

Superpave zoning for Chile

Zonificación superpave para Chile

R. Delgadillo ^{1*}, M. Segovia ^{*}, C. Wahr ^{*}, G. Thenoux ^{**}

* Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso. CHILE

** Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. CHILE

Fecha de Recepción: 02/08/2016

Fecha de Aceptación: 12/12/2016

PAG 25-36

Abstract

In Chile, the selection of asphalt binders is based on traditional specifications. Although the Superpave specification has not been implemented yet, it was considered important to make a zoning process of the Chilean territory according to this methodology. This activity relied on the information of 94 weather stations of the Chilean Meteorological Service (DMC in Spanish) and Chile's Water Department (DGA in Spanish), which have reliable data for a minimum of 20 years. Weather data, together with the Köppen climate classification for Chile and the topography of our territory, were used to define approximate zones where the use of each type of asphalt binder is appropriate. Zoning data indicate that most of our territory can be covered by three types of asphalt binders: for the northern and southern regions the use of PG 58-28 is recommended; the central region requires PG 64-22; and finally, the Patagonia and high mountain zones need PG 52-34. In the IX Region, there is a small area in the Andean foothills, where PG 64-34 is required, according to the available climate information and the methodology applied. Classifications PG 64-22, PG 58-28 and PG 52-34 are traditional binders, which were zoned for high-speed traffic conditions and moderate traffic volume.

Keywords: Pavements' maintenance, superpave, structural layers, asphalt binder, influence of weather station

Resumen

En Chile la selección de ligantes asfálticos se realiza por especificaciones tradicionales. Aunque aún no se implementa la especificación Superpave, se consideró importante realizar una zonificación del territorio chileno según esta metodología. Para esto se utilizó información de 94 estaciones climáticas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y de la Dirección General de Aguas (DGA), las que cuentan con información confiable para un mínimo de 20 años. Los datos meteorológicos, en conjunto con la clasificación climática de Köppen para Chile y la topografía de nuestro territorio, fueron utilizados para definir de manera aproximada las zonas donde es apropiado el uso de cada tipo de ligante asfáltico. Los resultados de la zonificación indican que la mayor parte de nuestro territorio puede cubrirse con tres tipos de ligantes asfálticos: en la zona norte y en el sur del país es recomendable utilizar un PG58-28; para la zona centro se requiere un PG64-22; finalmente para la Patagonia y alta montaña se necesita un PG52-34. Existe una pequeña zona precordillerana en la novena región donde, de acuerdo a la información climática disponible y la metodología utilizada, se requeriría un PG64-34. Las clasificaciones PG64-22, PG58-28 y PG52-34 corresponden a ligantes tradicionales y fueron zonificados para condiciones de circulación de alta velocidad y volúmenes de tránsito moderado.

Palabras clave: Mantenimiento de los pavimentos, superpave, capas estructurales, ligantes asfálticos, influencia de estaciones climáticas

1. Introducción

Las necesidades de mantenimiento de los pavimentos dependen significativamente de una adecuada selección de materiales para las respectivas capas estructurales. Los ligantes asfálticos son materiales susceptibles térmicamente, es decir, su desempeño depende fuertemente del clima donde se utilicen. Por ejemplo, un ligante puede tener rigidez suficiente para resistir ahuellamiento en una zona fría, pero puede tener un mal desempeño ante este deterioro en una zona cálida. Durante los últimos años se han realizado en Chile importantes investigaciones acerca de la influencia del clima y la caracterización avanzada de materiales asfálticos en el desempeño y mantenimiento de los pavimentos flexibles (Delgadillo et al., 2011; Araya et al., 2012; Delgadillo et al., 2014; García et al., 2014; Osorio et al., 2015).

Considerando lo anterior, en 1987, el Strategic Highway Research Program SHRP (Kennedy et al., 1994) de los Estados Unidos comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos.

El producto final del proyecto de investigación fue un sistema conocido como Superpave (SUPERIOR PERFORMING ASPHALT PAVEMENTS). Las principales diferencias y ventajas de las nuevas especificaciones respecto de las especificaciones tradicionales son las siguientes:

Se especifica el material para las temperaturas esperadas en terreno

- Se utilizan instrumentos que miden propiedades fundamentales del ligante (reómetros)
- Se considera el envejecimiento de largo plazo del material
- Se considera el efecto del tiempo de carga (de manera indirecta)
- Se considera el efecto del volumen de tránsito (de manera indirecta)

Los ligantes son caracterizados de acuerdo al desempeño esperado ante tres tipos de deterioros: ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico. Como cada una de estas fallas sucede a temperaturas distintas, la denominación de un asfalto cuenta con tres temperaturas características, expresadas en grados Celsius. Por ejemplo, un ligante etiquetado como PG64-22 tiene las siguientes propiedades:

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, Valparaíso, Chile

E-mail: rodrigo.delgadillo@usm.cl



- Resiste ahuellamiento a temperaturas de hasta $T_{xx} = 64^{\circ}\text{C}$.
- Resiste agrietamiento térmico para temperaturas de hasta $T_{yy} = -22^{\circ}\text{C}$
- Resiste fatiga para temperaturas menores o iguales a $T_{int} = \frac{64-22}{2} + 4 = 25^{\circ}\text{C}$

Una descripción detallada de las especificaciones, incluyendo los equipos a utilizar y los parámetros a controlar, puede encontrarse en diversas referencias (AASHTO, 2015; Asphalt Institute, 2003; ASTM 2015).

La utilización de las especificaciones Superpave requiere conocer las temperaturas que se esperan en el pavimento en la región donde será construido. Esto permite que se pueda seleccionar el ligante apropiado para esa zona climática. Esto es especialmente importante en un país con una diversidad climática tan amplia como Chile. Esfuerzos previos de zonificación Superpave para ligantes fueron realizados por Vivanco y Bahía (2005) y por Contreras (2007). En el primer trabajo se utilizó información climática general y muy limitada, sin un análisis estadístico de temperaturas extremas a partir de estaciones climáticas, lo que lo constituye más en un ejercicio teórico que en un resultado práctico. El segundo trabajo determinó las temperaturas PG de la zona entre Santiago y Los Ángeles a partir de la información de 38 estaciones climáticas, pero no se realizaron recomendaciones específicas de ligantes tradicionales a utilizar en cada zona.

En el presente trabajo se realiza una zonificación Superpave de todo el territorio chileno continental, basándose en la metodología original del proyecto SHRP (Huber, 1994). Como resultado del trabajo, se presenta una división del territorio en zonas climáticas, asignándole a cada una de ellas su correspondiente ligante asfáltico tradicional.

