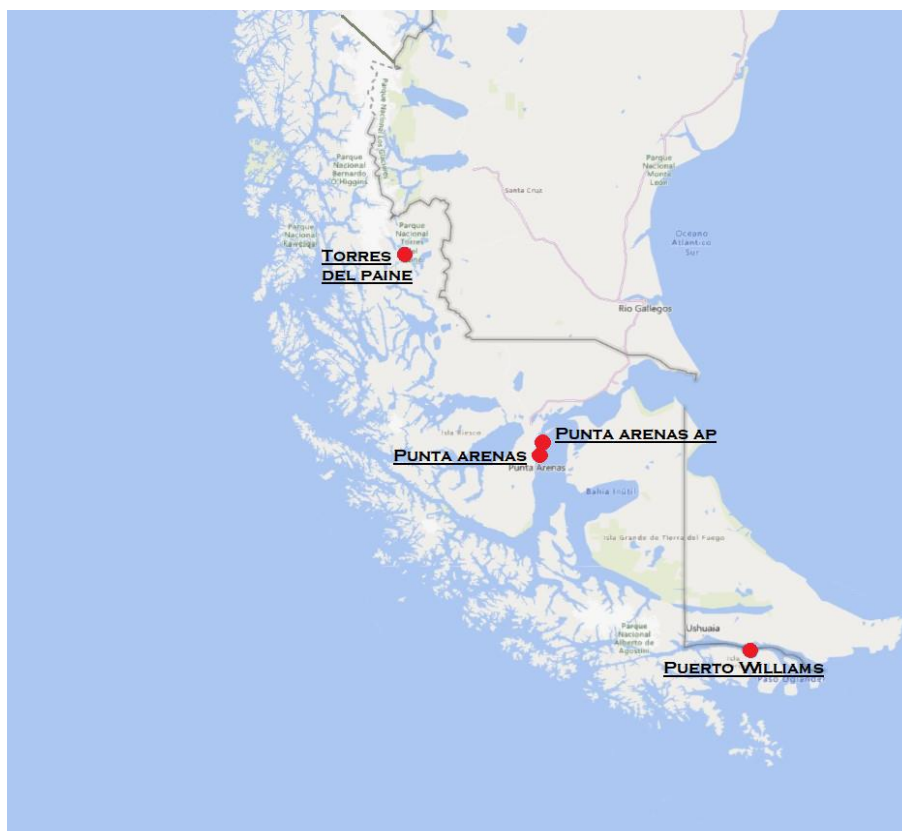


Figura 4- 11: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 2.1 para la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

#### **4.4 Comparación de resultados**

Se realiza una comparación con los resultados obtenidos en estudios previos, en específico “Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico” (Arteaga,2017).

En su estudio Arteaga utiliza 51 estaciones climáticas entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena recopiladas desde la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) Y la Dirección General de Aguas (DGA) y procede a calcular la temperatura del pavimento y asignar grados de performance utilizando el método LTPPBind 2.1. El objetivo de Arteaga fue asignar un ligante asfáltico tradicional a cada estación con el fin de realizar una zonificación con la menor cantidad de ligantes, mientras que el objetivo de este trabajo fue actualizar las estaciones a los datos disponibles hasta el año 2022, agregando nuevas estaciones en caso de que existieran siempre que cumplieran con un mínimo de 20 años y asignar todos los ligantes asfálticos tradicionales que cumplan, por lo que en la tabla a continuación se comparan los grados de desempeño (PG) de ambos estudios.

Tabla 4 - 18: Comparación grados de desempeño calculados entre la investigación realizada por Arteaga en 2017 y el presente trabajo para LTTP 2.1.

Región	Estaciones Nombre	LTTP 2.1 (Arteaga, 2017)				LTTP 2.1 2023			
		50%		98%		50%		98%	
		Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
RM	CERRO CALÁN	58	-10	64	-10	58	-10	64	-10
	EL YESO EMBALSE	52	-10	58	-22	46	-10	58	-16
	LAGUNA ACULEO	58	-10	64	-10	58	-10	64	-10
	LOS PANGUILES	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
	MELIPILLA	52	-10	64	-10	52	-10	58	-10
LI	PIRQUE	58	-10	64	-16	52	-10	58	-10
	CONVENTO VIEJO	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
ML	RENGO	52	-10	58	-10	52	-10	58	-10
	ANCOA EMBALSE	52	-10	58	-10	52	-10	58	-10
	COLORADO	52	-10	64	-16	52	-10	58	-16
	DIGUA EMBALSE	58	-10	64	-16	52	-10	58	-10
	PARRAL	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
	PENCAHUE	58	-10	64	-10	58	-10	64	-10
	POTRERO GRANDE	58	-10	64	-16	52	-10	58	-10
	TALCA UC	58	-10	64	-16	52	-10	58	-10
NB	CARACOL	52	-10	58	-10	52	-10	58	-10
	COIHUECO EMBALSE	58	-10	64	-16	52	-10	64	-10
BI	DIGULLÍN	52	-10	58	-10	52	-10	58	-10
	QUILACO	58	-10	64	-16	52	-10	58	-10
AR	LIUCURA	58	-22	64	-28	52	-10	58	-22
	LONGUIMAY	58	-22	64	-28	52	-10	58	-16
	MALALCAHUELLO	52	-16	58	-22	52	-10	58	-16
	PUCÓN	52	-10	64	-10	52	-10	58	-10
	PUERTO SAAVEDRA	52	-10	58	-10	46	-10	52	-10
	TEODORO SCHMIDT	52	-10	58	-10	46	-10	58	-10
	TRAIQUÉN	52	-10	64	-16	52	-10	58	-10
LL	TRICAUCO	52	-10	58	-10	52	-10	58	-10
	ADOLFO MATTHEI	52	-10	58	-16	52	-10	58	-10
AI	COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	52	-16	58	-22	46	-10	52	-16
	PUERTO PUYUJUAPI	52	-10	58	-16	46	-10	52	-10
MA	VILLA MANIHUALES	52	-16	58	-22	46	-10	58	-16
	PUNTA ARENAS	46	-16	52	-22	46	-10	46	-16
RM	TOPRES DEL PAIME	46	-22	52	-28	46	-16	52	-22
	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
	EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
ML	PUDAHUEL, SANTIAGO	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
	GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	58	-10	64	-10	52	-10	58	-10
NB	BERNARDO O'HIGGINS, CHILLÁN AD	58	-10	64	-16	52	-10	58	-10
	CARRIEL SUR, CONCEPCIÓN	52	-10	58	-10	46	-10	52	-10
AR	MARIA DOLORES, LOS ANGELES AD	52	-10	58	-10	52	-10	64	-10
	MANQUEHUE, TEMUCO AD	52	-10	64	-16	52	-10	58	-10
LR	PICHROY, VALDIVIA AD	52	-10	58	-16	52	-10	58	-10
	CAÑAL BAJO, OSORNO AD	52	-10	58	-16	52	-10	58	-10
LL	EL TEPUAL, PUERTO MONTT AP	46	-10	58	-16	46	-10	52	-10
	FUTALEUFU AD	52	-10	58	-16	52	-10	58	-16
	ALTO PALENA AD	52	-10	58	-16	46	-10	58	-16
AI	PUERTO AYSÉN AD	46	-10	58	-16	46	-10	52	-10
	TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	52	-16	58	-22	46	-10	52	-16
	BALMACEDA AD	52	-22	58	-34	46	-16	52	-22
	CHILE CHICO AD	52	-16	58	-22	46	-10	52	-16
MA	LORD COCHRANE AD	52	-16	58	-22	46	-10	52	-16
	CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS AP	46	-22	52	-28	46	-16	46	-22
	GUARDIA MARINA ZANARTU, PUERTO WILLIAMS AD	46	-16	46	-22	46	-16	46	-16

Las celdas en verde indican que hubo variación en el grado de desempeño PG en comparación a los resultados de Arteaga, 2017, en blanco las estaciones que no sufrieron variación y en amarillo indican las estaciones que fueron agregadas al año 2022.

Como se observa en la tabla 4- 18, una gran mayoría de las estaciones presenta diferencias con los resultados de Arteaga. De las 51 estaciones comprendidas entre las regiones estudiadas, y de las cuales se tienen resultados tanto en el estudio de Arteaga como en el presente, 45 estaciones presentan variaciones en sus PG. A continuación, se detallan por región, con el grado de variación indicado en negrita las estaciones que sufrieron cambios.

