

## DETERMINACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO ÓPTIMO DE ACUERDO A SU GRADO DE DESEMPEÑO ADECUADO A LA ZONA CLIMÁTICA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

Daniel Claudio Arias Sanchez<sup>1</sup>, Patricia Claudia Velásquez Garnica<sup>2</sup>, Jairo Sanabria Sandino<sup>3</sup>, Luis Guillermo Loría Salazar<sup>4</sup>, Rafael Ernesto Villegas-Villegas<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Escuela Militar de Ingeniería, Calle Manuel Cáceres Nro. 37 La Paz-Bolivia, [das.silver@gmail.com](mailto:das.silver@gmail.com)

<sup>2</sup>Escuela Militar de Ingeniería, Calle Francisco de Cámara Nro. 1905 La Paz-Bolivia, [pvelasquez@construvel.com.bo](mailto:pvelasquez@construvel.com.bo)

<sup>3</sup>LANAMME Universidad de Costa Rica, San José San Pedro-Costa Rica, [Jairo\\_sanabriasandino@ucr.ac.cr](mailto:Jairo_sanabriasandino@ucr.ac.cr)

<sup>4</sup>LANAMME Universidad de Costa Rica, San José San Pedro-Costa Rica, [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

<sup>5</sup>LANAMME Universidad de Costa Rica, San José San Pedro-Costa Rica, [rafael.villegas@ucr.ac.cr](mailto:rafael.villegas@ucr.ac.cr)

### Resumen

El presente trabajo constituye un primer paso en la aplicación de la metodología SUPERPAVE para la selección y evaluación de cementos asfálticos en Bolivia, como una respuesta a la necesidad de considerar factores de clima en el Altiplano, un territorio a una altitud promedio de 3800 msnm con condiciones únicas en el mundo que afectan de manera directa a los pavimentos de las carreteras y vías que se construyen dentro del mismo.

Como primer punto se recopiló una base de datos climática a partir de datos de temperatura máxima, mínima y media diarias durante un periodo continuo de 20 años correspondientes a las estaciones meteorológicas distribuidas en los tres departamentos que componen el Altiplano Boliviano que son La Paz, Oruro y Potosí.

Evaluados los datos de temperatura se pudieron observar gradientes diarios elevados de temperatura entre las máximas y mínimas registradas como se esperaba de una zona con condiciones tan extremas, a continuación, se desarrolló el mapa de Grado de Desempeño con factores estadísticos de confiabilidad a partir de los algoritmos SHRP y LTPP de acuerdo a una división política por provincias; complementando el análisis con estudios reológicos a los cementos asfálticos empleados en el territorio en la actualidad.

**Palabras Clave:** Desempeño de cemento asfáltico, SUPERPAVE, Altiplano Boliviano.

## 1 Introducción

El uso de concreto asfáltico se ha incrementado en los últimos años, tanto a nivel nacional como a nivel mundial, debido al impulso por parte de las autoridades a contribuir con la mejora de sus infraestructuras viales y de esta forma influir directamente en el desarrollo del país.

La inversión en la mejora e incremento de infraestructuras viales tanto de la red fundamental como vecinal conlleva grandes cantidades de presupuesto, debido a esto es muy importante que se deba llevar un exhaustivo control de todas las fases que componen un proyecto de infraestructura vial, iniciando en los modelos de preinversión, diseño además de la etapa constructiva y mantenimiento.

En un territorio como el que compone a Bolivia con la gran variedad de regiones presentes como son llanos, valles, y en especial la región del Altiplano Boliviano, presentan características y condiciones únicas en el mundo como se puede observar en la Figura 1 ya sean en un aspecto de altitud sobre el nivel del mar, factores de radiación solar y condiciones climáticas extremas.



Figura 1 Ubicación del Altiplano Boliviano

Dentro de los tipos de pavimentos existentes el más usado en el mundo para construcción de carreteras tanto internacionales como interdepartamentales es el pavimento flexible con las capas que compone su paquete estructural como se observa en la Figura 2, que ofrece la capacidad de proporcionar una superficie continua y con un nivel alto de serviciabilidad a los usuarios que transitan por ella.

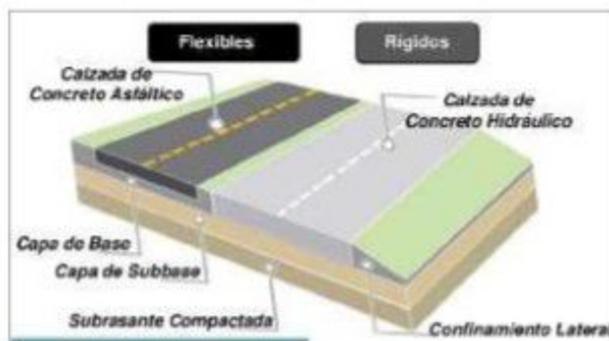


Figura 2 Pavimentos flexibles y rígidos

El proceso de diseño de pavimentos flexibles abarca distintas fases dentro de las cuales tenemos en primer lugar el diseño y cálculo de espesores de las distintas capas que componen el

paquete estructural, a continuación, se procede al cálculo de los componentes del concreto asfáltico determinando la cantidad y granulometría de los agregados que lo componen y por último la elección del cemento asfáltico a emplear como ligante de la mezcla que compone el concreto asfáltico.