2. Selección de estaciones climáticas

La información disponible incluía un total de 137 estaciones climáticas con información de temperaturas extremas diarias, 106 provenientes de la Dirección General de Aguas DGA (www.dga.cl) y 31 de la Dirección Meteorológica de Chile DMC (www.meteochile.gob.cl). Sin embargo, para que la información sea representativa y tenga validez estadística para la determinación de las confiabilidades, se debe contar con un mínimo de 20 años consecutivos de información confiable. Por lo que fue necesario aplicar ciertos criterios mínimos de selección, los que son detallados a continuación.

Criterio 1: Determinación de un año completo de datos relevantes

La selección preliminar del grado PG se realiza a partir de las temperaturas extremas, por lo tanto las estaciones a seleccionar deben tener información de calidad de las temperaturas mínimas y máximas. Chile es un país que posee ciclos anuales de temperatura, por lo que se puede asumir que las temperaturas máximas diarias se registrarán en los meses de verano, mientras que las mínimas ocurrirán durante los meses de invierno. Considerando esto, los primeros dos filtros definidos para seleccionar una estación fueron los siguientes:

- Poseer registros de temperatura mínima diaria para el 95% de los días comprendidos entre el 21 de Mayo y el 21 de Septiembre.
- Contar con registros de temperatura máxima diaria para el 95% de los días comprendidos entre el 21 de Noviembre y el 21 de Marzo.

Criterio 2: Días faltantes para la temperatura máxima

La temperatura relevante para el ahuellamiento es la máxima media móvil de siete días consecutivos. Por lo tanto, fue necesario definir un criterio adicional para los días sin información de temperatura máxima, que consistió en descartar todos los años que contaban con dos o más días sin temperatura máxima dentro de algún período de siete días consecutivos. En los años en que hubiera casos de solamente un día sin registro dentro de un período de siete días consecutivos, su valor fue interpolado entre los días anterior y posterior.

Criterio 3: Actualidad de la información

Considerando que el clima ha sufrido cambios significativos durante los últimos 100 años, se consideró que la actualidad de la información también era un criterio relevante para la selección de las estaciones. De este modo, solo se incluyó en la selección final estaciones que, además de cumplir con los criterios 1 y 2, tengan información de que incluya a lo menos hasta el año 2005.

Total de estaciones seleccionadas

El número total de estaciones climáticas que cumplió con los criterios explicados anteriormente fue de 94. Esto significó descartar 43 de las 137 estaciones consideradas originalmente, pero de esta forma se asegura una mayor confiabilidad de la información utilizada.

3. Cálculo del grado PG de las estaciones seleccionadas

Para cada una de las estaciones climáticas seleccionadas se procedió a calcular las temperaturas extremas esperadas en el pavimento, las que definen el grado PG aplicable. Se utilizó las fórmulas originales de la metodología Superpave (Huber, 1994), que generalmente entregan resultados más conservadores que los de las fórmulas del Long Term Pavement Performance (Mohseni, 1998).

En el caso de la temperatura mínima del pavimento, se asume que esta es igual a la temperatura mínima del aire, y los pasos a seguir para cada estación son:

1. Seleccionar el registro de temperatura mínima (aire) diaria para año disponible.
2. Promediar las temperaturas mínimas anuales seleccionadas en el paso 1, lo que define la temperatura mínima para una confiabilidad 50%.
3. Calcular la desviación de los registros seleccionados en el paso 1, lo que permite definir las temperaturas mínimas para otras confiabilidades.

La temperatura máxima del pavimento se calcula a partir de la temperatura máxima del aire utilizando la siguiente fórmula (Huber, 1994):

SPANISH VERSION.....

$$T_{\text{superficie}} = T_{\text{aire}} - 0.00618 * \phi^2 + 0.2289 * \phi + 24.4 \quad (1)$$

Dónde T_{aire} es la máxima temperatura del aire, $T_{\text{superficie}}$ es la máxima temperatura de la superficie del pavimento. Luego se calcula la temperatura a 20 milímetros de profundidad bajo la superficie $T_{20 \text{ mm}}$, que es la relevante para definir el grado PG como sigue:

$$T_{20 \text{ mm}} = 0.955 * T_{\text{superficie}} - 0.8 \quad (2)$$

Donde ϕ es el valor absoluto de la latitud de la estación en grados. Los pasos a seguir para el cálculo de la temperatura máxima de cada estación son:

4. Calcular la temperatura máxima promedio (aire) de siete días consecutivos para cada año.
5. Promediar las temperaturas calculadas en el paso 4, lo que define la temperatura máxima del aire T_{aire} para una confiabilidad 50%.
6. Calcular la desviación de las temperaturas calculadas en el paso 4, lo que permite definir las temperaturas máximas para otras confiabilidades.
7. Calcular la temperatura máxima diaria de la superficie del pavimento $T_{\text{superficie}}$, ingresando en la Ecuación 1 la T_{aire} calculada en el paso 5.
8. Calcular la temperatura máxima a una profundidad de 20 [mm], ingresando en la Ecuación 2 la $T_{\text{superficie}}$ calculada en el paso 7.
9. Calcular la desviación estándar de la temperatura máxima a 20 milímetros de profundidad bajo la superficie, utilizando la desviación estándar de la temperatura del aire calculada en el paso 6, más las Fórmulas 1 y 2.

El grado PGXX-YY con un 50% de confiabilidad para cada estación estará dado por las temperaturas calculadas en los pasos 2 (YY) y 8 (XX). Si se desea una confiabilidad mayor, se debe modificar estas temperaturas utilizando la desviación estándar correspondiente. Por ejemplo, para un 98% de confiabilidad, Superpave recomienda restar 2 veces la desviación estándar calculada en el paso 3 a la temperatura YY y sumar 2 veces la desviación estándar calculada en el paso 9 a la temperatura XX.

La clasificación Superpave considera una escala discreta con incrementos cada 6°C, por lo que las temperaturas obtenidas deben ser aproximadas al grado disponible inmediatamente superior o inmediatamente inferior, según corresponda para la temperatura máxima y mínima respectivamente. Las columnas Txx y Tyy de la Tabla

1 muestran los grados PG de cada estación para las confiabilidades de 50% y 98%.

Las temperaturas extremas Txx y Tyy determinan los requerimientos que deberá cumplir el ligante a utilizar, con el objeto de disminuir la susceptibilidad al ahuellamiento y al agrietamiento térmico. Ambas temperaturas extremas tienen asociada una temperatura intermedia característica de la localidad Tint, que se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$T_{\text{int.}} = \frac{T_{\text{xx}} + T_{\text{yy}}}{2} + 4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

Las columnas Tint de la Tabla 1 muestran la temperatura intermedia característica de cada estación para las confiabilidades de 50% y 98%.

