



SISTEMA DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA Y CLIMÁTICA PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE LAS CARRETERAS EN MÉXICO

Juan Fernando Mendoza Sánchez
Eduardo Adame Valenzuela
Omar Alejandro Marcos Palomares
Luz Angélica Gradilla Hernández

**Publicación Técnica No. 575
Sanfandila, Qro, 2020**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Sistema de Información Meteorológica y Climática
para el Diseño y Operación de las Carreteras en
México**

Publicación Técnica No. 575
Sanfandila, Qro, 2020

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por el MC Juan Fernando Mendoza Sánchez y los Ingenieros Eduardo Adame Valenzuela y Omar Alejandro Marcos Palomares, miembros del Grupo de Investigación en Medio Ambiente, así como por la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández de la USIG.

Esta investigación es uno de los productos del proyecto de investigación externa IE-19/19 Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras.

Se agradece la colaboración de los integrantes de la Unidad de Información Geoespacial (USIG) del Instituto Mexicano del Transporte.

Contenido

Índice de figuras		iv
Índice de tablas		vi
Sinopsis		vii
Abstract		viii
Resumen	Ejecutivo	x
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Sistema de Información climática para el diseño de carreteras	17
Capítulo 3.	Sistema de Información meteorológica para la operación de carreteras	43
Conclusiones		59
Bibliografía		61

Índice de figuras

Figura 3.1 Relación topografía y clima	10
Figura 2.1. Mapa de climas de México	20
Figura 2.2 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.	22
Figura 2.3 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.	22
Figura 2.4 Vista preliminar de la capa de información climática.....	25
Figura 2.5 Vista preliminar de la capa de información climática – Opción seleccionar estación meteorológica	26
Figura 2.6 Ejemplo de climograma del Sistema	27
Figura 2.7 Ejemplo de diagramas climáticos del Sistema	28
Figura 2.8 Arquitectura del SICliC	29
Figura 2.9 Búsqueda de estación meteorológica del SIClic	30
Figura 2.10 Ejemplo de diagrama climático del SIClic	30
Figura 2.11. Temperatura máxima, estación Acayucan.	31
Figura 2.12. Temperatura mínima, estación Acayucan.	31
Figura 2.13. Precipitación media mensual, estación Acayucan.....	32
Figura 2.14. Presión atmosférica, estación Acayucan.....	32
Figura 2.15. Intensidad de lluvia, estación Acayucan.....	33
Figura 2.16. Velocidad del viento, estación Acayucan.	33
Figura 2.17. Humedad relativa, estación Acayucan.	34
Figura 2.18. Radiación solar, estación Acayucan.....	34
Figura 2.19 Visualización y descarga de datos históricos del SICliC	35

Figura 2.20 Visualización del escenario climático de temperatura en el SICliC	36
Figura 2.21 Visualización del escenario climático de precipitación en el SICliC ...	36
Figura 2.22 Visualización del escenario climático de aumento del nivel del mar en el SICliC	37
Figura 2.23 Visualización mapa del clima en el SICliC	38
Figura 3.1. Estación meteorológica de carretera (RWS)	45
Figura 3.2 Arquitectura de un sistema RWIS	46
Figura 3.3 Visualización de un ARWIS.....	48
Figura 3.4 Red carretera y observaciones del RWIS del Estado de Nueva York ..	49
Figura 3.5 Ejemplo de una aplicación meteorológica de carreteras RWIS en Alemania	50
Figura 3.6 Estación Meteorológica Automática (EMA)	52
Figura 3.7 Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME).....	53
Figura 3.8 Pantalla de visualización de la localización de las Estaciones Meteorológicas en México.....	54
Figura 3.9 Pantalla de visualización de la información meteorológica de las EMA's en México	55
Figura 3.10 Proceso para la alimentación del SIMUC	56
Figura 3.11 Visualización del sistema MAPPIR.....	56
Figura 3.12 Visualización de traza tu ruta del sistema IAVE	57
Figura 3.13 Visualización de diseña tu ruta.....	57

Índice de tablas

Tabla 2.1. Cambios en los índices climáticos por Tmax para el horizonte 2075-2099, con respecto al periodo observado de 1961-2000 23

Tabla 2.2. Ejemplo de ficha técnica para la estación Acayucan del SMN 24

Sinopsis

Este estudio muestra los principales impactos que el clima tiene sobre la infraestructura carretera y como el estado del tiempo influye en la operación de las carreteras.

Con base en lo anterior surgió la idea para desarrollar un sistema de gestión de datos diseñado específicamente para satisfacer la necesidad de mejorar la investigación del clima en las carreteras, la cual permitirá fortalecer las capacidades operativas de la organización de carreteras y, por otro lado, aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera mediante diseños que incluyan la variabilidad climática y el clima futuro.

De esta manera se desarrolló una plataforma denominada “Sistema de información climática para el diseño de carreteras”, mediante el cual los diseñadores/calculistas de carreteras podrán contar con información y datos tanto meteorológicos como climatológicos, que les serán útiles en el diseño de los diferentes elementos que integran un activo carretero.

Adicionalmente, se propuso un Marco para un desarrollo futuro sobre un Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras, mediante el cual se proporcione información meteorológica para la toma de decisiones, tanto para los usuarios como para los operadores de la red de carreteras.

Abstract

This study shows the main impacts that the climate has on the road infrastructure and how the weather influences the operation of the roads.

Based on the state of art, it is indispensable to develop a data management system designed specifically to meet the need to improve climate research on roads, which will strengthen the operational capabilities of the road organization and, on the other hand, increase the resilience of road infrastructure through designs that includes climate variability and future climate.

In this way, a platform called “Climate information system for road design” was developed, whereby road designers / calculators will be able to obtain meteorological and climatological information and data that will be useful in the design of the different elements that integrates a road asset.

Additionally, a future proposal was developed to build a Framework called “Meteorological Information System for Road Users”, through which meteorological information is provided for decision-making, both for users and for the operators of the road network.

Resumen ejecutivo

La infraestructura carretera y los diversos elementos que la integran están diseñados para soportar el clima actual con base en eventos históricos y, con cierta holgura, para soportar variaciones del clima, sin embargo, la hipótesis fundamental es un clima estable y predecible.

Sin embargo, en años recientes, las condiciones climáticas de México han variado considerablemente y esto se ha visto reflejado en diversos impactos en la infraestructura carretera, la cual no ha podido resistir las condiciones prevalecientes del clima extremo.

Esta evidencia hace necesario conocer el comportamiento del clima en el tiempo, que afecta el diseño actual de las carreteras, tales como el cambio de la temperatura media (por regiones), cambios en el ciclo del agua (precipitación, evaporización, etc.), aumento de la temperatura (mayor presencia de sequías, olas de calor prolongadas, etc.), incremento del número de fenómenos hidrometeorológicos extremos, etc.

Una de las estrategias para aumentar la resiliencia en los sistemas carreteros es el uso de información y datos actualizados sobre las diferentes variables meteorológicas y climáticas, que se requieren para el diseño de una infraestructura carretera.

En el presente trabajo se desarrolló una plataforma denominada “Sistema de información climática para el diseño de carreteras”, mediante la cual los diseñadores/calculistas de carreteras podrán contar con información y datos que les serán útiles en el diseño de los diferentes elementos que integran un activo carretero, tales como un pavimento, obras de drenaje, el nivel de subrasante, las pendientes transversales de la calzada, etc.; o de los materiales, por ejemplo, el tipo de asfalto, aditivos, emulsiones, etc. Y, por otro lado, se propuso un Marco para un futuro desarrollo sobre un Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC), mediante el cual se proporcione información meteorológica para la toma de decisiones, tanto para los usuarios como para los operadores de la red de carreteras.

El sistema de información climatológica para el diseño de carreteras (SICliC) es una plataforma tecnológica con base en un visualizador Web, donde el diseñador de una carretera podrá ubicar la estación meteorológica más cerca de su proyecto, para visualizar tanto la información meteorológica como climatológica y, en su caso, descargar la información de referencia.

La arquitectura del Sistema desarrollado está integrada por tres secciones principales y subsecciones, con diversas capas de información, la primera de ellas muestra la información meteorológica y los análisis climáticos sobre el clima histórico, la cual está basada en los datos de estaciones meteorológicas automáticas del país, que se encuentran a una distancia no mayor a 5 kilómetros de una carretera. La segunda sección está compuesta por los escenarios climáticos desarrollados en el país, los cuales estarán disponibles para que el diseñador de carreteras considere los cambios esperados sobre el clima en el futuro. La tercera sección contiene el mapa del clima del país, desarrollado por García (1998) para la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el mapa estaba basado en la clasificación climática de Köppen, el cual fue adaptado debido a la diversidad de microclimas en escalas espaciales muy pequeñas en el país.