Para una confiabilidad del 50%:

En la Región Metropolitana

- El Yeso Embalse: PG 52-10 → PG **46-10**
- Los Panguiles: PG 58-10 → PG **52-10**
- Pirque: PG 58-10 → PG **52-10**
- Quinta Normal: PG 58-10 → PG **52-10**
- Tobalaba AD: PG 58-10 → PG **52-10**
- Pudahuel: PG 58-10 → PG **52-10**

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

- Convento Viejo: PG 58-10 → PG **52-10**

En la Región del Maule

- Digua Embalse: PG 58-10 → PG **52-10**
- Parral: PG 58-10 → PG **52-10**
- Potrero Grande: PG 58-10 → PG **52-10**
- Talca UC: PG 58-10 → PG **52-10**
- Curicó AD: PG 58-10 → PG **52-10**

En la Región del Ñuble

- Coihueco Embalse: PG 58-10 → PG **52-10**
- Chillán AD: PG 58-10 → PG **52-10**

En la Región del Biobío

- Quilaco: PG 58-10 → PG **52-10**
- Concepción: PG 52-10 → PG **46-10**

En la Región de La Araucanía

- Liucura: PG 58-22 → PG **52-10**
- Lonquimay: PG 58-22 → PG **52-10**
- Puerto Saavedra: PG 52-10 → PG **46-10**
- Teodoro Schmidt: PG 52-10 → PG **46-10**
- Malalcahuello: PG 52-16 → PG **52-10**

En la Región de Los Lagos

- Alto Palena AD: PG 52-10 → PG **46-10**

En la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

- Coyhaique (Escuela agrícola): PG 52-16 → PG **46-10**
- Puerto Puyuhuapi: PG 52-10 → PG **46-10**
- Villa Mañihuales: PG 52-16 → PG **46-10**
- Coyhaique AD: PG 52-16 → PG **46-10**
- Balmaceda AD: PG 52-22 → PG **46-16**
- Chile Chico AD: PG 52-16 → PG **46-10**
- Lord Cochrane: PG 52-16 → PG **46-10**

En la Región de Magallanes y la Antártica Chilena

- Punta Arenas: PG 46-16 → PG **46-10**
- Torres del Paine: PG 46-22 → PG **46-16**

Punta Arenas AP: PG 46-22 → PG **46-16**

Para una confiabilidad del 98%:

En la Región Metropolitana

- El Yeso Embalse: PG 58-22 → PG **58-16**
- Los Panguiles: PG 64-10 → PG **58-10**
- Melipilla: PG 64-10 → PG **58-10**
- Pirque: PG 64-16 → PG **58-10**
- Quinta Normal: PG 64-10 → PG **58-10**
- Tobalaba AD: PG 64-10 → PG **58-10**
- Pudahuel: PG 64-10 → PG **58-10**

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

- Convento Viejo: PG 64-10 → PG **58-10**

En la Región del Maule

- Digua Embalse: PG 64-16 → PG **58-10**
- Colorado: PG 64-16 → PG **58-16**
- Parral: PG 64-10 → PG **58-10**
- Potrero Grande: PG 64-16 → PG **58-10**
- Talca UC: PG 64-16 → PG **58-10**
- Curicó AD: PG 64-10 → PG **58-10**

En la Región del Ñuble

- Coihueco Embalse: PG 64-16 → PG **64-10**
- Chillán AD: PG 64-16 → PG **58-10**

En la Región del Biobío

- Quilaco: PG 64-16 → PG **58-10**
- Concepción: PG 58-10 → PG **52-10**

En la Región de La Araucanía

- Liucura: PG 64-28 → PG **58-22**
- Lonquimay: PG 64-28 → PG **58-16**
- Pucón: PG 64-10 → PG **58-10**
- Puerto Saavedra: PG 58-10 → PG **52-10**
- Malalcahuello: PG 58-22 → PG **58-16**
- Traiguén: PG 64-16 → PG **58-10**
- Temuco AD: PG 64-16 → PG **58-10**

En la Región de Los Ríos

- Valdivia AD: PG 58-16 → PG **58-10**

En la Región de Los Lagos

- Adolfo Matthei: PG 58-16 → PG **58-10**
- Osorno AD: PG 58-16 → PG **58-10**
- Puerto Montt AP: PG 58-16 → PG **52-10**

En la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

- Coyhaique (Escuela agrícola): PG 58-22 → PG **52-16**
- Puerto Puyuhuapi: PG 58-16 → PG **52-10**
- Villa Mañihuales: PG 58-22 → PG **58-16**
- Puerto Aysén AD: PG 58-16 → PG **52-10**
- Coyhaique AD: PG 58-22 → PG **52-16**
- Balmaceda AD: PG 58-34 → PG **52-22**
- Chile Chico AD: PG 58-22 → PG **52-16**
- Lord Cochrane: PG 58-22 → PG **52-16**

En la Región de Magallanes y la Antártica Chilena

- Punta Arenas: PG 52-22 → PG **46-16**
- Torres del Paine: PG 52-28 → PG **52-22**
- Punta Arenas AP: PG 52-28 → PG **46-22**
- Puerto Williams: PG 46-22 → PG **46-16**

## 5 DETERMINACIÓN GRADO PG SEGÚN SOFTWARE LTPPBIND 3.1 BASADO EN DAÑO

El modelo LTPPBIND 3.1 basado en daño, es una metodología mejorada para el cálculo del grado de desempeño de la alta temperatura, considera la variable relacionada al periodo en que un pavimento se encuentra expuesto a altas temperaturas (DD), esto debido a que, por ejemplo, dos zonas pueden tener una temperatura máxima promedio similar lo que puede implicar tener un PG similar según la metodología LTPPBIND 2.1, pero al tener una extensión diferente en la duración de los periodos calurosos, el daño que presentara el pavimento expuesto a un periodo de calor mayor será mayor provocando una mayor formación de ahuellamiento (falla principal por temperatura máxima del pavimento).

La siguiente figura muestra el promedio de los últimos 20 años con datos de los siete días consecutivos más calurosos de cada año (variable utilizada para el cálculo de la alta temperatura en el método LTPPBind 2.1), para las estaciones de Melipilla en la Región Metropolitana y Lonquimay en la Región de La Araucanía. En la figura se aprecia que Lonquimay presenta un promedio anual mayor al de Melipilla

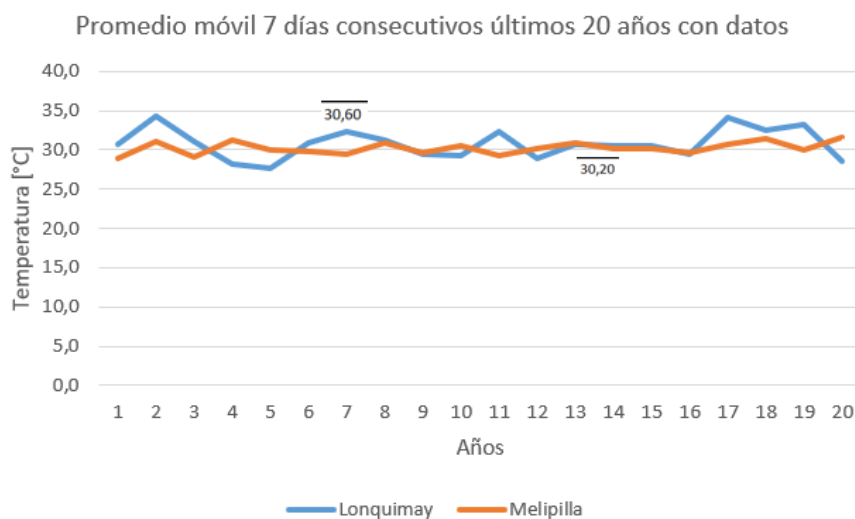


Figura 5- 1: Comparación temperatura máxima anual entre estación Melipilla y Lonquimay.

La tabla 5 -1, muestra el cálculo del PG teórico según el modelo LTPPBind 2.1, ambas estaciones tienen el mismo PG teórico tanto para una confiabilidad del 50% como para una confiabilidad del 98%. No obstante, la figura 5- 2, muestra las temperaturas diarias del periodo caluroso de ambas estaciones para el periodo entre noviembre de 2011 y marzo de 2012, en esta se ve que si bien la estación Lonquimay presenta la temperatura máxima 37°C contra el 34,8°C de Melipilla el 75% de los días la temperatura máxima es mayor que 25°C en el caso de Melipilla, mientras que en Lonquimay representan el 46%. En estos casos es cuando el modelo LTPPBind 2.1 no representa la realidad, ya que el ahuellamiento será menor en el caso de Lonquimay y no hace necesario el uso de un ligante tan rígido.