4. Zonificación simplificada utilizando ligantes tradicionales

Selección de ligantes apropiados para cada zona

Los resultados anteriores muestran los requisitos mínimos de temperaturas extremas e intermedias que se deben cumplir los ligantes que se utilizarán en cada localidad. Dada la gran variabilidad climática de nuestro territorio, los requerimientos son bastante variados. Afortunadamente, los ligantes convencionales de buena calidad tienen rangos de PG tales que permiten muchas veces utilizar un mismo ligante asfáltico para varias subzonas climáticas. Típicamente, los ligantes asfálticos tradicionales de calidad aceptable pueden poseer una diferencia entre temperatura máxima y la mínima de alrededor de 86 °C. En los ligantes modificados se puede tener incluso mayores rangos de temperatura. Por ejemplo, ligantes asfálticos típicos sin modificar pueden tener clasificaciones como las siguientes:

- PG 70-16
- PG 64-22
- PG 58-28
- PG 52-34

Para determinar si un ligante es apropiado para un determinado clima, este debe tener una temperatura alta superior a la Txx de la localidad, una temperatura baja inferior a la Tyy de la zona y una temperatura intermedia menor a la Tint del lugar de emplazamiento del proyecto (Kennedy et al., 1994).



Tabla 1. Grado PG y ligante asignado de estaciones seleccionadas (I)

N°	Estaciones	Ubicación			PG									
		ASNM	Lat.	Lon.	50%				98%					
	Nombre				Txx	Tyy	T° Int.	Ligante		Txx	Tyy	T° Int.	Ligante	
1	CHACALLUTA, ARICA	63	-18,3514	-70,3358	58	-10	28	58	-28	58	-10	28	58	-28
2	DIEGO ARACENA IQUIQUE	52	-20,5467	-70,1772	58	-10	28	58	-28	58	-10	28	58	-28
3	EL LOA, CALAMA	2293	-22,4953	-69,9044	52	-16	22	58	-28	58	-22	22	58	-28
4	C° MORENO ANTOFAGASTA	113	-23,4503	-70,4411	52	-10	25	58	-28	58	-10	28	58	-28
5	LA FLORIDA, LA SERENA	142	-29,9172	-71,2003	52	-10	25	64	-22	52	-10	25	64	-22
6	SANTO DOMINGO	75	-33,6550	-71,6142	52	-10	25	64	-22	58	-16	25	64	-22
7	Q. NORMAL, SANTIAGO	527	-33,4450	-70,6828	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
8	E. SANCHEZ, TOBALABA	650	-33,4544	-70,5478	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
9	PUDAHUEL SANTIAGO	480	-33,5419	-70,7944	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
10	GENERAL FREIRE, CURICO	225	-34,9664	-71,2167	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
11	B. O'HIGGINS, CHILLAN	151	-36,5872	-72,0400	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
12	CARRIEL SUR, CONCEPCION	12	-36,7792	-73,0622	52	-10	25	64	-22	58	-16	25	64	-22
13	MANQUEHUE, TEMUCO	92	-38,7700	-72,6369	58	-10	28	64	-22	64	-22	25	64	-22
14	PICHOY, VALDIVIA	18	-39,6511	-73,0817	52	-10	25	64	-22	64	-16	28	64	-22
15	CAÑAL BAJO, OSORNO	61	-40,6050	-73,0608	52	-10	25	58	-28	58	-22	22	58	-28
16	EL TEPUAL PTO. MONTT	85	-41,4350	-73,0975	52	-10	25	58	-28	58	-16	25	58	-28
17	CHAITEN	70	-42,9311	-72,8289	46	-10	22	58	-28	58	-16	25	58	-28
18	FUTALEUFU	350	-43,1892	-71,8492	52	-16	22	58	-28	58	-22	22	58	-28
19	ALTO PALENA	281	-43,6117	-71,8053	52	-16	22	58	-28	58	-22	22	58	-28
20	PUERTO AYSÉN	11	-45,3961	-72,6639	52	-10	25	58	-28	58	-16	25	58	-28
21	TTE. VIDAL, COYHAIQUE	310	-45,5939	-72,1086	52	-22	19	58	-28	58	-28	19	58	-28
22	BALMACEDA (*)	520	-45,9125	-71,6933	52	-28	16	52	-34	58	-40	13	52	-34
23	CHILE CHICO	328	-46,9086	-71,6931	52	-16	22	58	-28	58	-22	22	58	-28
24	LORD COCHRANE	196	-47,2444	-72,5861	52	-22	19	58	-28	58	-28	19	58	-28
25	C. IBAÑEZ, PUNTA ARENAS	39	-53,0050	-70,8439	46	-22	16	52	-34	46	-28	13	52	-34
26	GMZ, PUERTO WILLIAMS	30	-54,9317	-67,6156	46	-16	19	52	-34	46	-22	16	52	-34
27	EL BUITRE AERÓDROMO	110	-18,5119	-70,2842	58	-10	28	58	-28	58	-10	28	58	-28
28	AZAPATA	365	-18,5156	-70,1806	58	-10	28	52	-34	58	-10	28	58	-28
29	CHUNGARA AJATA	4585	-18,2353	-69,1833	46	-16	19	52	-34	46	-22	16	52	-34
30	CODPA	1870	-18,8322	-69,7439	52	-10	25	58	-28	58	-10	28	58	-28
31	COYACAGUA	4013	-20,0531	-68,8075	52	-28	16	52	-34	52	-34	13	52	-34
32	LAGUNILLAS (P. LIRIMA) (*)	4020	-19,9333	-68,8369	46	-28	13	52	-34	52	-40	10	52	-34
33	CASPANA	3260	-22,3367	-68,2122	52	-10	25	58	-28	58	-16	25	58	-28
34	CHIU-CHIU	2524	-22,3378	-68,6367	52	-16	22	58	-28	58	-22	22	58	-28
35	CONCHI EMBALSE	3010	-22,0250	-68,6242	52	-22	19	58	-28	58	-28	19	58	-28
36	LINZOR	4100	-22,2297	-68,0228	46	-22	16	52	-34	46	-28	13	52	-34
37	PARSHALL N 2	3318	-21,9428	-68,5175	52	-16	22	58	-28	52	-22	19	58	-28
38	PEINE	2460	-23,6842	-68,0581	58	-10	28	58	-28	64	-10	31	64	-22
39	CANTO DE AGUA	330	-28,0992	-70,7811	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
40	LA COMPAÑÍA (VALLENAR)	430	-28,5761	-70,8081	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22
41	LAUTARO EMBALSE	1110	-27,9783	-70,0033	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
42	LOS LOROS	940	-27,8317	-70,1119	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
43	SAN FELIX	1150	-28,9311	-70,4614	64	-10	31	64	-22	64	-16	28	64	-22
44	SANTA JUANA	560	-28,6672	-70,6625	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22
45	CAREN	740	-30,8547	-70,7708	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
46	COGOTI EMBALSE	740	-31,0078	-71,0856	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
47	EL TRAPICHE	300	-29,3731	-71,1181	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22