El uso potencial del sistema de información climática para el diseño de carreteras puede ser muy amplio, pero también puede tener un crecimiento importante para adaptarse a las necesidades de los ingenieros de carreteras. Por ejemplo, para la temperatura, el Sistema permite: determinar las temperaturas máximas y mínimas del lugar para el diseño de la mezcla asfáltica y, con ello, asegurar un buen desempeño del pavimento; y establecer las temperaturas máximas y mínimas para un futuro cercano (escenario climático) y, con ello, poder seleccionar el asfalto y aditivos adecuados para asegurar la durabilidad y desempeño de la carpeta asfáltica durante toda su vida útil. Una mayor gama de usos potenciales se identificó en la presente publicación, tanto para la temperatura como otras variables, tales como la precipitación, humedad, radiación solar, velocidad del viento, etc.

Este primer esfuerzo en conjuntar la información meteorológica y climática disponible en el país, se espera sea de amplia utilidad en el sector carretero y el académico, ya que el diseño de los diferentes elementos que integran una carretera, demandan datos específicos sobre las diferentes variables del clima y podrán ser consultadas en una fuente específica.

Esta plataforma será dinámica y deberá irse actualizando conforme se genere más información sobre las mediciones de las diferentes variables climáticas en las estaciones meteorológicas del país, así como de la actualización de escenarios futuros sobre el clima, por lo que el mantenimiento de la plataforma informática demandará esfuerzos adicionales.

Los siguientes pasos a seguir serán, por un lado, la constante actualización de la información tanto meteorológica como climática, y, por otro lado, la construcción de mapas climáticos específicos para el diseño de elementos determinados; por ejemplo, la zonificación climática para la selección de asfaltos de acuerdo a las variables de clima tales como la temperatura y la precipitación, acorde a datos medidos actualmente y a los escenarios climáticos futuros.

El otro enfoque abordado, cuyos resultados se muestran en el Marco propuesto para el desarrollo del Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC), es una combinación de tecnologías que utilizan datos climatológicos históricos y actuales para desarrollar información útil sobre el clima para los usuarios de las carreteras y, con ello, ayudar en la toma de decisiones relacionadas con su viaje en la carretera.

El sistema debe considerar qué información y cómo proporcionarla a los usuarios, la cual debe estar basada en la que genera el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el cual cuenta con múltiples herramientas para proporcionar una importante cantidad de información para la predicción del tiempo; las cuales presentan mediciones de las condiciones atmosféricas reales observadas (temperatura, sensación térmica, velocidad y dirección del viento, humedad, precipitación, etc.) en tiempo real. La integración de estos datos en un sistema informático permitiría ofrecer información necesaria para la toma de decisiones, tanto para los usuarios como para los operadores de la red de carreteras.

El análisis refleja que es urgente un esfuerzo coordinado de investigación para aumentar la comprensión de los fenómenos climáticos que afectan las carreteras del país y la implementación de buenas prácticas sobre SIMUC, que permitan aumentar la seguridad, la movilidad y la eficiencia de las carreteras ante el cambio climático y el clima extremo.

Se requieren múltiples mecanismos para comunicar información sobre el clima y las condiciones meteorológicas de la carretera a diversos usuarios, de manera que respalden una toma de decisiones mejor informada.

El país demanda una infraestructura que aprovecha las nuevas tecnologías para monitorear y predecir, de manera efectiva, las condiciones del camino y luego transmitir, también de manera efectiva, la información del clima y las condiciones meteorológicas del camino a los usuarios finales.

Introducción

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en su carácter de brazo científico y tecnológico del Sector, tiene una participación importante en el desarrollo de proyectos que permitan incorporar el cambio climático en los procesos de planeación, diseño, construcción y operación de los activos carreteros.

En México, los efectos del cambio climático han requerido altas inversiones para restaurar/reparar/reconstruir la infraestructura carretera en los últimos años, es por ello que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) debe incrementar los esfuerzos para manejar los riesgos/impactos del cambio climático de diversas maneras, una de ellas es la implementación de soluciones técnicas basadas en ingeniería y el conocimiento disponible, que permitan aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera.

La estrategia principal para aumentar la resiliencia en los sistemas carreteros debe ser la actualización de las normas/reglamentos/guías que incluyan al cambio climático, para que la infraestructura pueda manejar los efectos del cambio climático y continúe prestando los servicios para los que fue diseñada, sin implicaciones negativas sociales o económicas.

La siguiente estrategia, igual de importante, es el uso de información y datos actualizados sobre las diferentes variables meteorológicas y climáticas que se requieren para el diseño de una infraestructura resiliente al cambio climático.

Con la finalidad de apoyar la estrategia indicada en el párrafo anterior, el IMT ha desarrollado el denominado “Sistema de Información Meteorológica y Climática para el Diseño y Operación de las Carreteras en México”, mediante el cual los diseñadores/calculistas de carreteras podrán contar con información y datos que les serán útiles en el diseño de los diferentes elementos que integran un activo carretero, tales como un pavimento, obras de drenaje, el nivel de subrasante, las pendientes transversales de la calzada, etc.; o de los materiales, por ejemplo, el tipo de asfalto, aditivos, emulsiones, etc.

El presente informe está integrado por una revisión bibliográfica plasmada en el capítulo 1 denominado antecedentes, los cuales buscan resaltar la problemática que actualmente tienen las carreteras por el cambio climático y como las diversas variables del clima afectan, de una manera u otra, a la infraestructura carretera y su operación.

En el capítulo 2 se detalla la documentación del “Sistema de información climática para el diseño de carreteras”, donde se plantea la necesidad de información requerida, y se describe la arquitectura del Sistema, así como qué información contendrá y cómo será presentada a los usuarios.

También el capítulo 2 incluye una descripción del uso potencial que la herramienta puede tener para los diseñadores de carreteras y, finalmente, las conclusiones que resaltan la necesidad de contar con este tipo de herramientas.

El capítulo 3 se centra en los sistemas de Información meteorológica para la operación de carreteras, ya que el clima tiene un efecto importante en la seguridad vial, así como en los retrasos en los viajes de las personas y las mercancías. Se incluye en el capítulo un análisis bibliográfico sobre los sistemas y los diferentes usos que están teniendo actualmente en las carreteras.

Se muestran también, en el capítulo 3, las diferentes herramientas que existen para proporcionar información para los usuarios y se enmarca una propuesta de cómo se podría construir un Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC) para México.

Las conclusiones resaltan la importancia de contar con una red de observación de datos meteorológicos robusta e integrada, y un sistema de gestión de datos específicamente diseñado para satisfacer la necesidad de mejorar la investigación del clima en las carreteras, que permita mejorar las capacidades operativas de la organización de carreteras y aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera.

El proyecto busca fortalecer las políticas públicas para la planeación y el diseño de la infraestructura carretera en el país y, a su vez, esta investigación permitirá contribuir al cumplimiento del objetivo 3.6 “Desarrollar de manera transparente, una red de comunicaciones y transportes accesible, segura, eficiente, sostenible, incluyente y moderna, con visión de desarrollo regional y de redes logísticas que conecte a todas las personas, facilite el traslado de bienes y servicios, y que contribuya a salvaguardar la seguridad nacional” del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.

Adicionalmente, también se alinea al objetivo 1.9 “Construir un país más resiliente, sostenible y seguro”, ligado al Programa Especial de Cambio Climático 2019-2024, con el objeto de aumentar los niveles de resiliencia en la infraestructura para el transporte.

Estos objetivos se correlacionan directamente con la línea de investigación en medio ambiente y cambio climático de la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del IMT.

1 Antecedentes

El estado del tiempo y el clima afectan de diferentes maneras al transporte, tanto a su operación como a su infraestructura.

El estado del tiempo, o tiempo meteorológico, refleja las condiciones de la atmósfera en un corto plazo, mientras que el clima es el promedio diario del estado del tiempo durante un período prolongado en una cierta ubicación.

El clima, según la Sociedad Americana de Meteorología (2019), está caracterizado típicamente en términos de promedios adecuados del sistema climático en períodos de un mes o más, tomando en consideración la variabilidad temporal de los valores promediados. La clasificación climática incluye la variación espacial de estas variables promediadas en el tiempo.

Tanto el estado del tiempo como el clima son el resultado de la interacción de sistemas terrestres y oceánicos, tales como la humedad en el ciclo del agua, el calor o el movimiento de los océanos. Para estudiar las complejas interacciones del clima y el estado del tiempo, los científicos recogen información de datos observados sobre precipitación, temperatura, humedad, velocidad y dirección de los vientos, presión atmosférica, entre otras.

El mal tiempo asociado a las diferentes variables meteorológicas influye en la operación de la infraestructura carretera, afectando la fluidez del tránsito, impactando en los tiempos de viaje y en la capacidad vial, así como en la seguridad vial. Los factores asociados al clima que influyen en la operación se detallan en el apartado 1.1.

Por otra parte, el clima extremo además de influir también en la operación, impacta en los elementos de la infraestructura carretera, ya que las variables extremas rebasan el umbral de diseño de la carretera, por lo que requiere ser adaptada.

El clima extremo se encuentra asociado al cambio climático, por ello también se requiere conocer la influencia del clima futuro en la infraestructura carretera, para poder actualizar los estándares de diseño con el objetivo de aumentar la resiliencia. Esto requiere conocer cómo influye el clima en la infraestructura carretera, lo cual se detalla en el apartado 1.2.