Tabla 5 - 1: Ejemplo asignación de grado de desempeño entre estación Melipilla y Lonquimay según LTPP 2.1.

	T°Máx promedio 7 días	Desv. Máx aire	Temperatura del pavimento		PG Teórico LTPP2.1	
			50%	98%	50%	98%
			T° Máx	T°Máx	Alta	Alta
MELIPILLA	30,20	0,76	51,07	57,53	52	58
LONQUIMAY	30,60	1,89	49,46	56,33	52	58

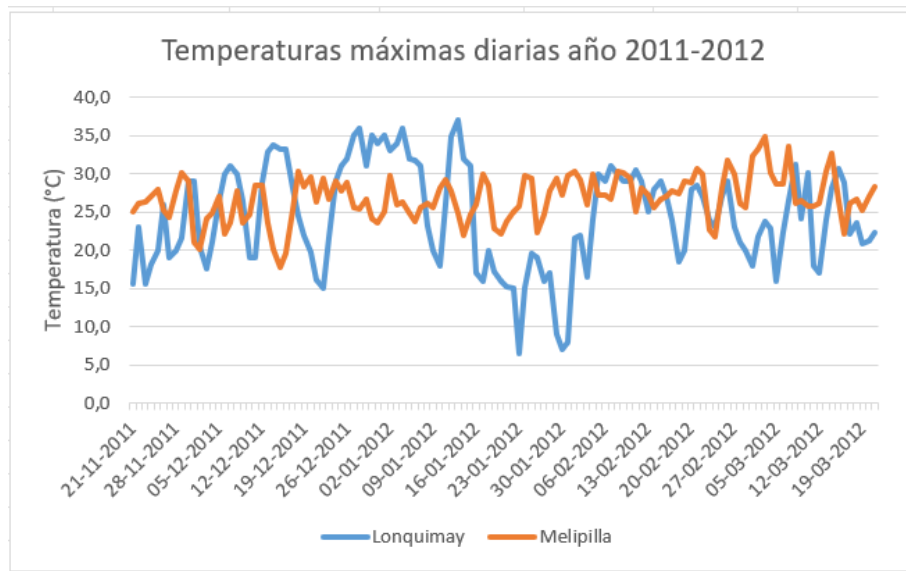


Figura 5- 2: Comparación temperaturas máximas diarias entre estación Melipilla y Lonquimay para los meses de noviembre de 2011 a marzo del 2012.

Es por esto por lo que se incluye la variable Grados-días sobre 10°C ( $DD_{aire}$ ) para el cálculo de la alta temperatura con el método LTPPBind 3.1. La tabla 5- 2, muestra los resultados obtenidos a partir de este método.

Tabla 5 - 2: Ejemplo asignación de grado de desempeño entre estación Melipilla y Lonquimay según LTPP 3.1.

	DD promedio [1000°C-Días]	Temperatura del pavimento		PG Teórico LTPP3.1	
		50%	98%	50%	98%
		T° Máx	T°Máx	Alta	Alta
MELIPILLA	2852,58	55,32	56,45	58	58
LONQUIMAY	2160,68	48,97	50,79	52	52

## 5.1 Estaciones climáticas a utilizar

Las estaciones utilizadas para determinar los grados de desempeño (PG) según método LTPPBind 3.1 basado en daño son las mismas utilizadas en el punto 4.1 de este estudio para el cálculo según LTPPBind 2.1.

Para el cálculo de la variable Grados-Días sobre 10°C (DD) se utiliza la suma acumulada de las temperaturas sobre 10°C durante los 6 meses más calurosos del año, en este estudio se utilizaron las temperaturas entre los meses de noviembre y abril (182 días). Al igual que en el caso del método LTPPBind 2.1 para que un año sea considerado apto para el estudio y evitar la incertidumbre debe cumplir con los mismos criterios descritos en el paso 4.1.

La tabla 5- 3, muestra los años válidos una vez aplicados los criterios, en verde, los años con datos que cumplen los criterios antes mencionados, en rojo, los años con datos que no cumplen con los criterios y en blanco los años en que no se tienen datos.

Tabla 5 - 3: Años válidos por estación para alta temperatura una vez aplicados los criterios 1,2 y 3.

Estación	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Total años							
1 CERRO CALAN																																																33			
2 ELYESO EMBALSE																																																		47	
3 LAGUNAS ADELGO																																																		27	
4 LOS PANGUILLES																																																		34	
5 MELIPILLA																																																		26	
6 PIRQUE																																																		42	
7 COMVENTO VIEJO																																																		40	
8 RENGO																																																		33	
9 ANCO EMBALSE																																																		46	
10 COLCHADO																																																		41	
11 DIGUA EMBALSE																																																		41	
12 PAPRAL																																																		40	
13 PRINCHALE																																																		31	
14 POTRERO GRANDE																																																		43	
15 FALCÓN																																																		32	
16 CAPACOL																																																		25	
17 COMPLEJO EMBALSE																																																		36	
18 FIGUILLIN																																																		52	
19 BULACÓ																																																		41	
20 LUQUILA																																																		25	
21 LONGUMAY																																																		26	
22 MALCACHUELO																																																		23	
23 PUCÓN																																																		32	
24 PUERTO SAavedra																																																		28	
25 FEDORO SCHMIDT																																																		26	
26 TRAUQUÉN																																																		33	
27 TRICALCO																																																			23
28 ADOLFO MATHE																																																		36	
29 COYAHUE ESCUELA AGRICOLA																																																			28
30 PUERTO URRUTIA																																																			21
31 VILLAMARINALES																																																			21
32 PUNTA ARENAS																																																		43	
33 TOPES DEL PANDE																																																		38	
34 GUANTANARVAL SANTIAGO																																																		54	
35 EDOGDO SANCHEZ TOBALCABA																																																		49	
36 PUQUELÉN SANTIAGO																																																		56	
37 GENERAL FREIRE CURICO																																																		61	
38 BERNARDO O'HIGGINS CHILAN																																																		60	
39 CARABEL SUR CONCEPCIÓN																																																		57	
40 MARIA DOLORES LOS ANGELES																																																		28	
41 MANQUEBUQUE TEMUCO																																																		53	
42 PICHAY VALDIVIA																																																		55	
43 CANAL BAJO OSORNIO																																																		53	
44 EL TERRAL PUERTO MONTT AP																																																		58	
45 FOTUCUQUAN																																																		44	
46 ALTO PALENA																																																		34	
47 PUERTO AYSEN																																																		62	
48 TENENIENTE VIDAL COYAHUE																																																		63	
49 BALMAEDA																																																		51	
50 CHILECHICO																																																		45	
51 LORO OCHOFRANES																																																		58	
52 CARLOS IBÁÑEZ PUNTA ARENAS AP																																																		31	
53 GUARDIA MARINA ZANARTU PUERTO WILLIAMS																																																			31

## 5.2 Cálculo temperatura máxima y mínima del pavimento y asignación de grado de desempeño (PG) a estaciones estudiadas según método LTPPBind 3.1

Para la asignación del grado de desempeño (PG) de cada estación se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Determinar la temperatura mínima absoluta de cada año y calcular el promedio entre los valores obtenidos.
- 2) Calcular la desviación estándar entre las temperaturas mínimas anuales obtenidas (valores utilizados en el punto 1) para el cálculo del promedio).
- 3) Calcular la variable DD (Grados-Días sobre 10°C) para cada año y calcular el promedio entre los valores obtenidos.
- 4) Calcular las variables  $PG_d$  y  $CV_{pg}$  para cada estación de estudio mediante las fórmulas 5- 1 y 5- 2

$$PG_{H,d} = 48,2 + 14DD - 0,96 * DD^2 - 2RD$$

(Formula 5- 1)

Donde:

$PG_{H,d}$ : Grado de desempeño basado en daño estimado [°C]

DD: Promedio anual Grados – Días del aire sobre 10°C [1000°C – Días]

RD: Profundidad del ahuellamiento permitido (5 – 13 mm)

$$CV_{PG} = 0,000034 (Lat - 20)^2 * RD^2$$

(Formula 5- 2)

Donde:

$CV_{PG}$ : Coeficiente de variación anual del PG [%]

Lat: Latitud geográfica de la estación en estudio en grados

Para el estudio se utiliza un ahuellamiento permitido  $RD = 12,5[mm]$ , valor utilizado por el software LTPP 3.1 y recomendado por AASHTO 2015 MEPDG para carreteras principales

- 5) Determinar el grado de alta temperatura para cada confiabilidad según la fórmula 5- 3:

$$PG_{H,conf} = PG_{H,d} + (Z)(PG_{H,d}) \frac{CV_{PG}}{100}$$

(Formula 5- 3)

Donde:

$PG_{H,conf}$ : Grado de alta temperatura para cierta confiabilidad [°C]

$CV_{PG}$ : Coeficiente de variación anual del PG [%]

$Z$ : Variable estándar de la distribución normal

$PG_{H,d}$ : Grado de desempeño basado en daño [°C]

Para una confiabilidad del 50%,  $Z = 0$ . Para una confiabilidad del 98%,  $Z = 2,055$ .