Tabla 1. Grado PG y ligante asignado de estaciones seleccionadas (II)

N°	Estaciones	Ubicación			PG									
					50%				98%					
					Txx	Tyy	T° Int.	Ligante	Txx	Tyy	T° Int.	Ligante		
48	HURTADO	1100	-30,2867	-70,6961	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
49	ILLAPEL DGA	290	-31,6450	-71,1908	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22
50	LA LAGUNA EMBALSE	3160	-30,2033	-70,0422	58	-22	22	58	-28	58	-28	19	58	-28
51	LA ORTIGA	1560	-30,1939	-70,4819	58	-10	28	58	-28	58	-16	25	58	-28
52	LA TRANQUILLA	1000	-31,9000	-70,6706	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
53	LAS RAMADAS	1380	-31,0181	-70,5858	58	-10	28	58	-28	64	-16	28	64	-22
54	LOS CONDORES	190	-32,1086	-71,3125	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
55	PALOMA EMBALSE	320	-30,6958	-71,0361	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22
56	RECOLETA EMBALSE	350	-30,5069	-71,0997	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22
57	RIVADAVIA	820	-29,9772	-70,5617	58	-16	25	64	-22	64	-22	25	64	-22
58	ALICAHUE	750	-32,3408	-70,7528	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
59	LAGO PEÑUELAS	360	-33,1450	-71,5553	52	-10	25	64	-22	58	-16	25	64	-22
60	LLIU-LLIU EMBALSE	260	-33,0986	-71,2144	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
61	LOS AROMOS	100	-32,9578	-71,3450	58	-10	28	64	-22	58	-10	28	64	-22
62	QUILLOTA	130	-32,8958	-71,2092	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
63	VILCUYA	1100	-32,8603	-70,4719	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
64	CERRO CALAN	848	-33,3950	-70,5367	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
65	EL YESO EMBALSE	2475	-33,6767	-70,0886	52	-22	19	58	-28	52	-28	16	52	-34
66	LAGUNA ACULEO	360	-33,8858	-70,8775	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
67	LOS PANGUILES	190	-33,4386	-71,0256	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
68	MELIPILLA	168	-33,6803	-71,1997	58	-10	28	64	-22	64	-10	31	64	-22
69	PIRQUE	659	-33,6736	-70,5869	58	-16	25	64	-22	58	-22	22	58	-28
70	CONVENIO VIEJO	239	-34,7694	-71,1331	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
71	ANCOA EMBALSE	421	-35,9106	-71,2958	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
72	COLORADO	420	-35,6381	-71,2606	58	-16	25	58	-28	58	-22	22	58	-28
73	DIGUA EMBALSE	390	-36,2558	-71,5481	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
74	PARRAL	175	-36,1878	-71,8283	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
75	PENCAHUE	55	-35,3725	-71,8325	64	-10	31	64	-22	64	-16	28	64	-22
76	POTRERO GRANDE	445	-35,1833	-71,0978	58	-10	28	58	-28	58	-22	22	58	-28
77	TALCA UC	130	-35,4358	-71,6197	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
78	CARACOL	610	-36,6511	-71,3950	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
79	COIHUECO EMBALSE	314	-36,6408	-71,7989	64	-10	31	64	-22	64	-16	28	64	-22
80	DIGUILLIN	670	-36,8686	-71,6425	58	-10	28	64	-22	58	-16	25	64	-22
81	QUILACO	231	-37,6850	-72,0058	58	-10	28	64	-22	64	-22	25	64	-22
82	LIUCURA (*)	1043	-38,6517	-71,0919	64	-34	19	64	-34	64	-40	16	64	-34
83	LONQUIMAY	931	-38,4536	-71,3742	58	-28	19	64	-34	64	-34	19	64	-34
84	MALALCAHUELLO	950	-38,4703	-71,5753	52	-22	19	58	-28	58	-28	19	58	-28
85	PUCON	230	-39,2753	-71,9503	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
86	PUERTO SAAVEDRA	5	-38,7886	-73,3936	52	-10	25	64	-22	52	-16	22	58	-28
87	TEODORO SCHMITD	13	-39,0278	-73,0781	52	-10	25	64	-22	58	-16	25	58	-28
88	TRAIGUE	234	-38,2561	-72,6536	58	-10	28	64	-22	64	-16	28	64	-22
89	ADOLFO MATTHEI	55	-40,5883	-73,1069	52	-10	25	58	-28	58	-16	25	58	-28
90	COYHAIQUE (E. AGRICOLA)	343	-45,5739	-72,0286	52	-22	19	58	-28	58	-28	19	58	-28
91	PUERTO PUYUHUAPI	10	-44,3228	-72,5597	52	-10	25	58	-28	58	-16	25	58	-28
92	VILLA MAÑIHUALES	150	-45,1733	-72,1478	52	-16	22	58	-28	58	-22	22	58	-28
93	PUNTA ARENAS	5	-53,1233	-70,8772	46	-16	19	52	-34	46	-22	16	52	-34
94	TORRES DEL PAINE	25	-51,1842	-72,9669	46	-22	16	52	-34	52	-28	16	52	-34



La localidad de Chile Chico, por ejemplo, tiene un requerimiento por temperaturas extremas para un 50% de confiabilidad de PG52-16, y una Tint de 22°C. Para este caso sería apropiado el uso de un ligante PG58-28 o un ligante PG52-34, que cumplen con las temperaturas extremas y cuyas temperaturas intermedias son 19°C y 13°C, respectivamente. Sin embargo, no sería apropiado el uso de un ligante PG64-22, pues a pesar de cumplir con las temperaturas extremas, tiene una temperatura intermedia de 25°C, la que es superior a la Tint de la localidad. Por la misma razón, tampoco sería aplicable un PG70-16.