El conocer los impactos del clima a través de los cambios que han sufrido las variables meteorológicas y climáticas nos permitirá diseñar una plataforma que coadyuve a proporcionar información y que sea una herramienta para los diseñadores de carreteras en el país.

1.1 Factores asociados al clima que influyen en la operación de una carretera

Los factores que influyen en un buen o mal desempeño de una carretera se pueden agrupar en meteorológicos, geográficos y constructivos.

1.1.1 Factores meteorológicos

Los parámetros meteorológicos son usados para determinar el estado que podría tener el camino, con el objetivo de evaluar su influencia en la operación y la seguridad de la carretera.

A continuación, se listan los parámetros meteorológicos que influyen en la operación de la carretera y se describe la manera en que lo hacen.

1.1.1.1 Temperatura

La temperatura del aire influye en la operación vehicular de diversas maneras, ya sean temperaturas frías o cálidas, derivadas de frentes frío u ondas de calor, las cuales también son acompañadas por fenómenos tales como la nieve, la sequía, etc.

Para los operadores de carreteras, la temperatura y los fenómenos meteorológicos que pueden derivarse con ella influyen en las estrategias de mantenimiento de la carretera, por ejemplo, en la limpieza de nieve o el descongelamiento de los pavimentos.

La información sobre temperatura y sus variaciones auxilia a los operadores de carreteras en la detección oportuna de riesgos para una atención preventiva.

Los cambios de temperatura, particularmente las variaciones extremas pueden causar daños severos en el pavimento debido a la expansión, la contracción y (en el caso de los pavimentos rígidos) el alabeo de las losas.

En el caso de los pavimentos flexibles, la reología del asfalto se altera debido a las altas temperaturas y modifica el desempeño de la carpeta asfáltica, generando deformaciones en los pavimentos. Adicionalmente, si la viscosidad es baja, los neumáticos de los vehículos pueden recoger el asfalto al pegarse en ellos.

Es importante alertar a los usuarios sobre altas temperaturas, que afectan el desempeño del vehículo y producen daños físicos, además podrían impactar en la seguridad, ya que se pierde uniformidad y resistencia al deslizamiento (fricción) durante el frenado.

La temperatura afecta también la presión del aire en los neumáticos, los cuales se expanden cuando hay calor y se contraen con el frío. Los usuarios deben considerar

la temperatura para mantener una presión adecuada de los neumáticos, que a su vez les permita asegurar la maniobrabilidad y la tracción del vehículo, así como la durabilidad de las llantas.

Las observaciones de la temperatura también pueden predecir dónde y cuándo se pueden presentar condiciones de congelación en la superficie de rodamiento, que afectan la circulación vehicular y que requerirán atención por parte de los operadores de las carreteras, así como alertar a los usuarios.

Las altas temperaturas en los vehículos de carga, que utilizan sistemas de enfriamiento, requieren ser alertados para estimar adecuadamente su consumo energético, pero también para evitar daños en los vehículos por sobrecalentamiento.

1.1.1.2 Precipitación

Dependiendo el tipo de precipitación, la intensidad y la duración, puede tener diferentes efectos en la operación de las carreteras, tales como la reducción de la capacidad, disminución de la velocidad de operación, incremento de los tiempos de viaje y el riesgo de accidentes. Estos impactos se deben principalmente a una reducción de la distancia de visibilidad y de la fricción de la superficie del pavimento, así como de eventuales obstrucciones.

Los usuarios pueden requerir información sobre la precipitación para tomar decisiones, ya que las precipitaciones afectan el desempeño de los conductores

La precipitación reduce la distancia de visibilidad a los conductores, por lo que deben disminuir la velocidad para transitar de forma más segura.

Los dispositivos para el control del tránsito, tales como semáforos, señalamiento horizontal o vertical pierden significativamente la visibilidad en presencia de precipitación intensa.

La acumulación de agua en la superficie de rodamiento nos lleva a una pérdida de fricción entre los neumáticos del vehículo y el pavimento, aumentando el riesgo de deslizamientos y accidentes. Si el nivel continúa aumentando, entonces se pueden presentar cierres parciales o totales de la vía, para lo cual se requieren de sensores que evalúen el crecimiento de la película de agua, y posteriormente informar a los usuarios para extremar precauciones o utilizar rutas alternas.

1.1.1.3 Velocidad del viento

Las carreteras suelen tener impactos por el viento, debido a su arrastre, ya que en temporadas de sequías transportan polvos que reducen la visibilidad, y en temporadas de lluvias arrastran escombros o materia vegetal desprendida. En la operación de las carreteras puede tener diferentes efectos, tales como la disminución de la velocidad de operación, incremento de los tiempos de viaje y el riesgo de accidentes.

La información que pueda afectar a los usuarios debe ser distribuida a los conductores, de tal manera que extremen precauciones para evitar accidentes por la inestabilidad que los vientos podrían tener en los vehículos, o impactos potenciales con los objetos depositados por el viento en la calzada del camino.

La velocidad del viento asociada a fenómenos como huracanes o ciclones tropicales puede llevar a cierres parciales o totales de las carreteras, y deberían comunicarse a los usuarios para que extremen precauciones o utilizar rutas alternas, o considerar no realizar su viaje.

1.1.1.4 Humedad relativa y punto de rocío

Los valores de humedad o de punto de rocío son poco visibles para los usuarios de las carreteras, sin embargo, son factores que causan problemas a la infraestructura carretera y pueden poner en riesgo a los usuarios.

El contenido de agua en el suelo, ya sea en los taludes (corte y terraplén) o en las capas de los pavimentos, puede afectar el comportamiento mecánico, por lo que conocer la humedad del ambiente permite a los operadores de carreteras tomar decisiones sobre la gestión de activos y el monitoreo de taludes.

La humedad en regiones frías o las regiones que estacionalmente tienen incrementos de humedad son altamente susceptibles en el deterioro de los pavimentos, ya que la alta concentración de humedad acelera el deterioro. Las organizaciones de carreteras deben considerar este factor en sus programas de mantenimiento, ya que en pavimentos asfálticos el contenido de humedad afecta la rigidez de la carpeta y promueve el desprendimiento de agregado con poca adherencia.

El ingreso de humedad por el descongelamiento influye en la rigidez de las capas de los pavimentos, así como en los suelos aledaños al camino.

El punto de rocío tiene una correlación directa con la interacción de la humedad con la carretera. El punto de rocío es la temperatura a la que debe enfriarse el aire para que se produzca la saturación del aire.

De acuerdo a Talerton (2009), el punto de rocío es un valor crítico para monitorear el pavimento porque la temperatura del pavimento puede caer por debajo del punto de rocío del aire. Cuando esto ocurre, la condensación comienza a ocurrir en la superficie del pavimento. Si la superficie del pavimento está por debajo del punto de congelación, entonces comienza a formarse escarcha en la superficie, volviéndose peligroso, ya que el efecto no es visible para los conductores y pone en riesgo la seguridad.

Un ejemplo son los puentes y las estructuras elevadas que se enfrían más rápido que el aire circundante y que, muchas veces, pueden caer por debajo del punto de rocío del aire, lo que hace que se forme escarcha en el puente si está por debajo

del punto de congelación. Otro caso es cuando el aire húmedo del océano se desplaza tierra adentro y durante la noche enfría la carretera.

Para los usuarios es importante contar con información sobre la temperatura, la humedad y el punto de rocío, mediante mensajes fáciles de comprender para que extremen precauciones.

1.1.1.5 Nubosidad

La distribución de la capa de nubes está relacionada con las propiedades del viento, el sistema meteorológico y la situación del calor de la superficie del mar, la topografía y otros factores.

Las nubes tienen efectos de enfriamiento y calentamiento en la superficie de la Tierra.

Las condiciones de nubosidad representan para los usuarios una mayor o menor sensación sobre la temperatura, y los alertan de la posible presencia de un fenómeno meteorológico (lluvia, nieve, etc.) o de un aumento de la radiación solar.

La cobertura de nubes y la radiación solar están correlacionadas y, por lo tanto, la temperatura de la carretera, y esto puede derivar en diferentes efectos; por ejemplo, valores más bajos de radiación solar asociados con la lluvia pronosticada dan como resultado predicciones de temperatura de la carretera más bajas.

Adicionalmente, la nubosidad puede tener impacto en la visibilidad para los usuarios.

1.1.1.6 Niebla

El efecto principal de la niebla para los usuarios es en la distancia de visibilidad, la cual afecta el comportamiento de los conductores y de sus habilidades, así como las características del vehículo. En la operación de las carreteras puede tener diferentes efectos, tales como la reducción de la capacidad vial, la disminución de la velocidad de operación, incremento de los tiempos de viaje y el riesgo de accidentes.

Los dispositivos para el control del tránsito, tales como semáforos, señalamiento horizontal o vertical pierden significativamente la visibilidad en presencia de niebla.