- 6) Calcular la temperatura mínima del pavimento en la superficie utilizando el método implementado en LTPPBIND 2.1 (Punto 4.2 del presente estudio).

### Baja temperatura

$$T_{L,pav} = -1,56 + 0,72 * T_{aire} - 0,0004 * Lat^2 + 6,26 * Log_{10}(H + 25) - Z * (4,4 + 0,52 * (\sigma_{AIRE})^2)^{0,5}$$

(Formula 5- 4)

Donde:

$T_{L,pav}$ : Temperatura mínima del Pavimento en la superficie en [°C]

$T_{Aire}$ : Temperatura mínima del aire en [°C] (Punto 1)

$Lat$ : Latitud de la estación en estudio en grados

$H$ : Profundidad a la superficie en [mm]

$\sigma_{AIRE}$ : Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en [°C] (Punto 2)

$Z$ : Variable estándar de la distribución normal

Para una confiabilidad del 50%,  $Z = 0$ . Para una confiabilidad del 98%,  $Z = 2,055$ .

- 7) Asignar el grado de desempeño PG a cada estación según las temperaturas del pavimento obtenidas en el punto 5) para alta temperatura y punto 6) para baja temperatura, según lo siguiente:

- Grado de alta temperatura: Se le asigna el grado PG superior más cercano.
- Grado de baja temperatura: Se le asigna el grado PG inferior más cercano.

En la tabla 5- 4 se detalla cada estación con su respectivo DD. La tabla 5- 5 muestra cada estación con su respectivo PG.

Tabla 5 - 4: Grados-Días (DD) para cada estación de estudio.

Estaciones			
Región	Nombre	Grados días sobre 10°C promedio [°C-Días]	
1	RM	CERRO CALÁN	3257,04
2		EL YESO EMBALSE	1599,68
3		LAGUNA ACULEO	3357,48
4		LOS PANGUILES	3108,22
5		MELIPILLA	2852,58
6		PIRQUE	3036,84
7	LI	CONVENTO VIEJO	2957,55
8		RENGO	3027,67
9	ML	ANCOA EMBALSE	2642,34
10		COLORADO	2590,97
11		DIGUA EMBALSE	2721,81
12		PARRAL	2929,92
13		PENCAHUE	3290,00
14		POTRERO GRANDE	2807,64
15	NB	TALCA UC	3040,44
16		CARACOL	2460,92
17		COIHUECO EMBALSE	2861,54
18	BI	DIGUILLÍN	2298,04
19		QUILACO	2666,21
20	AR	LIUCURA	2187,38
21		LONQUIMAY	2154,84
22		MALALCAHUELLO	1702,11
23		PUCÓN	2007,12
24		PUERTO SAAVEDRA	1546,00
25		TEODORO SCHMIDT	1949,16
26		TRAIQUÉN	2241,10
27	TRICAUCO	2030,69	
28	LL	ADOLFO MATTHEI	1940,34
29	AI	COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	1292,74
30		PUERTO PUYUHUAPI	1155,48
31	MA	VILLA MAÑIHUALES	1470,21
32		PUNTA ARENAS	664,45
33		TORRES DEL PAINE	932,85
34	RM	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	3188,19
35		EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	3122,93
36		PUDAHUEL, SANTIAGO	3189,51
37	ML	GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	3005,92
38	NB	BERNARDO OHIGGINS, CHILLÁN AD	2834,71
39	BI	CARRIEL SUR, CONCEPCIÓN	1966,27
40		MARÍA DOLORES, LOS ANGELES AD	2802,85
41	AR	MANQUEHUE, TEMUCO AD	2165,97
42	LR	PICHOY, VALDIVIA AD	2003,72
43	LL	CAÑAL BAJO, OSORNO AD	1861,31
44		EL TEPUAL, PUERTO MONTT AP	1434,14
45		FUTALEUFÚ AD	1652,51
46		ALTO PALENA AD	1569,28
47	AI	PUERTO AYSÉN AD	1121,49
48		TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	1326,36
49		BALMACEDA, AD	1123,08
50		CHILE CHICO AD	1808,78
51		LORD COCHRANE AD	1450,11
52	MA	CARLOS IBAÑEZ, PUNTA ARENAS AP	635,45
53		GUARDIA MARINA ZAÑARTU, PUERTO WILLIAMS AD	518,01

Tabla 5 - 5: Clasificación SUPERPAVE por estación según modelo LTPPBind 3.1.