En las columnas Ligante de la Tabla 1 se muestran los ligantes asignados a cada localidad en la zonificación realizada. La selección del asfalto no es necesariamente única para cada zona, como se explicó anteriormente. Los ligantes mostrados en la Tabla 1 fueron seleccionados de manera de mantener una relativa continuidad geográfica de los ligantes recomendados y minimizar la cantidad de ligantes requeridos para cubrir la totalidad del territorio, lo que proporciona ventajas en la implementación y uso de las especificaciones.

Generación de Mapas de Ligantes Superpave

Para realizar una zonificación Superpave a partir de la información de temperaturas disponible, se requiere en primer lugar estimar el área de influencia de estación climática. Para esto se utilizó principalmente dos criterios: la clasificación climática según el sistema de Köppen para el territorio chileno (Rioseco y Tesser, 2006) como criterio principal y la altura sobre el nivel del mar como criterio complementario. La Figura 1 muestra el mapa de Chile con la zonificación Köppen.

La Figura 2 muestra un ejemplo del uso de la zonificación Köppen para delimitar el área de influencia de las estaciones disponibles para la zona entre Coyhaique y

Balmaceda en el mapa de 50% de confiabilidad. Las estaciones climáticas más cercanas a Coyhaique requerían del uso de un ligante PG58-28 y se ubican dentro de la zona climática clasificada como Cfc (templado lluvioso frío sin estación seca). El clima de Balmaceda, por otro lado, indicaba la necesidad de un ligante PG52-34 y se ubica dentro la zona climática ET (frío de tundra). Para determinar el área de influencia de cada ligante se utilizó el límite entre ambas zonas climáticas, tal como se muestra en la Figura.

En los casos de estaciones dentro de una misma zona climática Köppen, pero con ligantes de distinto PG, se delimitó sus zonas de influencia utilizando la curva de nivel promedio entre las estaciones. La Figura 3 muestra las estaciones Embalse Conchi y Chiu Chiu que se ubican dentro de la zona climática BWk' (árido muy frío), que tienen un requerimiento de ligante PG58-28 para 98% de confiabilidad.

Por otro lado, dentro de la misma zona climática se ubica la estación de Peine, con un requerimiento de ligante PG64-22. Conocidas las alturas sobre el nivel del mar de las estaciones, indicadas en la Tabla 1, se utilizó la curva de nivel promedio entre estaciones adyacentes, para delimitar el área de influencia de cada grado PG, tal como se muestra en la Figura. El mismo criterio se utilizó para la estación de Caspana.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de la zonificación Superpave realizada para confiabilidades de 50% y 98%, respectivamente. Para un 50% de confiabilidad fue posible cubrir casi la totalidad del territorio nacional con tres grados de ligantes tradicionales: PG 64-22, PG 58-28 y PG 52-34. La única excepción se presentó en la zona precordillerana de la IX región, correspondiente al área de influencia de las estaciones de Liucura y Lonquimay, la que requeriría un ligante modificado de PG 64-34.

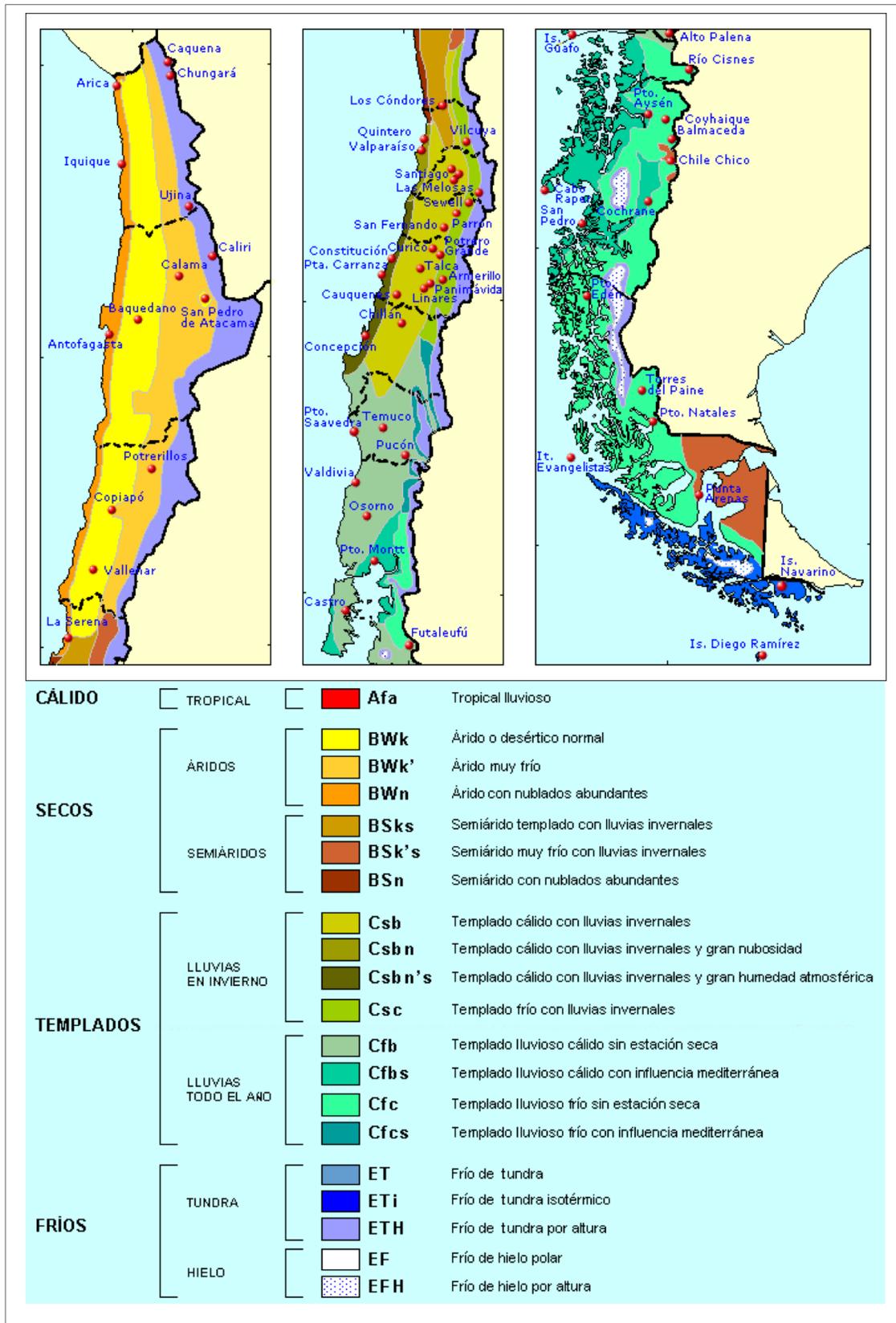


Figura 1. Zonificación Climática Köppen para Chile (Riosco y Tesser, 2006)