La presencia de niebla debe ser informada a los usuarios para que extremen precauciones durante su viaje y, con ello, evitar accidentes. Es probable que los viajes puedan ser suspendidos por parte de los usuarios, o que la organización de carreteras realice cierres parciales o totales de la vía afectada.

1.1.1.7 Radiación solar

Las superficies físicas, tales como las carreteras, pueden absorber la radiación solar a una profundidad máxima de 1-2 mm.

Para las organizaciones de carreteras es importante considerar la radiación solar, ya que la mayoría de los trabajadores de mantenimiento de carreteras se encuentran constantemente expuestos, y que dicha exposición genera efectos negativos en la salud de las personas, particularmente por los rayos ultravioleta, que provocan impactos oculares y cutáneos.

La radiación solar reduce la vida útil de los pavimentos carreteros, ya que envejece la película de asfalto, provocando agrietamientos.

Los desperfectos de la carretera son de especial interés para los usuarios, ya que estos afectan la operación y desempeño de los vehículos, provocando reducciones de velocidad, disminución de la capacidad vial, etc.

Adicionalmente los usuarios son vulnerables a los efectos de la radiación solar, por lo que deberán extremar precauciones en su cuidado personal.

1.1.2 Factores geográficos

La localización geográfica de la carretera la puede volver más vulnerable al clima y los fenómenos meteorológicos. A continuación, se describen como los diferentes parámetros asociados a la localización geográfica influyen a través del clima en la operación de las carreteras.

1.1.2.1 Latitud y Longitud

La latitud tiene una influencia importante en el clima. Las regiones con latitudes más altas tienen inviernos más fríos, propensos a nieve, congelamiento, etc. Por otro lado, la latitud determina también la cantidad de radiación solar.

La longitud permite identificar la proximidad al mar y, por lo tanto, influir en la nubosidad y la vulnerabilidad a ciclones tropicales.

1.1.2.2 Altitud

La altitud tiene una influencia importante en la temperatura superficial de la carretera. A una mayor altura, la temperatura disminuye. La altitud sobre el nivel del mar tiene un efecto notable sobre la densidad del aire y su composición.

El desempeño de los vehículos también se modifica con la altitud. Los motores de combustión interna utilizan sistemas para combustibles de base volumétrica, es por ello que la altitud puede modificar su ciclo termodinámico de operación y, por lo tanto, disminuir su rendimiento.

Los sistemas eléctricos de los vehículos, o de los dispositivos para el control del tránsito, deben considerar las condiciones atmosféricas asociadas a la altitud, para asegurar un óptimo desempeño. El rendimiento de los equipos puede verse afectado por la densidad relativa del aire.

1.1.2.3 Topografía

De acuerdo a White et al. (2006), la topografía hace diferencias considerables en la temperatura del aire que influye en la superficie de las carreteras. La topografía causa que, por ejemplo, en una red de carreteras en los fondos de los valles, se forme una capa de aire frío causando una inversión de temperatura.

Los flujos de aire frío se mueven entre las líneas de drenaje hasta alcanzar una barrera topográfica o térmica.

Las características topográficas dominan el flujo de aire a nivel local, y las velocidades del viento aumentan con la elevación y la exposición.

Los modelos que se construyan para advertir con anticipación a los usuarios sobre cualquier riesgo, deben considerar la topografía como un factor que potencia el clima y la meteorología tanto local como regionalmente.

Las carreteras y la topografía pueden determinar los patrones de uso de la tierra y la distribución de la cubierta forestal, situaciones que las organizaciones de carreteras deben tomar en cuenta para la toma de decisiones.

Las pendientes más pronunciadas promueven, conjuntamente con la precipitación, la formación de flujos de lodos, flujos de escombros y deslizamientos de tierra, que representan un peligro para los usuarios de las carreteras.

La figura 3.1 muestra como el clima de seco a húmedo, y de acuerdo a las condiciones de topografía, puede producir impactos en la carretera, que ponen en riesgo la operación y la seguridad de los usuarios.



Figura 3.1 Relación topografía y clima

Fuente: Adaptada de la Encyclopedia Britanica Inc, 1999.

1.1.3 Factores de la carretera

El camino, las características de su construcción, y los materiales empleados pueden tener alteraciones en el clima y, por lo tanto, afectar a los usuarios de las carreteras.

La isla de calor, por ejemplo, es una consecuencia de los cambios microclimáticos causados por la carretera; particularmente, por el pavimento asfáltico y las dimensiones de la calzada, la cual absorbe el calor durante el día y lo irradia, generando un aumento mayor de la temperatura en la carretera con respecto del entorno y, durante la noche, la carretera puede ser varios grados más cálida que sus alrededores.

El término "memoria térmica" se usa para describir la cantidad de tiempo que una superficie almacena el calor de la radiación solar durante el día. La admitancia térmica parametriza el presupuesto de calor de la superficie con respecto a la tasa de calor que se absorbe (albedo) y se emite (emisividad) (White et al, 2006). Las carreteras con pavimentos de granulometría abierta o porosos se enfrían más rápidamente que las superficies normales de las carreteras y tienen temperaturas mínimas más bajas.

El tráfico vehicular incrementa la temperatura en la carretera, pero adicionalmente genera corredores de aire caliente, también evita la pérdida de radiación de onda larga en la superficie de la carretera. El impacto se incrementa cuando aumenta el

número de vehículos y el número de carriles. El calor se agrega a la superficie de la carretera a través del calor sensible y los flujos de humedad del motor y del escape, así como de la disipación del calor por fricción de los neumáticos y el frenado.

1.2 Factores climáticos que influyen en la infraestructura carretera

El cambio climático y el clima extremo afectan el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de la infraestructura carretera.

La temperatura, las precipitaciones, las tormentas y otros fenómenos o variables climáticas están afectando los activos carreteros que conforman los sistemas de transporte y lo seguirán impactando en el futuro.

Los posibles impactos climáticos permiten describir cómo los efectos del clima pueden afectar a las carreteras, por ello es importante identificarlos y conocer la manera en que influyen/impactan/dañan a la infraestructura, debido principalmente a su exposición y a la duración del fenómeno climático extremo.

1.2.1 Precipitación

La precipitación extrema asociada a lluvias severas y ciclones tropicales/huracanes, incrementa los flujos de agua, los cuales debido a su incremento pueden rebasar los umbrales de diseño actual de las obras de drenaje, llevando en ocasiones a la pérdida de las mismas.

El aumento de los caudales pico podría afectar las tasas de socavación, las cuales deben ser revisadas para mantener la integridad estructural de las obras de drenaje.

Los cambios en la precipitación influyen en el requisito “periodo de retorno” para determinar las dimensiones de algunas estructuras, tales como puentes y alcantarillas.

Otro elemento son los cambios en los patrones superficiales de los escurrimientos, los cuales pueden requerir la reubicación de obras de drenaje o la implementación de obras adicionales.

En ríos, los cambios en los flujos de agua pueden erosionar/socavar los apoyos de los puentes (pilas y estribos), debido al aumento de la precipitación en algunas regiones.

La velocidad del flujo debe considerar los cambios actuales, ya que influyen en los impactos y en la estabilidad de la infraestructura, y también en el arrastre de sedimentos, provocando aluviones.

La acumulación de agua en la superficie de rodamiento implica que se debe asegurar un buen mantenimiento de las carreteras para evitar que el agua se infiltre en las capas del pavimento.

La intensidad de la lluvia acelera el deterioro de los pavimentos, por lo que se debe considerar en el diseño de la mezcla asfáltica y del pavimento, para asegurar que el diseño se conserve adecuadamente todo el periodo de vida útil. Será necesario también que las labores de conservación se incrementen para proteger y mantener en buen estado la superficie de rodamiento.

La intensidad de la lluvia también afecta el bombeo en la calzada de las carreteras, dicha pendiente puede requerir ser adaptada en zonas donde la precipitación ha cambiado, para desalojar el agua más rápidamente de la superficie de rodamiento.

En zonas potencialmente inundables, el acumulamiento de agua puede afectar las capas del pavimento, por ello se debe asegurar que se cuente con todo el drenaje superficial y subterráneo.

La precipitación intensa reduce la visibilidad de la señalización en la carretera, tanto las marcas en el pavimento, como las señales verticales. Por eso, en los dispositivos para el control del tránsito se deben actualizar las características de los materiales y sus diseños para asegurar su función, así como garantizar la seguridad a los usuarios.

Los caminos no pavimentados deben considerar la precipitación y sus cambios como una variable que afecta la transitabilidad del camino y, por lo tanto, demandará más recursos para su conservación.

Finalmente, el diseño de la subrasante mínima debe considerar un periodo de retorno adecuado en función del cambio climático para evitar inundaciones de la calzada.

1.2.2 Humedad

La alta precipitación asociada al cambio climático produce un incremento de la humedad del suelo, cambiando su grado de cohesión, y puede provocar inestabilidad en taludes, terraplenes y laderas, provocando deslizamientos y deslaves de material.