El presente trabajo se centra en el método para la elección del ligante asfáltico que, actualmente se realiza por medidas de consistencia ya sea por penetración y/o viscosidad, siendo que ambos métodos se fundamentan en parámetros netamente empíricos de consistencia que tuvieron su origen bajo limitaciones tecnológicas de la época en la que fueron desarrollados.

Los parámetros principales por los que se rigen éstas metodologías, se encuentran bastante limitados a la hora de reproducir las condiciones reales a las que se verá sometido el cemento asfáltico durante su vida útil, de forma concreta en el periodo inicial y de puesta en servicio de la misma.

Por todo esto la necesidad de actualizar los métodos de elección del cemento asfáltico es una realidad cada vez más evidente y varios países se han decidido por el empleo del método SUPERPAVE un método actual con mejores parámetros para reflejar la realidad de las condiciones de servicio a las que se ve sometido el pavimento.

## 2 Metodología SUPERPAVE

Las especificaciones del ligante Superpave se basa directamente en las propiedades físicas básicas del ligante y su comportamiento observado. El grado de comportamiento del ligante o performance grade (PG) se selecciona basado en las temperaturas extremas de servicio del ligante como se expresa en la Figura 3.

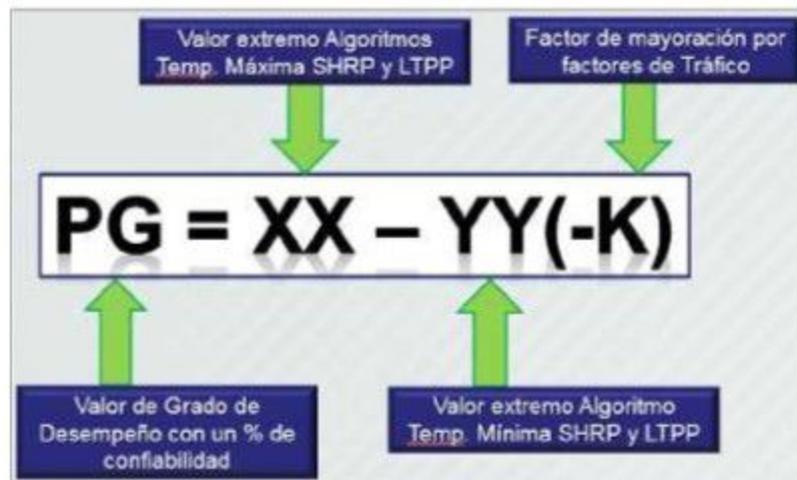


Figura 3 Parámetros de Grado de Desempeño

De acuerdo a la última actualización de la normativa para evaluación de cementos asfálticos Superpave, AASHTO M-332 además del grado del ligante clasificado de acuerdo a altas y bajas temperaturas, se requiere mayor información para seleccionar el PG que debe tener el ligante en un lugar en particular como son factores de tráfico y recuperación elástica del asfalto que se debe evaluar mediante el ensayo MSCR (Multi Stress Creep Recovery) para determinar la recuperación del asfalto una vez que se ve sometidos a la acción continua de carga y descarga.

Por tanto, el punto fundamental y característico distintivo del método de selección SUPERPAVE es la determinación de la temperatura tanto máxima como mínima extrema que alcanzan los pavimentos en servicio empleando dos algoritmos de cálculo el primero desarrollado por SHRP (Strategic Highway Research Program) y el segundo que lo complementa y completa el modelo LTPP (Long Term Pavement Performance) de los cuales se toma el valor extremo calculado con una confiabilidad estadística determinada como se puede ver en la Figura 4.