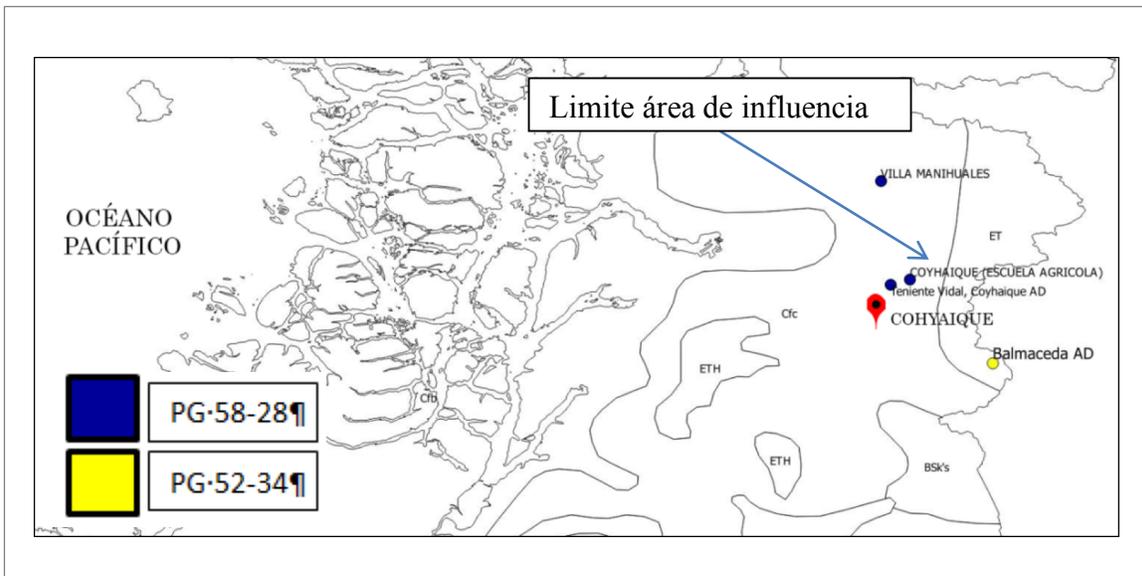


Figura 2. Uso de la clasificación Köppen en la zonificación Superpave (Confiabilidad 50%)

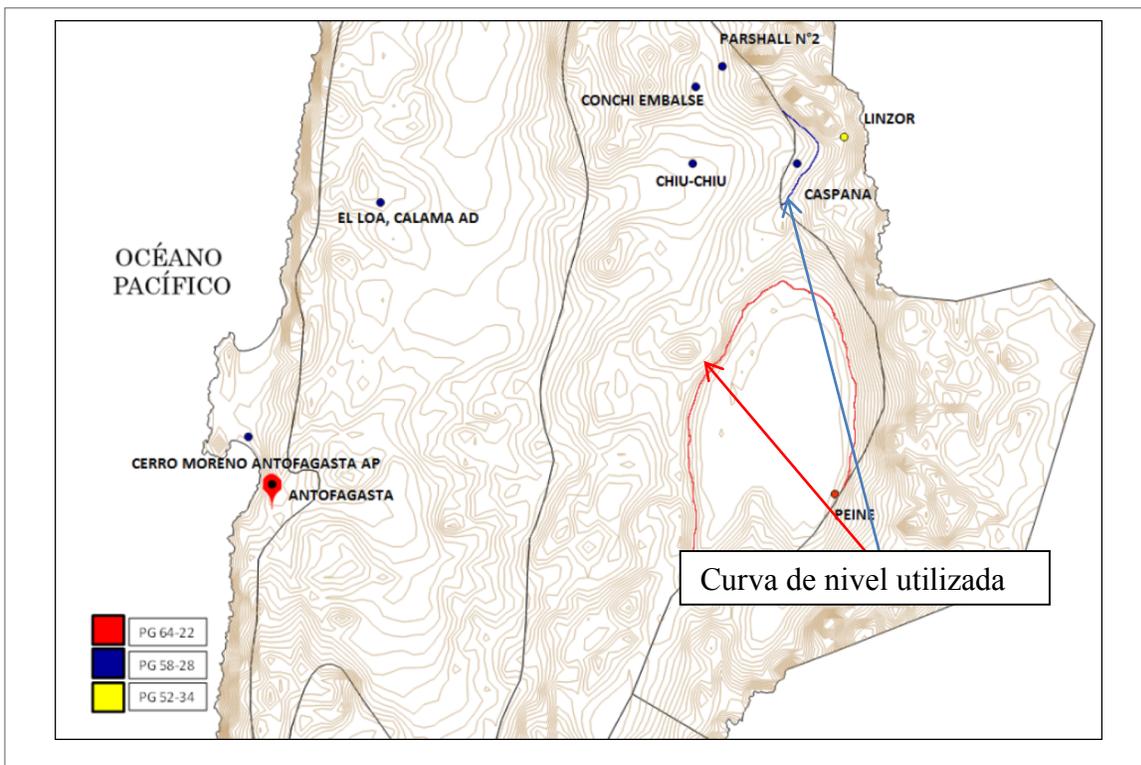


Figura 3. Ejemplo uso de curvas de nivel para la creación de la zonificación Superpave chilena (98% confiabilidad)