Región	Estaciones		DD promedio [1000° C-Días]	Latitud	Temperatura del pavimento				PG Modelo de daño LTPP 3.1					
	Nombre	T Máx			T Mín	T Máx	T Mín	Alta	Baja	Alta	Baja			
1														
2		CEFRIO CALÁN	3,28	-33,3950	58,61	2,70	53,76	-1,88	64	64	-10	64	46	-16
3		EL YESO EMBALSE	1,60	-33,6767	43,14	-4,91	44,02	-10,19	46	46	-10	46	46	-16
4	RM	LAGUNA ACULEO	3,36	-33,8858	53,38	-0,43	60,63	-5,42	64	64	-10	64	64	-10
5		LOS PANGUILLES	3,11	-33,4386	57,44	1,93	58,57	-2,84	58	58	-10	64	64	-10
6		MELPILLA	3,04	-33,6803	55,32	2,15	56,45	-2,44	58	58	-10	58	58	-10
7		PIRQUE	3,04	-33,6736	56,86	-0,66	58,02	-5,57	58	58	-10	64	64	-10
8	LI	CONVENTO VIEJO	2,96	-34,7694	56,21	0,84	57,55	-3,90	58	58	-10	58	58	-10
9		FRENGO	3,03	-34,3817	56,79	0,01	58,07	-4,88	58	58	-10	64	64	-10
10		ANCOA EMBALSE	2,64	-35,9106	53,49	0,30	54,97	-4,94	58	58	-10	58	58	-10
11		COLORADO	2,89	-36,6381	53,03	-3,65	54,44	-10,46	58	58	-10	58	58	-16
12	ML	DIGUA EMBALSE	2,72	-36,2568	54,19	-0,80	55,76	-5,78	58	58	-10	58	58	-10
13		PARRAL	2,93	-36,1878	56,98	-0,14	57,58	-5,27	58	58	-10	58	58	-10
14		PENCACHUE	3,29	-35,3725	58,87	-0,05	60,39	-4,77	64	64	-10	64	64	-10
15		POTRERO GRANDE	2,81	-35,1833	54,94	-1,79	56,32	-6,71	58	58	-10	58	58	-10
16		TALCAUC	3,04	-35,4358	56,89	-0,35	58,37	-5,04	58	58	-10	64	64	-10
17	MB	CARACOL	2,46	-36,6511	51,84	0,52	53,41	-4,63	52	52	-10	58	58	-10
18		COIHUECO EMBALSE	2,86	-36,6408	55,40	-1,64	57,08	-6,83	58	58	-10	58	58	-10
19	BI	DIGUILÍN	2,30	-36,8686	50,30	-0,69	51,87	-5,79	52	52	-10	52	52	-10
20		QUILACO	2,67	-37,6850	53,70	-2,31	55,54	-7,16	58	58	-10	58	58	-10
21		LIUCURA	2,19	-38,6517	49,23	-8,43	51,10	-17,09	52	52	-10	52	52	-22
22		LONGUMAY	2,15	-38,4536	48,91	-6,50	50,73	-13,70	52	52	-10	52	52	-16
23		MALALCAHUELLO	1,70	-38,4703	44,25	-5,06	45,90	-10,80	46	46	-10	46	46	-16
24	AR	PUCÓN	2,01	-39,2753	47,43	-0,78	49,36	-5,32	52	52	-10	52	52	-10
25		PUERTO SAAYEDRA	1,95	-38,7886	42,95	0,09	44,19	-4,88	46	46	-10	46	46	-10
26		TEODORO SCHMIDT	1,95	-39,0278	46,84	-0,92	48,69	-6,42	52	52	-10	52	52	-10
27		TRAIQUÉN	2,24	-38,2561	49,75	-1,47	51,56	-6,81	52	52	-10	52	52	-10
28	LL	TRICAUCO	2,03	-38,8439	47,67	-2,01	49,52	-7,07	52	52	-10	52	52	-10
29		ADOLFO MATTHEI	1,94	-40,5883	46,75	-2,78	48,91	-7,47	52	52	-10	52	52	-10
30		COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	1,29	-45,5739	39,69	-8,68	42,53	-16,24	46	46	-10	46	46	-16
31	AI	PUERTO PUYUHUAPI	1,16	-44,3228	38,09	-4,12	40,56	-8,91	46	46	-10	46	46	-10
32		VILLA MANIHUALES	1,47	-45,1733	41,71	-6,66	44,59	-12,59	46	46	-10	46	46	-16
33	MA	PUNTA ARENAS	0,86	-53,1233	32,08	-9,21	36,92	-14,40	46	46	-10	46	46	-16
34		TORRES DEL PAINE	0,93	-51,1842	35,42	-11,50	39,19	-17,35	46	46	-16	46	46	-22
35	RM	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	3,19	-33,4450	58,08	1,95	59,22	-3,18	64	64	-10	64	64	-10
36		EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	3,12	-33,4563	57,96	1,42	58,70	-3,15	58	58	-10	64	64	-10
37	ML	PUDAHUEL, SANTIAGO	3,19	-33,6561	58,09	0,00	59,27	-4,76	64	64	-10	64	64	-10
38	MB	GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	3,01	-34,9694	56,61	5,04	57,99	0,33	58	58	-10	58	58	-10
39	BI	BERNARDO O'HIGGINS, CHILLÁN AD	2,63	-36,6868	55,17	-0,97	56,83	-5,67	58	58	-10	58	58	-10
40		CARRIEL SUR, CONCEPCIÓN	1,97	-36,7806	47,02	0,85	48,46	-3,69	52	52	-10	52	52	-10
41	AR	MARÍA DOLORES, LOS ANGELES AD	2,80	-37,3969	54,90	-1,86	56,71	-6,51	58	58	-10	58	58	-10
42	LR	MANQUEHUE, TEMUCO AD	2,17	-38,7700	49,02	-1,92	50,91	-6,51	52	52	-10	52	52	-10
43		PICHOTY, VALDIVIA AD	2,00	-39,6567	47,40	-1,98	49,40	-6,64	52	52	-10	52	52	-10
44	LL	CAÑAL BAJO, OSORNIO AD	1,86	-40,6144	45,93	-3,22	48,06	-7,83	46	46	-10	52	52	-10
45		EL TEPUAL, PUERTO MONITT AP	1,43	-41,4475	41,30	-2,78	43,38	-7,39	46	46	-10	46	46	-10
46		FUTALEFU AD	1,65	-43,1889	43,71	-5,53	46,28	-10,51	46	46	-10	46	46	-16
47		ALTO PALEMA AD	1,57	-43,6118	42,81	-5,23	45,41	-10,33	46	46	-10	46	46	-16
48		PUERTO AYSEN AD	1,12	-45,3994	37,69	-4,73	40,35	-9,46	46	46	-10	46	46	-10
49	AI	TEMINTE VIDAL, COYHAIQUE AD	1,33	-46,5908	40,08	-8,97	42,95	-16,74	46	46	-10	46	46	-16
50		BALMACEDA AD	1,12	-45,9183	37,71	-13,07	40,48	-21,43	46	46	-16	46	46	-22
51		CHILE CHICO AD	1,81	-46,5850	45,38	-7,75	48,88	-13,10	46	46	-10	52	52	-16
52		LORD COCHRANE AD	1,45	-47,2439	41,48	-8,36	44,84	-14,06	46	46	-10	46	46	-16
53	MA	CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS AP	0,84	-53,0017	31,71	-10,60	35,48	-16,09	46	46	-16	46	46	-22
		GUARDIA MARINA ZANARTU, PUERTO VILL	0,82	-54,3917	30,19	-10,49	34,22	-15,41	46	46	-16	46	46	-16

### 5.3 Asignación de ligantes tradicionales a cada estación por región

La asignación de los ligantes tradicionales que cumplen con lo requerido en cada estación se realiza según lo descrito en el punto 4.3 del presente trabajo.

#### 5.3.1 Región Metropolitana

Tabla 5 - 6: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región Metropolitana según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
CERRO CALÁN	-33,3950	-70,5367	64	-10	31				64	-10	31			
EL YESO EMBALSE	-33,6767	-70,0886	46	-10	22				46	-16	19			
LAGUNA ACULEO	-33,8858	-70,8775	64	-10	31				64	-10	31			
LOS PANGUILES	-33,4396	-71,0256	58	-10	28				64	-10	31			
MELIPILLA	-33,6803	-71,1897	58	-10	28				58	-10	28			
PIRQUE	-33,6736	-70,5869	58	-10	28				64	-10	31			
QUINTA NORMAL SANTIAGO	-33,4450	-70,6828	64	-10	31				64	-10	31			
EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	-33,4553	-70,5486	58	-10	28				64	-10	31			
PUDAHUEL, SANTIAGO	-33,6561	-70,7878	64	-10	31				64	-10	31			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5- 3: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región Metropolitana.

### 5.3.2 Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Tabla 5 - 7: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
CONVENTO VIEJO	-34.7694	-71.1331	58	-10	28				58	-10	28			
RENGO	-34.3817	-70.8453	58	-10	28				64	-10	31			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5- 4: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

### 5.3.3 Región del Maule

Tabla 5 - 8: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Maule según modelo LTPP 3.1.

Región	Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1													
				50% Confiabilidad						98% Confiabilidad							
				Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional				
Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34						
ML	ANCOA EMBALSE	-35,9106	-71,2958	58	-10	28						58	-10	28			
ML	COLORADO	-35,6381	-71,5481	58	-10	28						58	-16	25			
ML	DIGUA EMBALSE	-36,2958	-71,5481	58	-10	28						58	-10	28			
ML	PARRAL	-36,1978	-71,8283	58	-10	28						58	-10	28			
ML	PENCAHUE	-35,5725	-71,6325	64	-10	31						64	-10	31			
ML	POTRERO GRANDE	-36,1833	-71,0878	58	-10	28						58	-10	28			
ML	TALCA UC	-36,4368	-71,6197	58	-10	28						64	-10	31			
ML	GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	-34,9694	-71,2169	58	-10	28						58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5- 5: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Maule.

### 5.3.4 Región del Ñuble

Tabla 5 - 9: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Ñuble según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad			Alternativas ligante tradicional			98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico	Alternativas ligante tradicional		Grado de desempeño PG teórico	Alternativas ligante tradicional							
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
CARACOL	-36,8511	-71,3950	52	-10	25				58	-10	28			
COIHUECO EMBALSE	-36,8408	-71,7389	58	-10	28				58	-10	28			
DIGULLÍN	-36,8686	-71,6426	52	-10	25				52	-10	25			
BERNARDO O'HIGGINS, CHILLÁN AD	-36,8888	-72,0367	58	-10	28				58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5- 6: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Ñuble.

### 5.3.5 Región del Biobío

Tabla 5 - 10: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región del Biobío según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
QUILACO	-37,8850	-72,0058	58	-10	28				58	-10	28			
CARRIEL SUR, CONCEPCIÓN	-36,7806	-73,0664	52	-10	25				52	-10	25			
MARÍA DOLORES, LOS ANGELES AC	-37,3969	-72,4239	58	-10	28				58	-10	28			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5– 7: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región del Biobío.