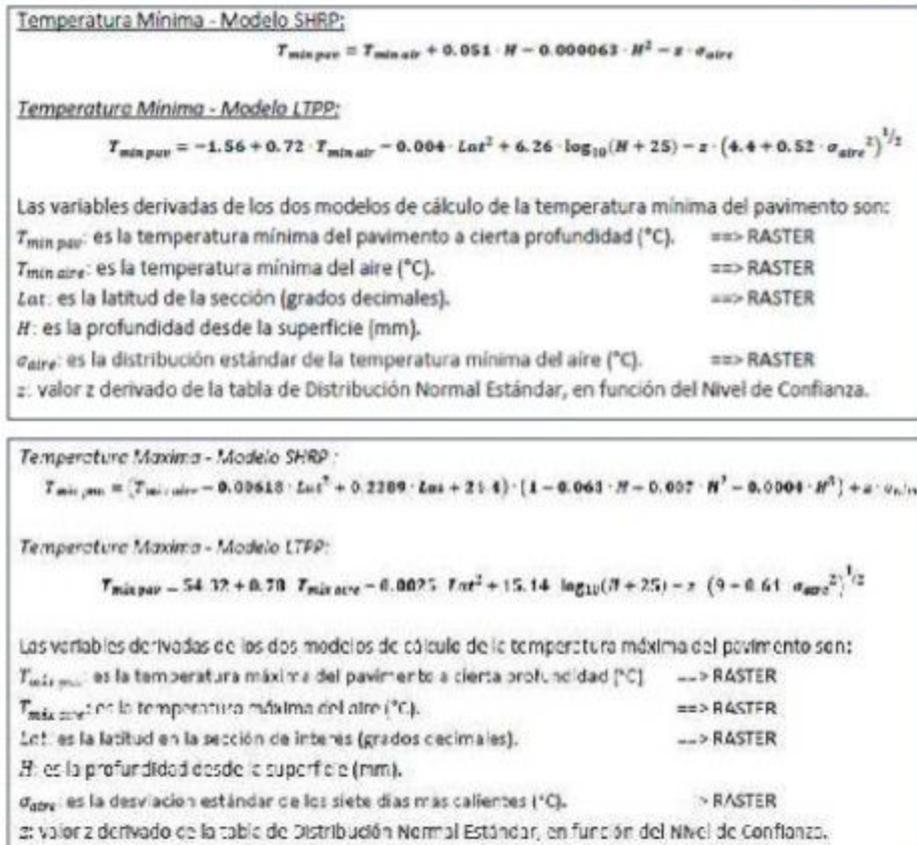


Figura 4 Algoritmos SHRP y LTPP para temperaturas extremas en pavimentos

Como se puede observar en los algoritmos de cálculo los parámetros tener en cuenta para el cálculo de la temperatura extrema del pavimento en servicio son: la temperatura extrema del aire de la región en estudio, la latitud de la sección de interés en datum WGS 84, la profundidad desde la superficie a la que se determina la temperatura del pavimento y un parámetro estadístico z referente a la confiabilidad del modelo.

La confiabilidad es el factor de seguridad que se incorpora en el Sistema de Gradación PG basado en la confiabilidad de la temperatura. El 50% de confiabilidad en la temperatura representa el promedio de los datos de la estación. Además de este se calcula la confiabilidad para un 85% variando el valor del coeficiente z contenido en las fórmulas de temperatura del pavimento que representa el incremento o decremento de una vez la desviación estándar.

La confiabilidad del 98% de temperaturas se determina en función de la desviación estándar multiplicada por el anteriormente mencionado coeficiente z que representa el incremento o decremento de dos veces el valor de desviación estándar, a bajas temperaturas y altas temperaturas.

### 3 Sistemas de información Geográfica

En general, un Sistema de Información (SI) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas (programas) para su análisis con unos objetivos concretos dentro de una organización (empresa, administración, etc.). Un SIG es un caso particular de SI en el que la información aparece georreferenciada es decir incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica (generalmente UTM).

Para la presente investigación se empleó un software para manejo de Sistemas de Información Geográfica para poder extender los valores puntuales en el espacio proporcionados por las estaciones meteorológicas a la totalidad del territorio en estudio mediante un proceso de extrapolación para pasar datos vectoriales a un formato en área o Raster.

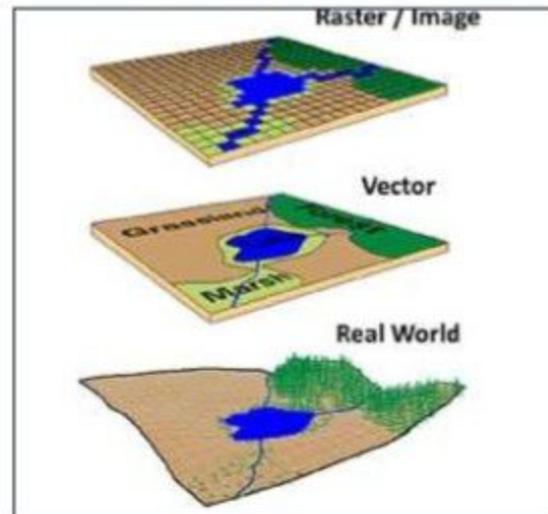


Figura 5 Formato de datos en SIG

Como se puede observar en la Figura 5 el software se encarga de plasmar la realidad en primer lugar a un formato vectorial de puntos y líneas con valores asignados a los mismos y a través del sistema de interpolación inverso a la distancia o IDW extender estos valores dividiendo el espacio en celdas con un tamaño determinado y asignando un valor a cada una, por tanto el espacio queda ajustado a una matriz con unas dimensiones determinadas y de esta forma se hace posible realizar operaciones y cálculos con este formato.

#### 4 Objetivos

El objetivo general y principal aporte del presente trabajo de investigación, así como los objetivos específicos que se alcanzaron en el proceso se detallan a continuación.

##### 4.1 Objetivos general

Determinar el cemento asfáltico óptimo, de acuerdo a su grado de desempeño, adecuado a zonas climáticas del Altiplano Boliviano.