Adicionalmente, la humedad del suelo puede poner en riesgo la integridad estructural de los pavimentos, puentes, alcantarillas, etc., cuando éste se encuentra funcionando como suelo de cimentación.

En algunas regiones se presentará una disminución de la humedad en la orilla del camino, por lo que no se podrá mantener la cubierta vegetal adecuada, generando erosión y deslizamientos de material, provocando además cambios en el paisaje.

La pérdida de humedad puede degradar las capas de cimentación del pavimento, por lo que los diseños deben considerar la falta de humedad y lo que esto representa en la compactación de los suelos.

La falta de humedad por periodos prologados genera sequías, las cuales incrementan la probabilidad de tener incendios forestales, provocando el cierre de carreteras debido a la amenaza del incendio o de visibilidad reducida. Las áreas deforestadas por los incendios forestales reducen la capacidad de absorción del suelo e incrementan los escurrimientos superficiales, impactando en las obras de drenaje.

En caminos no pavimentados, la falta de humedad generará una excesiva generación de polvos que afectan la salud de las personas, pero también la transitabilidad del camino al reducir la visibilidad.

1.2.3 Temperatura máxima

La temperatura máxima o mínima de un lugar/región permiten diseñar diversos elementos de las carreteras, las cuales en los últimos años se han visto alteradas y son más extremas. El cambio climático, de acuerdo a los diferentes escenarios, provocará que el planeta se caliente aún más, por lo que se esperan cambios de aproximadamente dos grados de temperatura.

El aumento en la frecuencia y severidad de temperaturas extremadamente altas pueden conducir a diferentes impactos en la infraestructura carretera, incluyendo que los periodos de mucho calor se prolonguen (olas de calor).

Las altas temperaturas hacen que el pavimento se ablande y se expanda provocando daños en la carpeta asfáltica, tales como: surcos, depresiones, canalillos, exudación de asfalto, etc.; por lo que se requerirá que los diseños de la carpeta, particularmente el pavimento asfáltico, consideren en su diseño los cambios extremos de la temperatura en el lugar. Adicionalmente, se requerirá un mayor mantenimiento correctivo para reparar los daños en el pavimento.

Los rayos UV, que actualmente tienen una mayor concentración en el planeta, pueden degradar el asfalto, deteriorando el pavimento en un lapso más corto.

Los diferentes elementos de apoyo en puentes, tales como los cojines pueden verse alterados por las altas temperaturas, provocando estrés en la integridad de la estructura.

Las altas temperaturas también afectan las juntas de expansión térmica en los pavimentos de concreto, por lo que deberán considerar la temperatura extrema del lugar. Lo mismo ocurre para evaluar el comportamiento de la losa de concreto por temperatura, considerando sus diferentes comportamientos bajo los nuevos escenarios climáticos.

Las altas temperaturas pueden afectar los circuitos eléctricos de los sistemas de señalización, por lo que habrá que considerar que estos puedan operar bajo estrés climático.

1.2.4 Temperatura mínima

Las temperaturas extremadamente bajas provocan daños a la infraestructura carretera, particularmente a los pavimentos. Afortunadamente, en el país son pocas zonas donde se presentan fenómenos como granizadas, nevadas o heladas, que traen consigo impactos en la infraestructura.

En el diseño de pavimentos se deben considerar los ciclos de congelación-descongelación, ya que las heladas afectan la superficie de la carretera, provocando daños a los materiales y también efectos en el comportamiento estructural.

El agua se expande cuando se congela y cuando se calienta. Esta propiedad causa problemas cuando la humedad del suelo se congela y deshíela, alterando la estabilidad de las capas de sub-base y base, causando que el pavimento se agriete, para ello se requiere conocer esta condición para el diseño.

Las heladas pueden provocar congelamiento de la superficie de rodamiento, por lo que el diseño de la mezcla deberá ser capaz de absorber cualquier posible deflexión o deformación bajo esa condición de estrés. Por otra parte, se debe considerar mejorar la superficie de rodamiento para esta condición, quizás con mezclas de granulometría abierta.

El deshíelo del granizo o una nevada eventual generan una mayor cantidad de agua que aumenta el flujo de los escurrimientos superficiales y pueden colapsar los sistemas de drenaje, por lo que estas condiciones deben ser actualizadas e incluidas en los diseños de los diferentes elementos para el drenaje carretero, con el fin de desalojar el agua de manera más eficiente y rápida.

En el caso de puentes u otras estructuras se deberá considerar el peso de las granizadas o nevadas, si es que no está incluido en el diseño original, particularmente en puentes y alcantarillas, que pueden provocar su colapso.

Las bajas temperaturas pueden afectar los circuitos eléctricos de sistemas de señalización.

1.2.5 Velocidad del viento

Los vendales o vientos fuertes, generados por tormentas severas o ciclones tropicales/huracanes, impactan en los elementos de la infraestructura provocando su caída, tales como las señales verticales bajas y/o elevadas, árboles, postes de energía eléctrica y anuncios publicitarios sobre la calzada del camino.

Los vientos fuertes también provocan erosión en los taludes y terraplenes, provocando acarreo de escombros y basura sobre la superficie de rodamiento.

En algunos casos, el viento ha afectado la integridad estructural en los puentes, al afectar algunos elementos.

Las marejadas de tormentas derivados de vientos fuertes hacen que las carreteras costeras sean especialmente sensibles a inundaciones más frecuentes y permanentes. Las marejadas tenderán a modificar la forma de la línea costera afectando a las carreteras localizadas en esa zona, así como la socavación de las capas de base de la carretera.

2 Sistema de Información climática para el diseño de carreteras

La infraestructura carretera y los diversos elementos que la integran están diseñados para soportar el clima actual con base en eventos históricos y, con cierta holgura, para soportar variaciones del clima; sin embargo, la hipótesis fundamental es un clima estable y predecible.

Sin embargo, en años recientes, las condiciones climáticas de México han variado considerablemente y esto se ha visto reflejado en diversos impactos en la infraestructura carretera, la cual no ha podido resistir las condiciones prevalecientes del clima extremo.

Esta evidencia hace necesario conocer el comportamiento del clima en el tiempo que afecta el diseño actual de las carreteras, tal como el cambio de la temperatura media (por regiones), cambios en el ciclo del agua (precipitación, evaporización, etc.), aumento de la temperatura (mayor presencia de sequías, olas de calor prolongadas, etc.), incremento del número de fenómenos hidrometeorológicos extremos, etc.

Estos efectos, derivados del cambio climático, requieren que los tomadores de decisiones en las organizaciones de carreteras actualicen los umbrales de diseño para sus activos y que, con ello, puedan enfrentar un clima cambiante y extremo, y que además sea resiliente en el futuro con las diferentes proyecciones/escenarios del cambio climático a pesar de las incertidumbres de los modelos actuales.

Al actualizar las normas de diseño, o los criterios o variables climáticas utilizadas, se puede iniciar el proceso de adaptación al cambio climático para la infraestructura carretera, tanto la existente como la futura.

La mayoría de los activos carreteros son construidos para durar 50 años o más, por lo que comprender cómo los cambios futuros en el clima pueden afectar en el futuro a esta infraestructura resulta importante para la protección de estas inversiones en el largo plazo.

Esta actualización requiere, además, contar con información/datos que permitan conocer el comportamiento de las variables meteorológicas y climáticas en el tiempo, para aumentar la confiabilidad de los diseños y que puedan resistir los impactos futuros.

De esta manera, se planteó la necesidad de consolidar una herramienta que permita a los diseñadores actualizar sus variables del clima para el diseño de los diferentes elementos de las carreteras.

Esta herramienta requiere analizar la información de clima y establecer los medios para representarla, de tal manera que sea accesible para los usuarios.

2.1 Análisis del clima

El análisis de las diferentes variables de estado del tiempo, en determinados lapsos, permite construir el clima del lugar. El registro climático también incluye valores extremos tales como altas temperaturas récord o cantidades récord de lluvia.

La información recopilada sobre el estado del tiempo es utilizada para crear modelos climáticos que permitan predecir el clima local, regional o mundial, para diferentes periodos.

Si los periodos de análisis son cortos, entonces se está hablando de variabilidad climática. En el caso del cambio climático se refieren a cambios en el clima en periodos de largo plazo.

El clima, según la Sociedad Americana de Meteorología (2019), está caracterizado típicamente en términos de promedios adecuados del sistema climático en periodos de un mes o más, tomando en consideración la variabilidad temporal de los valores promediados. La clasificación climática incluye la variación espacial de estas variables promediadas en el tiempo.

Los procesos climáticos presentan irregularidades, por lo que se tiene mucha incertidumbre al estimar su probabilidad de ocurrencia, por eso, el uso de la estadística permite describir los datos, calcular la incertidumbre, entre otros.

La climatología analítica se basa en el análisis estadístico de las características meteorológicas que se consideren más significativas. Se busca, principalmente, establecer valores medios o extremos de los elementos atmosféricos y, con base en ellos, estimar las probabilidades de que se vuelvan a presentar.