### 5.3.6 Región de La Araucanía

Tabla 5 - 11: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de La Araucanía según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
LIUCURA	-38,6517	-71,0919	52	-10	25				52	-22	19			
LONGUIMAY	-38,4536	-71,3742	52	-10	25				52	-16	22			
MALALCAHUELLO	-38,4703	-71,5753	46	-10	22				46	-16	19			
PUCÓN	-39,2753	-71,9503	52	-10	25				52	-10	25			
FUERTO SAAVEDRA	-38,7896	-73,3836	46	-10	22				46	-10	22			
TEODORO SCHMIDT	-39,0278	-73,0781	52	-10	25				52	-10	25			
TRAIQUÉN	-38,2561	-72,6536	52	-10	25				52	-10	25			
TRICAUCO	-38,8439	-71,5514	52	-10	25				52	-10	25			
MANQUEHUE, TEMUCO AD	-38,7700	-72,6369	52	-10	25				52	-10	25			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

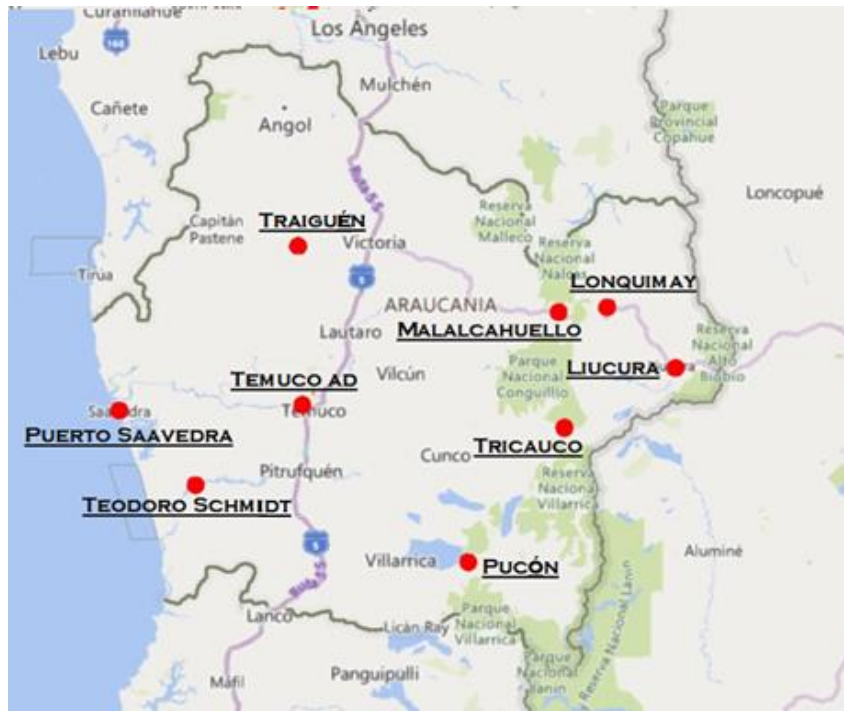


Figura 5- 8: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de La Araucanía.

### 5.3.7 Región de Los Ríos

Tabla 5 - 12: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Los Ríos según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1												
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad						
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	
PICHUY, VALDIVIA AD	-39,6567	-73,0872		52	-10	25				52	-10	25			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

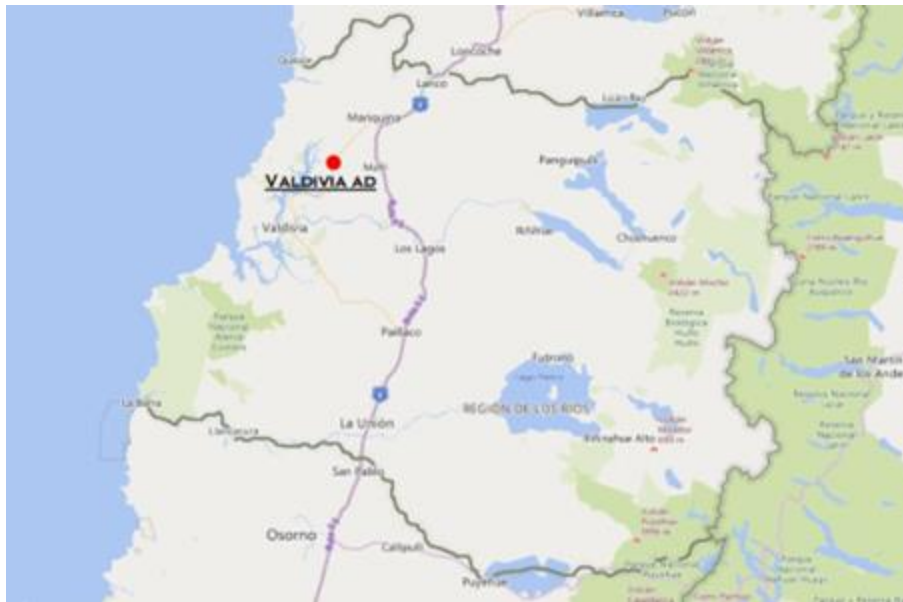


Figura 5- 9: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Los Ríos.

### 5.3.8 Región de Los Lagos

Tabla 5 - 13: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Los Lagos según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
ADOLFO MATTHEI	-40,5883	-73,1069	52	-10	25				52	-10	25			
CAÑAL BAJO, OSORNO AD	-40,6144	-73,0575	46	-10	22				52	-10	25			
EL TEPUAL, PUERTO MONTT AP	-41,4475	-73,0858	46	-10	22				46	-10	22			
FUTALEUFÚ AD	-43,8889	-71,8522	46	-10	22				52	-16	22			
ALTO PALENA AD	-43,6188	-71,8014	46	-10	22				46	-16	19			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5- 10: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Los Lagos.

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

Tabla 5 - 14: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	-45,5739	-72,0286	46	-10	22				46	-16	19			
PUERTO PUYUHUAPI	-44,3228	-72,5597	46	-10	22				46	-10	22			
VILLA MAÑIHUALES	-45,1733	-72,1478	46	-10	22				46	-16	19			
PUERTO AYSÉN AD	-45,3994	-72,6772	46	-10	22				46	-10	22			
TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	-45,5908	-72,1022	46	-10	22				46	-16	19			
BALMACEDA AD	-45,3183	-71,6778	46	-16	19				46	-22	16			
CHILE CHICO AD	-46,5850	-71,6853	46	-10	22				52	-16	22			
LORD COCHRANE AD	-47,2439	-72,5825	46	-10	22				46	-16	19			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.



Figura 5- 11: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

### 5.3.10 Región de Magallanes y la Antártica Chilena

Tabla 5 - 15: Grado de desempeño (PG) y ligantes asignados para cada estación de la Región de Magallanes y la Antártica Chilena según modelo LTPP 3.1.

Estaciones	Ubicación		PG modelo de daño LTPP 3.1											
			50% Confiabilidad						98% Confiabilidad					
			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional			Grado de desempeño PG teórico			Alternativas ligante tradicional		
Nombre	Lat	Long	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34	Alta	Baja	Intermedia	PG 64-22	PG 58-28	PG 52-34
PUNTA ARENAS	-53,1233	-70,8772	46	-10	22				46	-16	19			
TORRES DEL PAINE	-51,1842	-72,9669	46	-16	19				46	-22	16			
CARLOS IBÁÑEZ, PUNTA ARENAS A	-53,0017	-70,8386	46	-16	19				46	-22	16			
GUARDIA MARINA ZANARTU, PUER	-54,9317	-67,6156	46	-16	19				46	-16	19			

Las celdas en colores indican que ligante asfáltico es válido en cada estación, en naranja para un PG 64-22, azul para un PG 58-28 y verde para un PG 52-34.