##### 4.2 Objetivos específicos

- Reunir y organizar una base de datos climáticos recopilada de las estaciones meteorológicas disponibles en el Altiplano Boliviano con datos de los últimos 20 años.
- Realizar la modelación del mapa de temperaturas del aire empleando un software de sistemas de información geográfica.
- Emplear los modelos SHRP y LTPP para obtener los datos de temperatura máxima y mínima en los pavimentos, modelar un mapa de desempeño en base a estos datos.
- Determinar el grado de desempeño para temperatura máxima que alcanzan los cementos asfálticos empleados en las carreteras del Altiplano Boliviano mediante ensayos de laboratorio.

- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos y los requeridos en el mapa de desempeño de zonas climáticas.

## 5 Creación de base de datos climática

Como primer punto para el desarrollo del presente trabajo se realizó la recopilación de datos de temperaturas máxima, mínima y media diarias a partir de las estaciones meteorológicas presentes en los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí durante un periodo de tiempo continuo de 20 años.

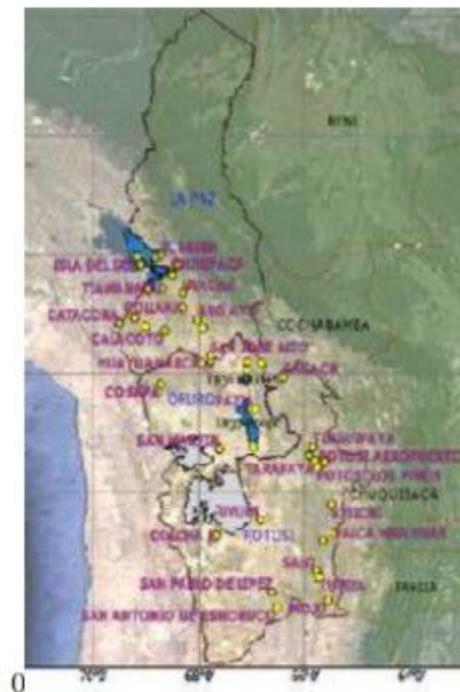


Figura 6 Estaciones meteorológicas

En total de las estaciones disponibles se selecciona un total de 47 estaciones meteorológicas que cumplieran con los requerimientos de datos como se puede observar en la Figura 6.

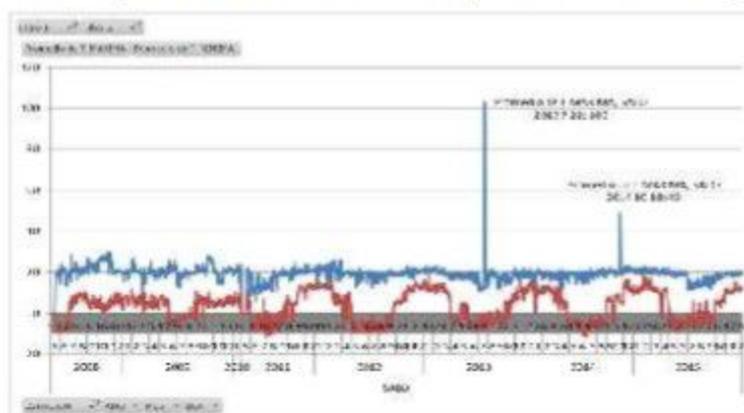


Figura 7 Gráfica de correspondencia

Los datos recopilados se acumulan en una base de datos mediante un formato de Tablas con un total inicial de 334.520 entradas entre datos diarios de temperatura que pasan a analizarse

mediante graficas de correspondencia de datos para descartar aquellos valores que se alejen de la realidad o presenten parámetros que no sean lógicos.

En la Figura 7 se puede observar dos picos que representan valores alejados de la distribución normal para temperaturas máximas y mínimas correspondientes a la estación de Salo que representan valores de temperatura de 103°C y 49°C en una región fría por tanto esos valores se descartan. Una vez realizado el análisis para cada una de las 47 estaciones meteorológicas en estudio se obtuvo un total de 299.660 entradas que representan datos válidos y operables para poder proseguir con el modelado de los mapas de temperatura a partir de la base de datos conformada.

## 6 Modelado de Mapa de Temperaturas del Aire

Una vez realizado el análisis espacial se procede a realizar el cálculo de temperaturas extremas empleando la base de datos recopilada y siguiendo las consideraciones explicadas anteriormente.

Para realizar el modelado del mapa de Temperaturas Máximas del aire se emplea el mapa de isotermas proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, y se complementa con los datos puntuales de las estaciones meteorológicas recopilados para temperatura máxima pertenecientes al promedio de los siete días consecutivos de mayor valor de temperatura durante el periodo de tiempo de estudio.

Mediante el software SIG se realiza la interpolación de ambos datos y se llega a un mapa de temperatura máxima del aire obteniendo el resultado mostrado en la Figura 8.