La aplicación de los métodos estadísticos ayuda a comprender el clima, identificar correlaciones entre las diferentes variables (por ejemplo, las altas temperaturas se presentan en los meses de verano). El análisis de las observaciones climáticas puede ayudar a predecir con cierta certidumbre el clima futuro.

Las clasificaciones climáticas incluyen la diferenciación espacial de estas variables promediadas en el tiempo.

A pesar de las incertidumbres climáticas actuales, es posible mediante métodos estadísticos y con datos de registros de variables meteorológicas realizar análisis

que puedan proveer información sustancial del clima, ya que estos métodos permiten estimar la precisión de las predicciones (Wilks, 2006).

2.2 Representación de la información climática

En la actualidad existen diversos trabajos para representar la información de los análisis del clima, los cuales son base de múltiples estudios que permiten obtener escenarios actuales sobre la dinámica de las variables climáticas. En el presente trabajo se utilizarán diferentes herramientas y modelos para representar la información climática de interés para el diseño de carreteras.

2.2.1 Mapas climáticos

Un mapa meteorológico, o mapa del tiempo, es una representación gráfica de las condiciones meteorológicas de una zona determinada en un momento de tiempo dado. Los mapas están basados en datos obtenidos a partir de los satélites y estaciones meteorológicas.

Por otro lado, cuando los mapas representan la información o los registros meteorológicos durante décadas u otros periodos de tiempo (usualmente asociados a la disponibilidad de datos), se refieren a mapas climáticos que muestran la información sobre el clima del lugar. Los mapas pueden representar los climas de una región, de un país o del mundo en general. Las representaciones utilizan información simple o combinada de precipitación, temperatura y características geográficas.

En México, García (1998) elaboró un catálogo de mapas climáticos que representan los diferentes tipos de climas de la República Mexicana, de acuerdo a la clasificación de Köppen. La adaptación realizada por García fue a escala 1:1000000, con el apoyo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

La clasificación climática de Köppen no era del todo adecuada en el país, debido a la diversidad de microclimas en escalas espaciales muy pequeñas, por ello García propuso realizar adaptaciones a la metodología de Köppen.

Algunos de las modificaciones más importantes son poder considerar la altitud como un factor importante en la distribución de climas, así como incluir otras divisiones al sistema de Köppen con nuevos criterios de clasificación.

De acuerdo a la figura 2.1, México cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la precipitación del lugar en: húmedo, subhúmedo y muy seco.

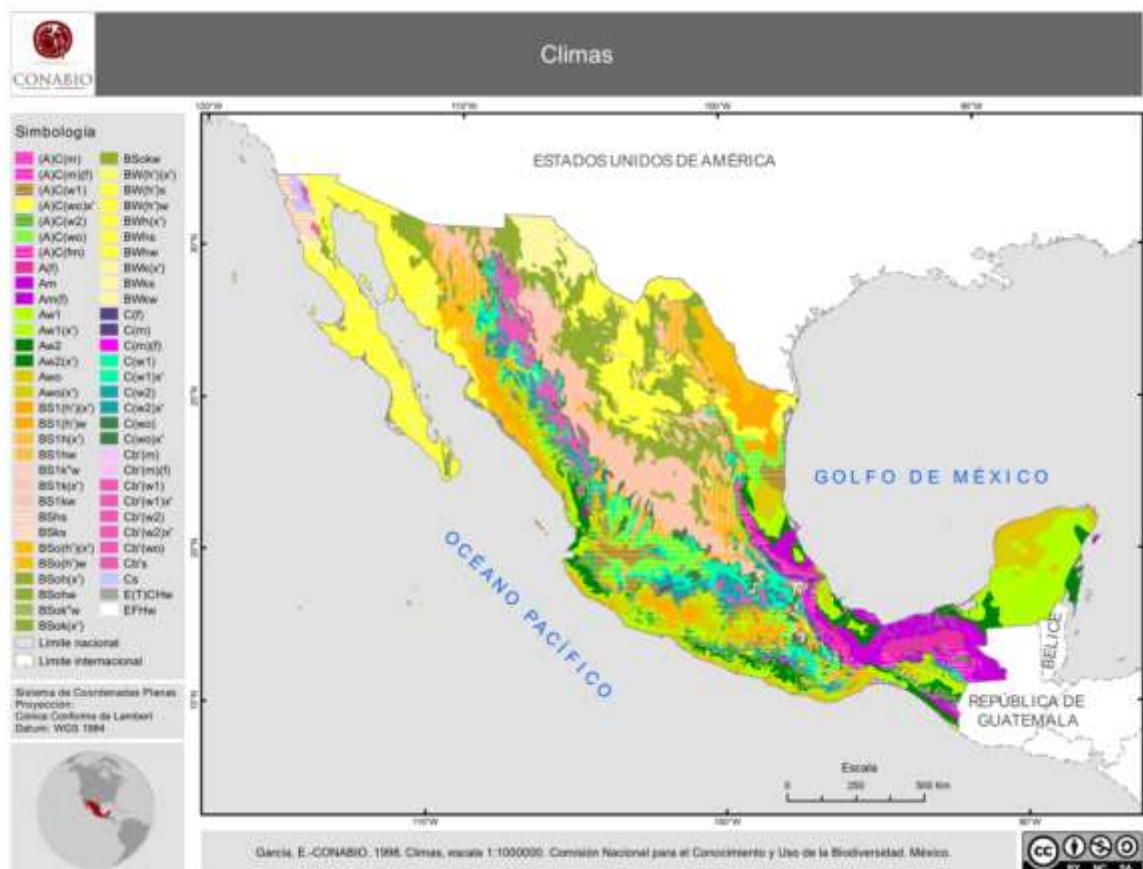


Figura 2.1. Mapa de climas de México

Fuente: García (1998) y CONABIO.

Cuando se carece de mapas más específicos del clima, este mapa digital puede ser utilizado para estudios regionales, sin embargo, es importante hacerse llegar de información más actualizada para identificar los máximos y mínimos de las variables del clima extremo, que son justamente los que alteran el desempeño de la infraestructura vial.

2.2.2 Escenarios climáticos

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático y, en particular, para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota [IPCC, 2000].

Los escenarios climáticos tienen una representación geoespacial, pero están basados en el uso de modelos numéricos. Dependiendo de la información disponible, de la tecnología y de los modelos utilizados, se pueden utilizar diferentes periodos de análisis y mejorar la resolución espacial.

Para el Reporte 5 del IPCC (2013), se han definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, basados en las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².

Las cuatro trayectorias RCP comprenden diferentes escenarios futuros:

- RCP 8.5, es un escenario con alta concentración de emisiones (posible desarrollo para poblaciones numerosas, alto uso de energía fósil / carbón).
- RCP 6.0, es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario base de bajo a mediano o escenario de alta mitigación).
- RCP 4.5, es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario con una alta mitigación).
- RCP 2.6, es un escenario de baja concentración de emisiones.

Se estima que el RCP 2.6 representa un escenario de mitigación, el RCP 4.5 y RCP 6.0 son escenarios de estabilización y el RCP 8.5 corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los RCP representan el forzamiento radiactivo (FR) total calculado para el año 2100 respecto al año 1750 (por ejemplo, el RCP 2.6 significa 2.6 W/m²).

Con base en estos escenarios de emisiones de referencia se realizan las proyecciones tomando en cuenta las estimaciones de aumento de temperatura realizadas por el IPCC.

Las proyecciones climáticas que se utilizan para este proyecto fueron desarrolladas por diferentes especialistas para el INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), y se basan los cambios en la temperatura y la precipitación; así como las proyecciones del aumento del nivel del mar del CReSIS (Center of Remote Sensing of Ice Sheets),.

A manera de ejemplo, en cada una de las figuras 2.2 y 2.3 se muestra un mapa climático que representa un futuro bajo diferentes escenarios para la temperatura y la precipitación, los cuales estarán disponibles para los diseñadores, sobre los cuales podrán determinar las variables requeridas para diseñar elementos con vida útil de largo plazo, tales como los puentes.