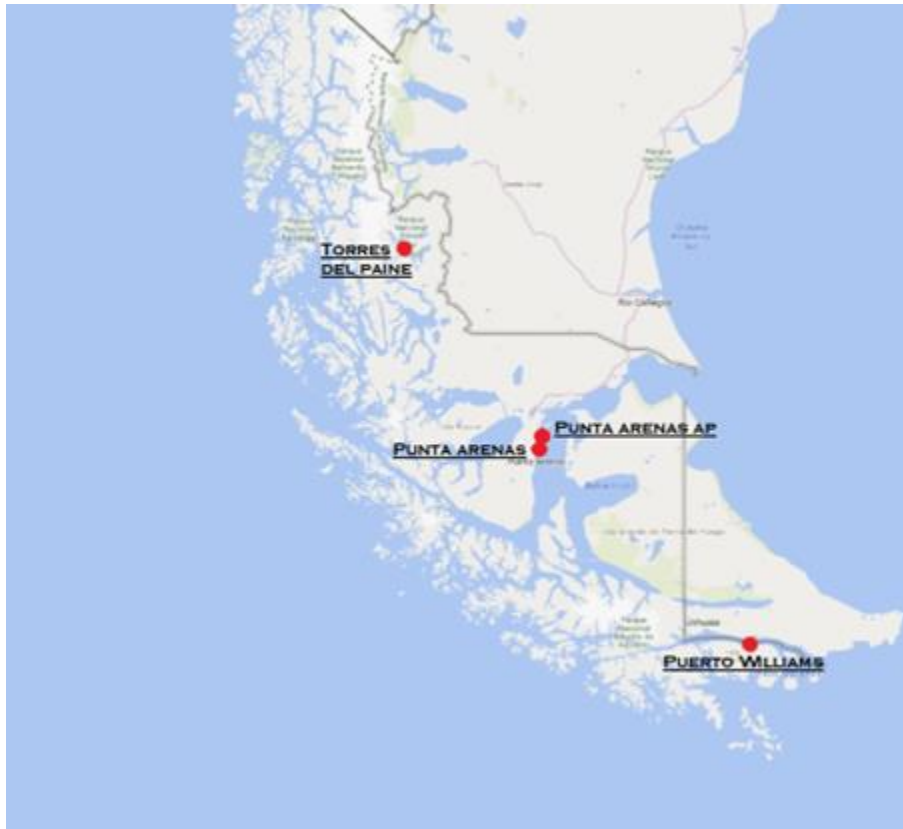


Figura 5- 12: Mapa georreferenciado de las estaciones válidas para LTPP 3.1 para la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

## 5.4 Comparación de resultados

Se realiza una comparación con los resultados obtenidos por Arteaga en 2017 utilizando el método basado en daño LTPPBind 3.1. Al igual que en el punto 4.4 comparación de resultados LTPPBind 2.1, se hará la comparación de los grados de desempeño (PG) de cada estación.

La tabla a continuación muestra los resultados obtenidos en dicho estudio en las regiones entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y La Antártica Chilena y los obtenidos en este trabajo.

Tabla 5 - 16: Comparación grados de desempeño calculados entre la investigación realizada por Arteaga en 2017 y el presente trabajo para LTPP 3.1.

Región	Estaciones Nombre	LTPP 3.1 (Arteaga, 2017)				LTPP 3.1 2023			
		50%		98%		50%		98%	
		Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
RM	CERRO CALÁN	64	-10	64	-10	64	-10	64	-10
	EL YESO EMBALSE	46	-10	46	-22	46	-10	46	-16
	LAGUNA ACULEO	64	-10	64	-10	64	-10	64	-10
	LOS PANGUILES	58	-10	64	-10	58	-10	64	-10
	MELIPILLA	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10
	PIRQUE	58	-10	58	-16	58	-10	64	-10
LI	CONVENTO VIEJO	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10
	RENGO					58	-10	64	-10
ML	ANCOA EMBALSE	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10
	COLORADO	58	-10	58	-16	58	-10	58	-16
	DIGUA EMBALSE	58	-10	58	-16	58	-10	58	-10
	PARRAL	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10
	PENCAHUE	64	-10	64	-10	64	-10	64	-10
	POTRERO GRANDE	58	-10	58	-16	58	-10	58	-10
	TALCA UC	58	-10	64	-16	58	-10	64	-10
NB	CARACOL	58	-10	58	-10	52	-10	58	-10
	COIHUECO EMBALSE	58	-10	58	-16	58	-10	58	-10
	DIGULLÍN	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10
BI	QUILACO	58	-10	58	-16	58	-10	58	-10
AR	LIUCURA	52	-22	52	-28	52	-10	52	-22
	LONQUIMAY	52	-22	52	-28	52	-10	52	-16
	MALALCAHUELLO	46	-16	46	-22	46	-10	46	-16
	PUCÓN	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10
	PUERTO SAAVEDRA	46	-10	46	-10	46	-10	46	-10
	TEODORO SCHMIDT	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10
	TRAIQUÉN	52	-10	52	-16	52	-10	52	-10
TRICAUCO					52	-10	52	-10	
LL	ADOLFO MATTHEI	52	-10	52	-16	52	-10	52	-10
AI	COYHAIQUE (ESCUELA AGRICOLA)	46	-16	46	-22	46	-10	46	-16
	PUERTO PUYIHUAPI	46	-10	46	-16	46	-10	46	-10
	VILLA MANIHUALES	46	-16	46	-22	46	-10	46	-16
MA	PUNTA ARENAS	46	-16	46	-22	46	-10	46	-16
	TORRES DEL PAINE	46	-22	46	-28	46	-16	46	-22
RM	QUINTA NORMAL, SANTIAGO	58	-10	64	-10	64	-10	64	-10
	EULOGIO SANCHEZ, TOBALABA AD	58	-10	64	-10	58	-10	64	-10
	PUDAHUEL, SANTIAGO	58	-10	64	-10	64	-10	64	-10
ML	GENERAL FREIRE, CURICÓ AD	58	-10	58	-10	58	-10	58	-10
NB	BERNARDO O'HIGGINS, CHILLÁN AD	58	-10	58	-16	58	-10	58	-10
BI	CARIEL SUR, CONCEPCIÓN	52	-10	52	-10	52	-10	52	-10
	MARÍA DOLORES, LOS ANGELES AD					58	-10	58	-10
AR	MANQUEHUE, TEMUCO AD	52	-10	52	-16	52	-10	52	-10
LR	PICHOY, VALDIVIA, AD	52	-10	52	-16	52	-10	52	-10
LL	CAÑAL BAJO, OSORNO AD	46	-10	52	-16	46	-10	52	-10
	EL TEPUAL, PUERTO MONTT AP	46	-10	46	-16	46	-10	46	-10
	FUTALEUFÚ AD	46	-10	52	-16	46	-10	52	-16
	ALTO PALENA AD	46	-10	46	-16	46	-10	46	-16
AI	PUERTO AYSÉN AD	46	-10	46	-16	46	-10	46	-10
	TENIENTE VIDAL, COYHAIQUE AD	46	-16	46	-22	46	-10	46	-16
	BALMACEDA AD	46	-22	46	-34	46	-16	46	-22
	CHILE CHICO AD	46	-16	52	-22	46	-10	52	-16
	LORD COCHRANE AD	46	-16	46	-22	46	-10	46	-16
	CARLOS IBAÑEZ, PUNTA ARENAS AP	46	-22	46	-28	46	-16	46	-22
MA	GUARDIA MARINA ZANARTU, PUERTO WIL	46	-16	46	-22	46	-16	46	-16

*Las celdas en verde indican que hubo variación en el grado de desempeño PG en comparación a los resultados de Arteaga, 2017, en blanco las estaciones que no sufrieron variación y en amarillo indican las estaciones que fueron agregada al año 2022.*

Como se observa en la tabla 5- 16, al igual que en la comparación con el método LTPP 2.1, la mayoría de las estaciones presenta diferencias con los resultados de Arteaga. De las 51 estaciones comprendidas entre las regiones estudiadas, y de las cuales se tienen resultados tanto en el estudio de Arteaga como en el presente, 33 estaciones presentan variaciones en sus PG.

A continuación, se detallan por región, con el grado que sufre variación indicado en negrita.

Para una confiabilidad del 50%:

En la Región Metropolitana

- Quinta Normal: PG 58-10 → PG **64-10**.
- Pudahuel: PG 58-10 → PG **64-10**.

En la Región del Ñuble

- Caracol: PG 58-10 → PG **52-10**.

En la Región de La Araucanía

- Liucura: PG 52-22 → PG **52-10**.
- Lonquimay: PG 52-22 → PG **52-10**.
- Malalcahuello: PG 46-16 → a PG **46-10**.

En la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

- Coyhaique (Escuela agrícola): PG 46-16 → PG **46-10**.
- Villa Mañihuales: PG 46-16 → PG **46-10**.
- Coyhaique: PG 46-16 → PG **46-10**.
- Balmaceda AD: PG 46-22 → PG **46-16**.
- Chile Chico AD: PG 46-16 → PG **46-10**.
- Lord Cochrane AD: PG 46-16 → PG **46-10**.

En la Región de Magallanes y la Antártica Chilena

- Punta Arenas: PG 46-16 → PG **46-10**.
- Torres del Paine: PG 46-22 → PG **46-16**.
- Punta Arenas AP: PG 46-22 → PG **46-16**.

Para una confiabilidad del 98%:

En la Región Metropolitana

- El Yeso Embalse: PG 46-22 → PG **46-16**.
- Pirque: PG 58-16 → PG **64-10**.