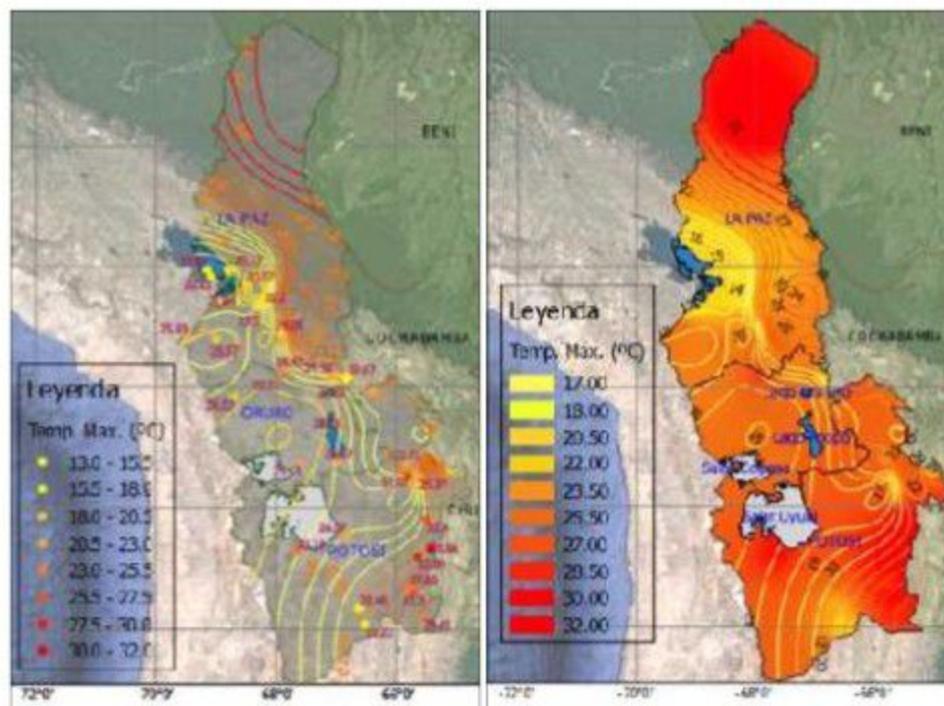


Figura 8 Modelo de Temperatura Máxima

Se realiza el mismo proceso para modelar el mapa de temperaturas mínimas del aire empleando un mapa de isotermas proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI con los valores para temperatura mínima registrados durante el periodo de análisis.

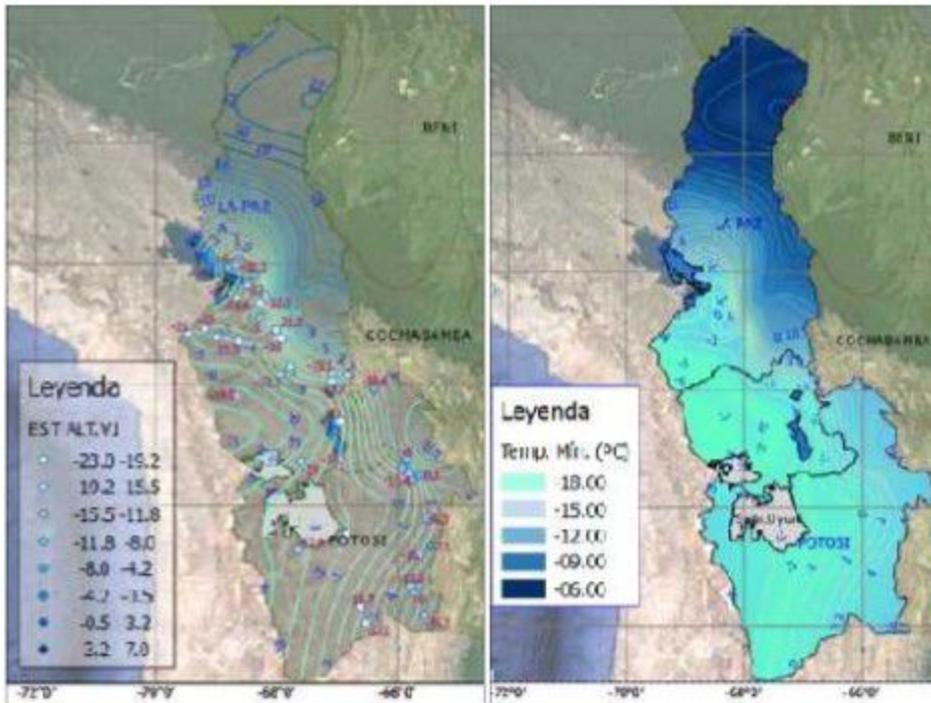


Figura 9 Modelo de Temperatura Mínima

Se superpusieron los datos proporcionados por las isotermas que delimitan las áreas de misma temperatura dividiendo las zonas en zonas de temperaturas mínimas, medias y cálidas que se encuentran en la zona del Altiplano Boliviano. Mediante el software SIG se realiza la interpolación de ambos datos y se llega a un mapa de temperatura mínima del aire obteniendo el resultado mostrado en la Figura 9.