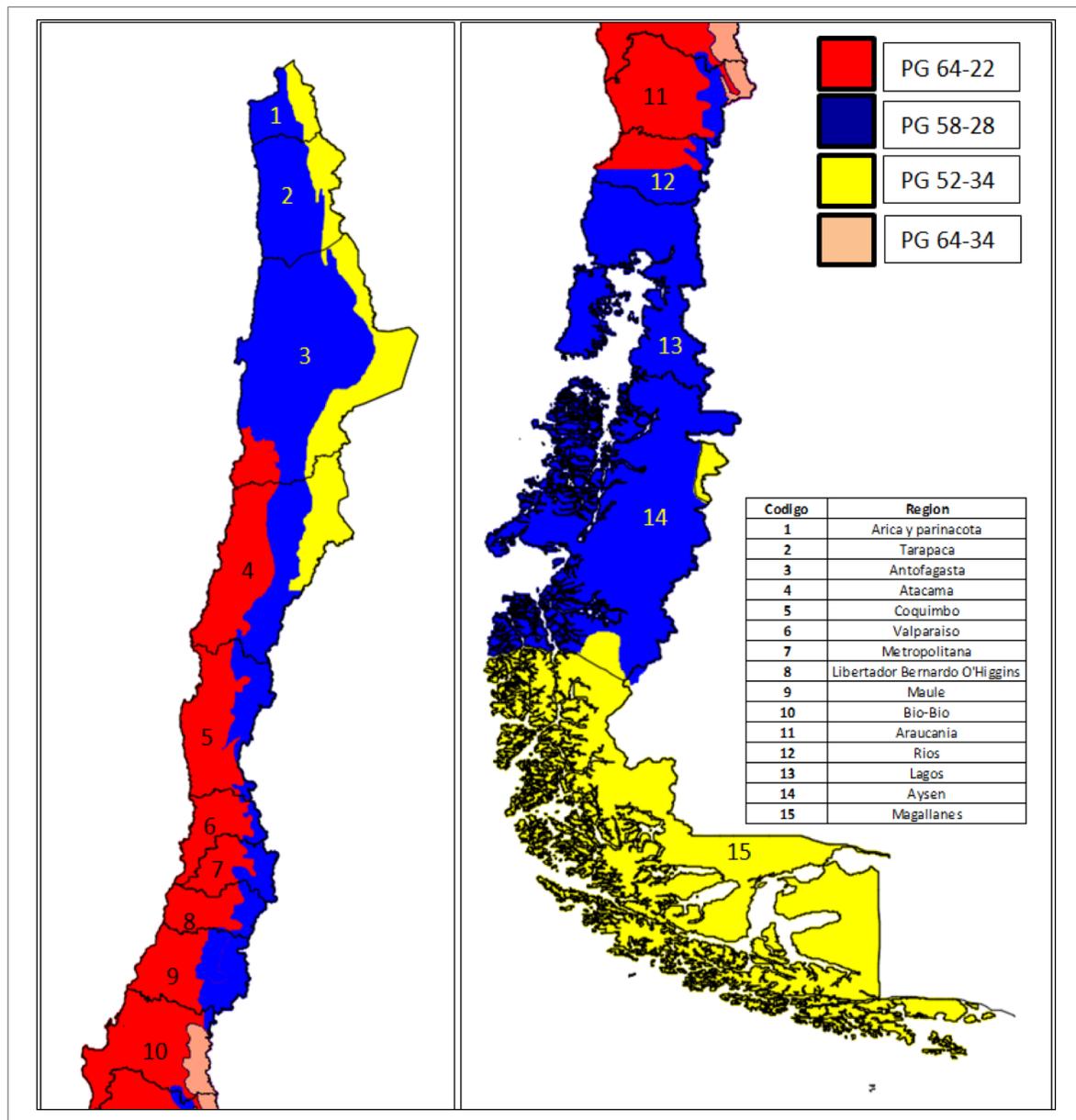


Figura 4. Zonificación Superpave de Chile, 50% de confiabilidad

Los mismos ligantes, con algunos cambios en los límites de la zonificación, también permitieron obtener una confiabilidad del 98% para la gran mayoría de las estaciones. Solamente las estaciones: Balmaceda (PG teórico 58-40 para 98% de confiabilidad), Lagunillas (PG teórico 52-40 para 98% de confiabilidad) y Liucura (PG teórico 64-40 para 98% de confiabilidad) no alcanzaron un 98% de confiabilidad si se utiliza los mismos cuatro ligantes considerados para el 50% de confiabilidad. La confiabilidad alcanzada en estas estaciones fue:

- Balmaceda con PG 52-34: 68% de confiabilidad para alta y baja temperatura

- Lagunillas y Liucura con PG 64-34: 98% de confiabilidad para alta temperatura y 68% de confiabilidad para baja temperatura

No obstante lo anterior, la selección final del grado PG debe considerar las características propias del proyecto el efecto en cuanto a trazado (velocidad de carga) y/o el volumen de tránsito pesado lo que puede significar subir uno o dos grados PG.