En la Región del Maule

- Digua Embalse: PG 58-16 → PG **58-10**.
- Potrero Grande: PG 58-16 → PG **58-10**.

- Talca UC: PG 64-16 → PG 64-**10**.

En la Región del Ñuble

- Coihueco Embalse: PG 58-16 → PG 58-**10**.
- Chillán AD: PG 58-16 → PG 58-**10**.

En la Región del Biobío

- Quilaco: PG 58-16 → PG 58-**10**.

En la Región de La Araucanía

- Liucura: PG52-28 → PG 52-**22**.
- Lonquimay: PG 52-28 → PG 52-**16**.
- Malalcahuello: PG 46-22 → PG 46-**16**.
- Traiguén: PG 52-16 → PG 52-**10**.
- Temuco AD: PG 52-16 → PG 52-**10**.

En la Región de Los Ríos

- Valdivia AD: PG 52-16 → PG 52-**10**.

En la Región de Los Lagos

- Adolfo Matthei: PG 52-16 → PG 52-**10**.
- Osorno AD: PG 52-16 → PG 52-**10**.
- Puerto Montt AP: PG 46-16 → PG 46-**10**.

En la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

- Coyhaique (Escuela agrícola): PG 46-22 → PG 46-**16**.
- Puerto Puyuhuapi: PG 46-16 → PG 46-**10**.
- Villa Mañihuales: PG 46-22 → PG 46-**16**.
- Puerto Aysén AD: PG 46-16 → PG 46-**10**.
- Coyhaique AD: PG 46-22 → PG 46-**16**.
- Balmaceda AD: PG 46-34 → PG 46-**22**.
- Chile Chico AD: PG 52-22 → PG 52-**16**.
- Lord Cochrane AD: PG 46-22 → PG 46-**16**.

En la Región de Magallanes y la Antártica Chilena

- Punta Arenas: PG 46-22 → PG 46-**16**.
- Torres del Paine: PG 46-28 → PG 46-**22**.
- Punta Arenas AP: PG 46-28 → PG 46-**22**.
- Puerto Williams: PG 46-22 → PG 46-**16**.

## 6 COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

- Se recopiló información histórica de las estaciones climáticas desde la Dirección Meteorológica de Chile y la Dirección General de Aguas, con la cual se logró el objetivo de presentar una actualización de los grados de desempeño (PG) al año 2022 para la zona centro-sur de Chile comprendida entre la Región Metropolitana y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, incorporando tres estaciones climáticas que cumplen con los requisitos SUPERPAVE.: Rengo, Tricauco y Los Ángeles.
- Para cada una de las estaciones se calculó el grado de performance (PG) mediante los modelos de cálculo de grados de desempeño LTPP 2.1 y LTPP 3.1. Esto permitió cubrir la totalidad de la zona centro-sur de Chile con tres ligantes asfálticos tradicionales: PG 64-22, PG58-28 y PG52-34, sin embargo, es importante señalar que únicamente fue considerada la temperatura de la zona, por lo tanto, los ligantes seleccionados son válidos para ser utilizados en pavimentos asfálticos con un nivel de tránsito en la pista de diseño menor a 3 millones de ejes equivalentes y una velocidad promedio mayor a 70 km/h. P
- En comparación con los resultados obtenidos por Arteaga en 2017, se observan diferencias en los PG calculados. En la mayoría de las estaciones climáticas, con LTPP 2.1, se presenta una disminución en el grado de baja y alta temperatura mientras que con LTPP 3.1, la disminución se observa principalmente en la baja temperatura. Esto se debe a 2 factores: el primero es la actualización de las temperaturas al año 2022, lo que implica un aumento en la base datos de hasta nueve años respecto a las utilizadas por Arteaga; el segundo factor es la metodología utilizada para calcular la temperatura del aire. En el presente trabajo, se determinó el valor de temperatura mínima de cada año y luego se aplicó un promedio a esos valores para obtener la temperatura del aire. Por otro lado, Arteaga utilizó la mínima absoluta entre todos los valores, lo que conduce a resultados más conservadores.
- La variación en los grados PG calculados para LTPP 2.1, llevan a cambios en las alternativas de ligantes asfálticos tradicionales válidos respecto a los seleccionados por Arteaga, sin embargo, los ligantes asfálticos tradicionales seleccionados por Arteaga para LTPP 3.1 siguen siendo una alternativa válida para la zona centro-sur de Chile.
- El software LTPPBind utilizado en América del Norte utiliza un promedio entre los valores derivados de la temperatura de las cuatro estaciones climáticas más cercanas a la zona requerida para determinar el PG que cumple con los requerimientos, esto es posible gracias a la robusta red de estaciones climáticas disponibles en EE. UU. y Canadá. En Chile, esto no es posible debido a la escasa red de estaciones climáticas.
- Los cambios identificados en las estaciones climáticas solamente reflejan una comparación utilizando los métodos LTPP 2.1 y LTPP 3.1. Por lo tanto, estos cambios no implican necesariamente modificaciones en la zonificación climática desarrollada por Arteaga, pues

en ella se utilizó una combinación de los métodos SHRP, LTPP 2.1 y LTPP 3.1. Considerando que ninguno de estos tres modelos fue desarrollado para Chile, la utilización de cualquiera de ellos por sí solo no entrega certeza de que las temperaturas son las apropiadas. La zonificación utilizando los tres modelos en conjunto hecha por Arteaga entrega una mayor confiabilidad para el desarrollo de la zonificación climática, por lo que se sugiere a futuro seguir considerando una zonificación que considere los tres modelos, no solamente las temperaturas determinadas en esta memoria.

- La presente memoria da continuidad a estudios previos sobre los grados de desempeño (PG) en Chile, incluyendo investigaciones realizadas por Segovia en 2015 y principalmente la llevada a cabo por Arteaga en 2017. Por ende, resulta útil para futuras investigaciones y actualizaciones sobre el tema, además de poder contribuir en futuras normativas que aborden la metodología SUPERPAVE y la selección de un ligante asfáltico en la zona centro-sur de Chile.

## 7 GLOSARIO

BBR:	Bending Beam Rheometer.
DD:	Degree-Days.
DGA:	Dirección General de Aguas.
DMC:	Dirección Meteorológica de Chile.
DSR:	Dynamic Shear Rheometer.
DTT:	Direct Tension Test.
FHWA:	Federal Highway Administration.
INN:	Instituto Nacional de Normalización.
LTPP:	Long-Term Pavement Performance.
PAV:	Pressure Aging Vessel.
PG:	Performance Grade.
RTFO:	Rolling Thin Film Oven.
RV:	Rotational Viscometer.
SHRP:	Strategic Highway Research Program.
SUPERPAVE:	Superior Performance Asphalt Pavement.

## 8 REFERENCIAS

- Arteaga, L. (2017). *Comparación de Zonificación SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, UTFSM.
- Asphalt Institute. (2003). *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testitng*. Kentucky: Superpave Series N°1 (SP-1).
- Bulnes, C. (2017). *Análisis comparativo de normas SUPERPAVE para ligantes asfálticos*. Memoria para optar a Título de Constructor Civil, UTFSM.
- CEDEX. (s.f.). Obtenido de <https://www.cedex.es/centros-laboratorios/centro-estudios-transporte-cet/equipamientos/descripcion-equipos-laboratorio-materiales-cet>
- Lazo, R. (Septiembre de 2012). *Revista EMB Construcción*. Obtenido de <https://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=1692&ni=metodologia-superpave-para-el-desarrollo-de-pavimentos-asfalticos-de-alto-desempeno>
- Manual de Carreteras. (2022). *Manual de Carreteras, MOP*. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.
- Mohseni, A. (1998). LTPP Seasonal Asphalt Concrete (AC) Pavement Temperature Models.
- Mohseni, A., Carpenter, S., & D'Angelo, J. (2005). *Development of SUPERPAVE High-Temperature Performance Grade (PG) Based on Rutting Damage (With Discussion and Closure)*. Washington D.C: For Presentation at: Asphalt Binder Expert Task Group.
- Neira, V. (2019). *Estudio y caracterización de ligante con clasificación PG58-28 modificado con polímero estireno butadieno (SBS)*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, UTFSM.
- Segovia, M. (2015). *Zonificación SUPERPAVE para Chile y Estudio Preliminar de la influencia del Cambio Climático en el Desempeño de Pavimentos en Chile*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, UTFSM.