Como se puede observar la mayoría del territorio que se compone por Altiplano tiene una temperatura crítica mínima de menos 18 grados centígrados lo cual hace que la temperatura en épocas de invierno sea realmente baja y este fenómeno incida directamente en el desempeño del cemento asfáltico que se emplea en las carreteras de este territorio.

La temperatura con mayor valor coincide con la región más calurosa del territorio compuesta por valles y llanos donde los valores mínimos encontrados son de menos 6 grados centígrados, aun bajo cero.

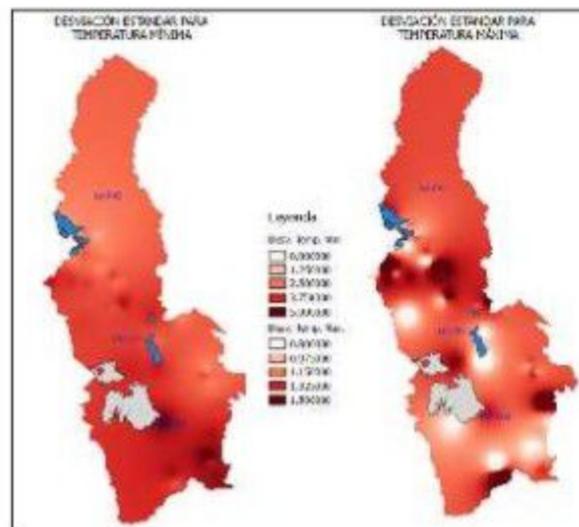


Figura 10 Ráster de desviaciones estándar

Para realizar el modelado del Mapa de Grado de Desempeño según los algoritmos de la SHRP y LTPP se desarrolló previamente los Rasters adicionales de desviación estándar para temperatura máxima y mínima como se muestra en la Figura 10. Además, se complementa el análisis con un Ráster de latitudes que nos permitió calcular los valores numéricos con la Confiabilidad que buscamos

El Ráster de Distribución Espacial de Valores de Latitud para el territorio de los tres departamentos que componen el Altiplano Boliviano se realizó empleando el sistema de georeferenciación WGS 84 mediante el cual se divide el plano de latitudes en grados, el territorio perteneciente al Altiplano Boliviano abarca de la latitud -23 a -12 Sud.

A partir de los modelos de Rásters anteriormente mencionados se procedió a calcular el mapa de Grado de Desempeño empleando los algoritmos SHRP y LTPP para cálculo de temperatura del pavimento con confiabilidad y una vez calculado el mapa se procede a continuación a realizar un análisis mediante una división política por provincias que componen cada departamento.

El análisis de acuerdo a una división política por provincia se llevó a cabo evaluando el porcentaje de área que ocupa cada escala de Grado de Desempeño requerido es decir que porcentaje de área del área total ocupa un grado de Desempeño de 52°C, que porcentaje de área de 58°C y cuando de 64°C para posteriormente determinar el grado de Desempeño recomendado en base a la mayor cantidad de área abarcada.

Tabla 1 Distribución por áreas de PG requerido

PROVINCIA	PORCENTAJE DE ÁREA PARA CADA GRADO PG 98% CONF.				
	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	PG 52-XX	PG 58-XX	PG 64-XX	PG RECOM
<b>DEPARTAMENTO DE LA PAZ</b>					
Abel Iturralde	42.815	-	31,20	58,95	64-16
Aroma	4.510	-	100,00	-	58-22
Bautista Saavedra	2.525	100,00	-	-	52-28
Caranavi	3.400	42,17	57,83	-	58-22
Camacho	2.080	100,00	-	-	52-28
Franz Tamayo	15.900	42,13	57,87	-	58-22
General José Manuel Pando	1.976	-	87,15	12,85	58-22
Gualberto Villaroel	1.935	-	100,00	-	58-22
Ingavi	5.410	100,00	-	-	52-28
Inquisivi	6.430	-	100,00	-	58-22
José Ramón Loayza	3.370	-	100,00	-	58-22
Larecaja	8.110	100,00	-	-	52-28
Los Andes	1.658	100,00	-	-	52-28
Manco Kapac	367	100,00	-	-	52-28
Muñecas	4.965	100,00	-	-	52-28
Nor Yungas	1.720	81,30	18,70	-	52-28
Omasuyos	2.065	100,00	-	-	52-28
Pacajes	10.584	-	100,00	-	58-22
Pedro Domingo Murillo	4.705	71,82	28,18	-	52-28
Sud Yungas	5.770	-	100,00	-	58-22

Este análisis se realiza como se muestra en la Tabla 1 tanto para temperaturas máximas como mínimas y en base a los valores críticos calculados por cada algoritmo se seleccionó el mayor de ambos para el modelado de Grado de Desempeño por provincias.

Por último, se calculó el Mapa de Grado de Desempeño requerido con una confiabilidad del 98% de confiabilidad obteniendo el resultado como se muestra en la Figura 11 donde se puede apreciar las zonas de acuerdo al Grado de Desempeño requerido para este valor estadístico además del valor original comparado por áreas aplicando los algoritmos de la SHRP y LTPP.