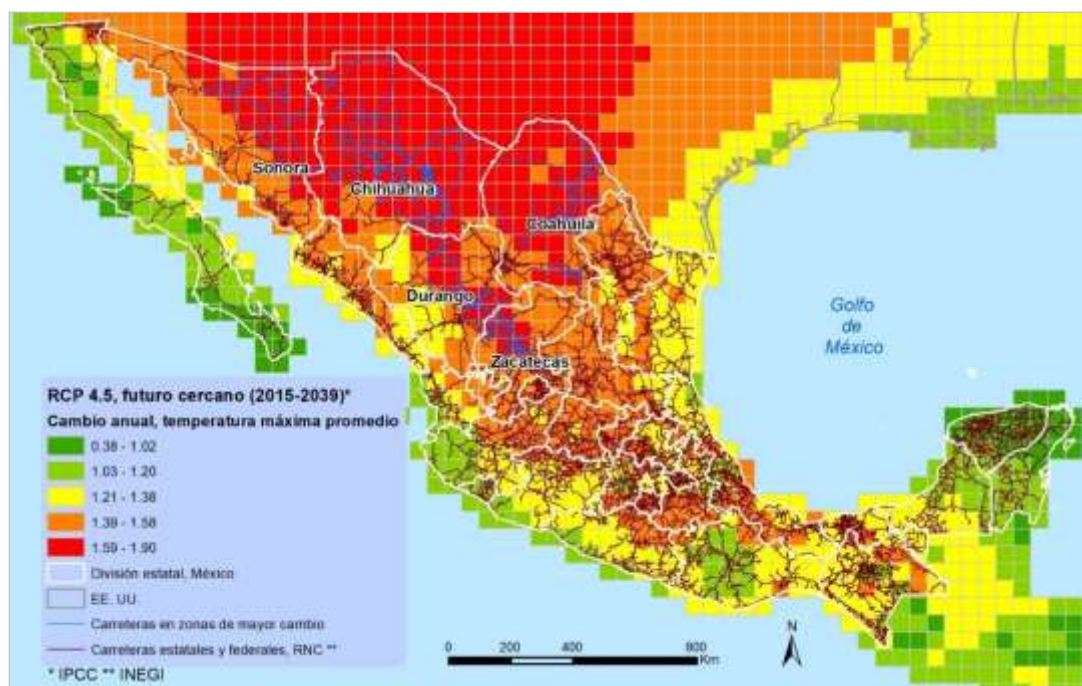


Figura 2.2 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.

Fuente: Obtenido de Gradilla et al. (2018) con información del INECC y del INEGI.

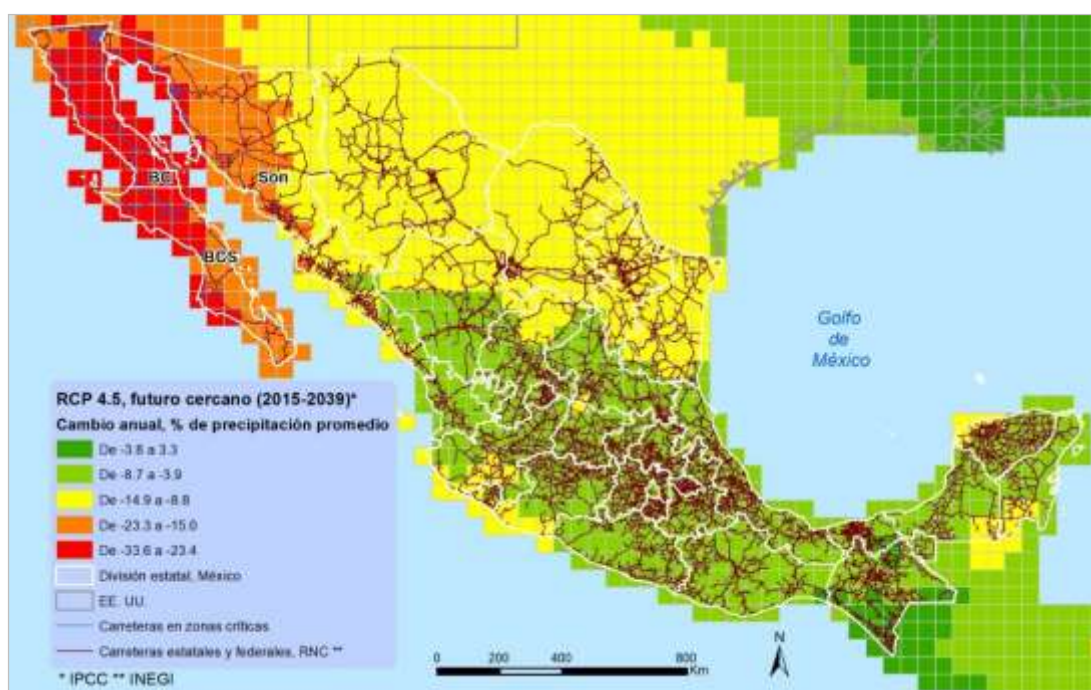


Figura 2.3 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.

Fuente: Obtenido de Gradilla et al. (2018) con información del INECC y del INEGI.

Las variables de análisis para las proyecciones realizadas por el INECC y que formaran parte del sistema de información son: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación y aumento del nivel del mar.

El aumento del nivel será importante para la determinación del nivel de la subrasante en las carreteras costeras.

Los periodos de análisis son: futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). Estos corresponden a lapsos de 25 años para cada uno.

En relación a los cambios de temperatura, la tabla 2.1 muestra un resumen por región de los cambios esperados, de acuerdo a los estudios realizados por Cavazos et al. (2013), donde determinaron alteraciones en diversas variables climáticas, de acuerdo a los escenarios de análisis y los diversos horizontes; los cuales pueden ser utilizados por los diseñadores para actualizar los datos de entrada para el diseño de los pavimentos, por ejemplo.

Tabla 2.1. Cambios en los índices climáticos por Tmax para el horizonte 2075-2099, con respecto al periodo observado de 1961-2000

	Latitud (°N)	Longitud (°W)	No de Meses de verano Tmax ≥ 25°C			No de Meses tropicales Tmax ≥ 30°C			No de Meses extra cálidos Tmax ≥ 35°C		
			RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Noreste de México	23 a 35	117 a 106	1.6	1.8	2.5	1.7	2.0	2.9	1.8	2.2	2.9
Noroeste de México	23 a 31	106 a 97	1.3	1.5	2.2	1.4	1.7	2.3	1.6	2.0	2.6
Centro/Sur de México	15 a 23	106 a 97	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	2.5	1.2	1.3	2.3
Sureste de México	15 a 22	97 a 87	0.2	0.2	0.3	1.4	1.6	2	1.5	1.8	2.8

Fuente: Cavazos et al., 2013.

2.2.3 Mapa con información climática

Una de las capas más importante dentro del Sistema es sobre el análisis climático de la información que recaban las estaciones meteorológicas, sobre las diferentes variables del estado del tiempo y que son de interés para los diseñadores de carreteras.

Para entender los cambios en el clima, en el país, y cómo estos pueden afectar a futuro la red de carreteras, se estudió el comportamiento de las variables meteorológicas registradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

El objetivo fue analizar los datos meteorológicos de las estaciones de medición del SMN (específicamente aquellas que se encuentran automatizadas), en México, localizadas en un radio menor o igual a 5 kilómetros próximos a una carretera. El periodo de análisis es variable, pero con un rango de al menos 10 años, esto sujeto a la disponibilidad de información del SMN.

De esta manera, se seleccionaron 302 estaciones meteorológicas ubicadas en diversos estados del país y que pertenecen a diferentes redes y organismos, pero que opera el SMN.

El tipo de estaciones son: Estación Meteorológica Automática (EMA), Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME), etc. Para mayor detalle de sus características se puede consultar el capítulo 3 del presente documento. La localización de cada estación es georreferenciada e identificada conforme se muestra en la tabla 2.2, la cual representa la ficha técnica de la estación.

Tabla 2.2. Ejemplo de ficha técnica para la estación Acayucan del SMN

ESTADO	OPERADOR	NOMBRE	LATITUD "N"	LONGITUD "W"	ALTITUD	CARRETERA	ORIGEN	DESTINO
VERACRUZ	SMN EMAS	ACAYUCAN	17°58'36"	94°54'03"	106	180	MINATITLAN	VERACRUZ

Localización geográfica de la estación

Fuente: Elaboración propia (la imagen es de Google Maps).

Cada una de las estaciones se han colocado en una capa de información (Figura 2.4), donde el diseñador de carreteras podrá ubicar las estaciones meteorológicas más cercanas a su proyecto carretero y extraer la información climática de referencia.

Estaciones meteorológicas cercanas a carreteras federales



Figura 2.4 Vista preliminar de la capa de información climática

Fuente: Elaboración propia con base en *Open Street Map*.

Para cada una de las estaciones, el diseñador podrá consultar una base de datos con los registros meteorológicos de temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, entre otras variables.

Al seleccionar la estación deseada, se puede obtener la información básica de la estación, así como la información disponible y el periodo de consulta (ver figura 2.5). El periodo de registro varía para cada estación; sin embargo, la mayoría inicia en el año 2000 y concluye en el 2015.



Figura 2.5 Vista preliminar de la capa de información climática – Opción seleccionar estación meteorológica

Fuente: Elaboración propia con base en *Open Street Map*.

2.2.4 Gráficos climáticos

Los gráficos climáticos son un instrumento adecuado para interpretar las variables climáticas en el tiempo, ya que permite visualizar la temperatura o la precipitación y cómo ésta se comporta a lo largo del tiempo.

Se pueden construir diversos gráficos climáticos, pero para fines del Sistema se incorporarán las siguientes herramientas.

2.2.4.1 Climogramas

Es un gráfico de puntos unidos por una línea continua que representa de forma integrada los valores mensuales de temperatura media y de precipitación de un lugar en particular. A diferencia de los diagramas climáticos, los valores de las variables se grafican haciendo uso de un eje vertical para la temperatura y un eje horizontal para la precipitación, quedando los meses del año al interior del gráfico de cada registro.