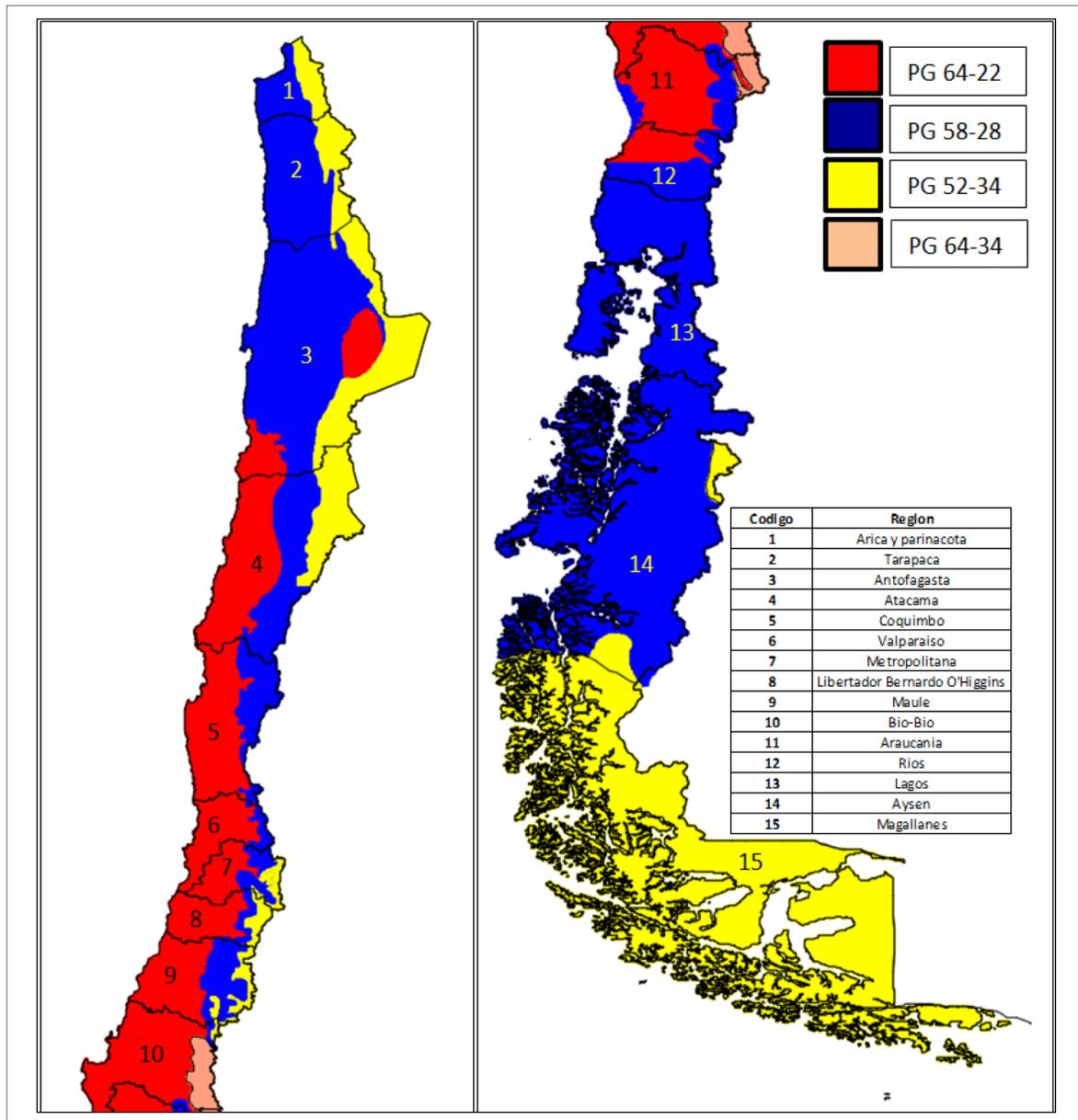


Figura 5. Zonificación Superpave de Chile, 98% de confiabilidad

5. Conclusiones

Fue posible realizar zonificaciones Superpave para confiabilidades de 50% y 98%, a partir de la información de temperaturas de 94 estaciones climáticas chilenas pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile y a la Dirección General de Aguas. Las estaciones seleccionadas contaban con información de temperaturas útil y actualizada. La zonificación climática de Köppen y la topografía del territorio chileno fueron criterios útiles para la definición de las zonas de influencia de cada estación climática, lo que últimamente definió las zonas recomendadas para cada grado PG.

A pesar de la variedad de grados PG requeridos para las diversas estaciones analizadas, se logró zonificar con un 50% de confiabilidad la mayor parte del territorio chileno con tres asfaltos tradicionales: PG 64-22, PG 58-28 y PG 52-34. Solamente una pequeña zona precordillerana de la IX región requirió de un PG 64-34, el que probablemente será un ligante modificado.

Los mismos ligantes, pero modificando algunos de los límites de las áreas de influencia, pudieron ser utilizados para una zonificación PG con 98% de confiabilidad para la mayoría de las estaciones. Sin embargo, en las estaciones Balmaceda, Lagunillas y Liucura se alcanzó solo una confiabilidad de 68% al utilizar estos mismos ligantes. Las dos primeras requerirían PG52-40 y la tercera PG 64-40 para alcanzar una confiabilidad del 98%.

La zonificación Superpave obtenida no constituye una solución única. Para algunas localidades, hay más de un ligante tradicional que puede cumplir con los requerimientos

Superpave. La selección final del ligante se realizó incluyendo consideraciones prácticas, como entregar una relativa continuidad geográfica a los ligantes recomendados y minimizar el número de ligantes necesarios para cubrir todo el territorio nacional.

La zonificación planteada corresponde a las condiciones estándar definidas por Superpave, de velocidad de circulación alta y volúmenes de tránsito moderados. Para velocidades de circulación lentas y volúmenes de tránsito elevados hay que considerar incrementos en el grado de alta temperatura.

Para la obtención de las temperaturas de cada localidad se utilizó las fórmulas originales del método Superpave, las que entregan resultados más conservadores que los de las fórmulas LTPP. Trabajos futuros deberían considerar una comparación utilizando ambas fórmulas y recomendaciones para velocidades de circulación bajas y volúmenes de tránsitos elevados.

6. Agradecimientos

Este estudio fue financiado parcialmente por la Dirección de Investigación y Postgrado de la Universidad Técnica Federico Santa María a través del proyecto CyT-261424. Los autores agradecen a la Dirección Meteorológica de Chile por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación y por la información meteorológica facilitada. Se agradece también a los señores Ricardo Alcañaz y Cristián Díaz por sus aportes a la revisión del documento original del trabajo.

7. Referencias

- AASHTO (2015)**, Standard Practice for Grading or Verifying the Performance Grade (PG) of an Asphalt Binder. R 29-15 444 N Capitol ST. NW-Suite 249 – Washington, DC.
- Araya F., A. González, R. Delgadillo, C. Wahr y G. García (2012)**, Caracterización Reológica Avanzada de Betunes Tradicionales y Modificados Utilizados Actualmente en Chile. Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 27, N°3, pp.198-210.
- Asphalt Institute (2003)**, Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Superpave Series N°1 (SP-1), Kentucky.
- ASTM (2015)**, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. D6373 West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Contreras C. (2007)**, Mapa de Recomendación de Uso de Ligantes Asfálticos Según Clasificación Superpave, Aplicado al Tramo entre Santiago y Los Ángeles. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Delgadillo R., C. Wahr y J.P. Alarcón (2011)**, Towards the Implementation of the MEPDG in Latin America, Preliminary Work Carried Out in Chile. Transportation Research Record, Vol. 2226, pp. 142-148.
- Delgadillo R., C. Wahr, G. García, L. Osorio y O. Salfate (2014)**, Generating Hourly Climatic Data from Available Weather Information for Pavement Design. Transportation Research Record, Vol. 2433, pp. 48-57.
- García G., Marín E., Delgadillo R. y Wahr C. (2014)**, Caracterización del desempeño a fatiga de mezclas asfálticas mediante los enfoques fenomenológico y de disipación de energía. Carreteras, Vol. 4 (198), pp. 5-14.
- Huber G. (1994)**, Weather Database for the SUPERPAVE™ Mix Design System. SHRP-A-648A, National Research Council, Washington.
- Kennedy T., G. Huber, E. Harrigan, R. Cominsky, C. Hughes, H. Von Quintus y J. Moulthrop (1994)**, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC.
- Mohseni A. (1998)**, LTPP Seasonal Asphalt Concrete (AC) Pavement Temperature Models. Federal Highway Administration Report N° FHWA-RD-97-103.
- Osorio L., R. Delgadillo y C. Wahr (2015)**, Caracterización y Análisis de la Estadística Chilena para el Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista. Revista de Ingeniería de Obras Civiles, Vol. 5, pp. 9-17.
- Rioseco R. y C. Tesser (2015)**, Cartografía Interactiva de los climas de Chile. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva, 2006. Último acceso 15 de marzo de 2015.
- Vivanco y Bahía (2005)**, Transición Hacia un Sistema de Graduación por Desempeño de Betunes Asfálticos para Países en Vías de Desarrollo. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, San José, Costa Rica, Noviembre de 2005.