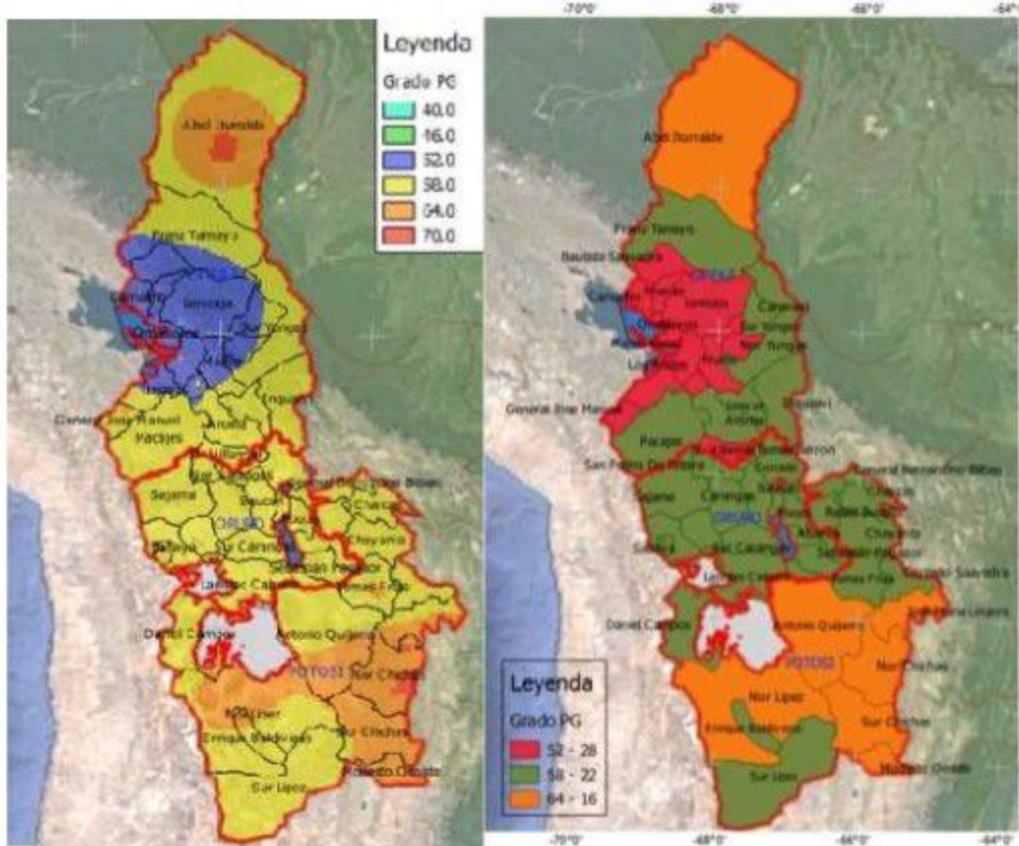


Figura 11 Mapa de Grado de Desempeño al 98% de confiabilidad

Como se observa al incrementar el nivel de confiabilidad para determinar el Grado de Desempeño requerido al 98% de confiabilidad se observa una nueva configuración donde la zona central del departamento de La Paz pasa a abarcar un PG 52°C, el resto del departamento con excepción de la zona norte, la totalidad del departamento de Oruro y parte del departamento de Potosí requieren de un PG 58°C y por último para las zonas más calurosas del territorio que comprende el Altiplano Boliviano, la zona norte del departamento de La Paz y la zona centro y sur-este del departamento de Potosí requieren de un PG 64°C.

### 7 Determinación del Grado de Desempeño para temperatura máxima que alcanzan los cementos asfálticos mediante ensayos Reológicos

Para empezar, se debe aclarar que el presente trabajo de investigación limitó el análisis de reológico de cementos asfálticos a temperaturas máximas debido a los equipos disponibles.

El procedimiento para la evaluación reológica de cementos asfálticos esta normado por la norma AASHTO T-315 y se realizó empleando el reómetro de Corte Directo DHR-1 en las instalaciones del laboratorio de asfaltos de la Escuela Militar de Ingeniería como se observa en la Figura 12.



Figura 12 Disposición de muestra

Para los resultados del presente trabajo se realizaron ensayos a tres cementos asfálticos empleados y recomendados para el territorio del Altiplano Boliviano el primero o asfalto 1 procedente del Perú (Repsol), el asfalto 2 procedente de Brasil (Stratura), ambos cementos asfálticos convencionales sin modificar y el tercero o asfalto 3 procedente de Rusia (Bitumina) como asfalto modificado, obteniendo los siguientes resultados de la Tabla 2.

Tabla 2 Resultados de ensayos reológicos

CARACTERÍSTICAS	REPSOL	STRATURA	BITUMINA
COMPOSICIÓN	ORIGINAL	ORIGINAL	MODIFICADO
GRADO PG QUE ALCANZA	58	58	82
PROCEDENCIA	PERU	BRASIL	RUSIA
MÓDULO COMPLEJO (Pa)	1711,86	1703,64	951,84
MÓDULO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (Pa)	202,93	63,38	467,26
MÓDULO DE PERDIDA DE ENERGÍA (Pa)	1701,73	1702,59	840,01
DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	1,00	1,00
VISCOSIDAD (Pa*s)	0,02144	0,01801	0,00720
ÁNGULO DE FASE $\delta$ (°)	83,19	87,87	61,51
COMPORTAMIENTO A TEMPERATURA DE SERVICIO	VISCOSO	VISCOSO	VISCO-ELÁSTICO
ZONAS PARA LAS QUE ES APTO	Zonas templadas	Zonas templadas	Todas las zonas

## 8 Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos y los requeridos en el Mapa de Desempeño

Se comparó el territorio para el cual se tienen como aptos los cementos asfálticos convencionales con una clara limitación para las zonas más calurosas del Altiplano Boliviano como son la zona sur-este del departamento de Potosí y la zona norte del departamento de La Paz, en comparación el cemento asfáltico 3 es apto y además aconsejable para la totalidad del territorio.

Realizado el mapa de los municipios para los cuales serían recomendados los asfaltos originales o no modificados empleados actualmente ya que como se definió anteriormente el cemento asfáltico modificado es recomendable para la totalidad del territorio que compone el Altiplano Boliviano.

Comparando los resultados obtenidos en ensayos con los del Mapa PG diseñado los cementos asfálticos convencionales cumplen con el Grado de Desempeño 58°C requerido para casi la totalidad del territorio en estudio con la excepción de los municipios de Nor Chichas, Sur Chichas y Modesto Omiste, localizados en la zona sur-este del departamento de Potosí y el municipio de Abel Iturralde situado en la zona norte del departamento de La Paz.

Por tanto para un 98% de confiabilidad valor con una buena aproximación considerando solo factores climáticos, el alcance de territorio que abarcan queda más limitado para asfaltos convencionales.

## 9 Conclusiones

9.1 Se logró recopilar la información de un total de 47 estaciones distribuidas por el área comprendida por los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí de las cuales se obtuvo un total de 343.100 entradas de datos concentradas en una tabla de cálculo de formato Excel, las cuales una vez procesadas y evaluadas se llegó a un número total de 299.660 entradas de datos válidos y confiables para su utilización en los posteriores resultados obtenidos.

9.2 Una vez conformada la base de datos climática se logró crear el mapa de temperaturas extremas del aire combinando la información vectorial de las isotermas proporcionadas por el SENAMHI y la información por punto de los valores máximos y mínimos concentrados en cada estación meteorológica tomada en cuenta obteniendo una temperatura mínima de  $-23^{\circ}\text{C}$  para las zonas más altas y máxima de  $32^{\circ}\text{C}$  para la región Norte de La Paz y Sud Este de Potosí.

9.3 Modelado del Mapa de Grado de desempeño requerido para el territorio del Altiplano Boliviano se obtuvieron los resultados que muestran un PG de  $58^{\circ}\text{C}$  para la mayoría del territorio y un PG de  $64^{\circ}\text{C}$  para las zonas de menor altura y máxima concentración de temperaturas elevadas en la zona norte de La Paz y sur este de Potosí, estos valores indican los requerimientos que se le deben exigir a los cementos asfálticos empleados en las carreteras y vías de cada zona.

9.4 Se consiguió realizar un estudio reológico detallado para temperaturas máximas de los cementos asfálticos seleccionados, llegando a determinar que alcanzan exigencias necesarias para un grado PG requerido de  $58^{\circ}\text{C}$ , pero ninguno convencional para un PG de  $64^{\circ}\text{C}$  por lo que serían aptos para regiones de alta montaña y algunos llanos pero no para las zonas más calurosas del territorio siendo el asfalto modificado Bitumina óptimo para la totalidad del territorio.

9.5 Como punto final se pudo observar y comparar los resultados obtenidos en el Mapa de Grado de Desempeño y los ensayos reológicos en cementos asfálticos seleccionados donde se complementó el estudio determinando que los cementos asfálticos convencionales no son recomendables para las zonas más calurosas del territorio que requieren un PG de  $64^{\circ}\text{C}$ .

## 10 Referencias

- [1] ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS, Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfálticos, 2008.
- [2] AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures (1993).
- [3] CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DE ASFALTOS (CILA), Argentina, 2015, Libro de ponencias.
- [4] CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DE ASFALTOS (CILA), Brasil, 2013, Libro de ponencias.
- [5] CRESPO ESCOBAR Santiago, Materiales de construcción para edificación y obra civil, 1ª EDICION 2010
- [6] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, Understanding the MSCR Test and its Use in the PG Asphalt Binder Specification, August 2015.
- [7] HERNÁNDEZ SAMPIERI Roberto, Fundamentos de metodología de la investigación (2007).
- [8] INSTITUTO DEL ASFALTO, Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Cementos asfálticos de Superpave, 2010.