Estos gráficos permiten identificar correlaciones entre las diferentes variables climáticas del lugar.

El climograma representa el comportamiento anual de la precipitación y la temperatura, el cual consta de tres ejes, dos verticales (el izquierdo para la temperatura y el derecho para la precipitación) y un eje horizontal dividido en doce partes que representan los meses del año. La precipitación se representa mediante barras y la temperatura en puntos ligados con una línea (ver figura 2.6).

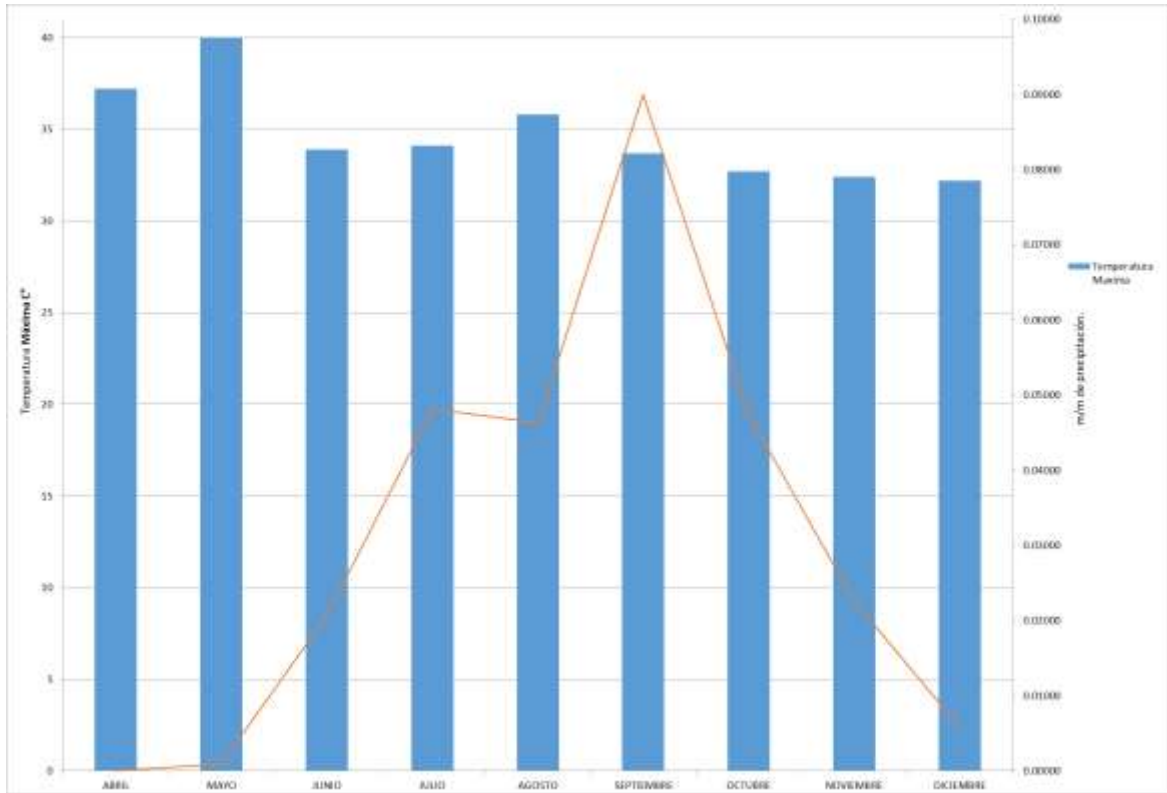


Figura 2.6 Ejemplo de climograma del Sistema

Fuente: Elaboración propia.

La información también podrá ser descargada para que los diseñadores puedan alimentar sus modelos/procedimientos para el cálculo y diseño de los elementos de la carretera.

2.2.4.2 Diagramas climáticos

Los diagramas climáticos son una representación gráfica de los valores mensuales de la temperatura media y de la precipitación, de un lugar en específico.

Se pueden utilizar histogramas para representar la precipitación en el eje vertical y en el horizontal la distribución temporal (diaria, mensual, anual).

Para el caso de la temperatura, se pueden utilizar líneas continuas que conecten los valores de temperatura (media, mínima, máxima) referenciados en el eje vertical y en el horizontal la distribución temporal (diaria, mensual, anual).

Los diagramas tienen un patrón uniforme, del lado derecho se representa la temperatura en grados centígrados (eje de ordenadas) y los valores de los registros en un lapso determinado en la parte de abajo (eje de las abscisas), un ejemplo del Sistema se puede ver en la figura 2.7.

Estaciones meteorológicas cercanas a carreteras federales

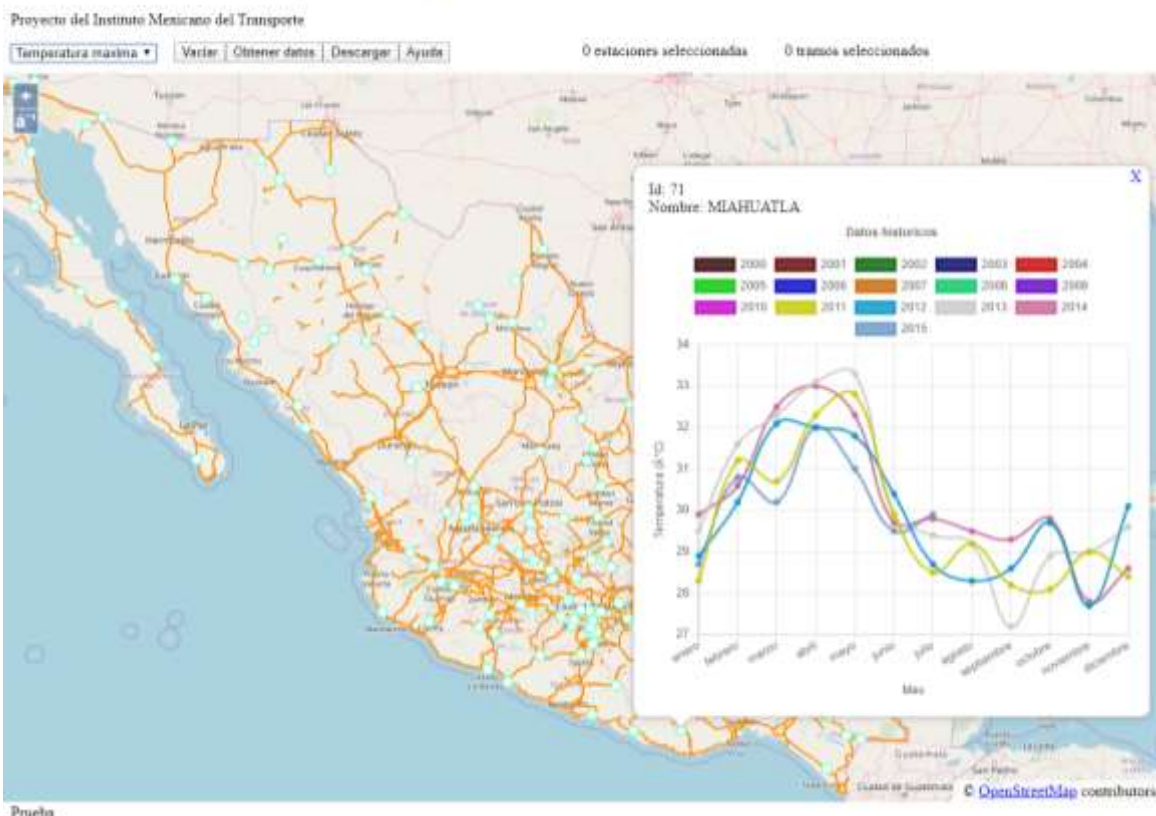


Figura 2.7 Ejemplo de diagramas climáticos del Sistema

Fuente: Elaboración propia con base en *Open Street Map*.

En la plataforma se podrán encontrar diferentes diagramas climáticos y climogramas de temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, entre otras variables.

Algunos de estos análisis fueron realizados para la publicación técnica “El clima y las carreteras en México”, que tuvo como objetivo generar información mediante la cual se puedan entender los cambios en el clima, en el país, y cómo estos pueden afectar a futuro la red de carreteras.

El análisis de la información mostrada, tanto las fichas técnicas, la base de datos y los gráficos realizados, formarán parte de un sistema de información climatológica para el diseño de carreteras.

2.3 Sistema de información climática para el diseño de carreteras

El sistema de información climatológica para el diseño de carreteras (SICliC) es una plataforma tecnológica con base en un visualizador Web, donde el diseñador de una carretera podrá ubicar la estación meteorológica más cerca a la ubicación de su proyecto, para visualizar tanto la información meteorológica como climatológica y, en su caso, descargar la información de referencia.

La figura 2.8 muestra la arquitectura del Sistema desarrollado, el cual está integrado por tres secciones principales y subsecciones, con diversas capas de información georreferenciada.

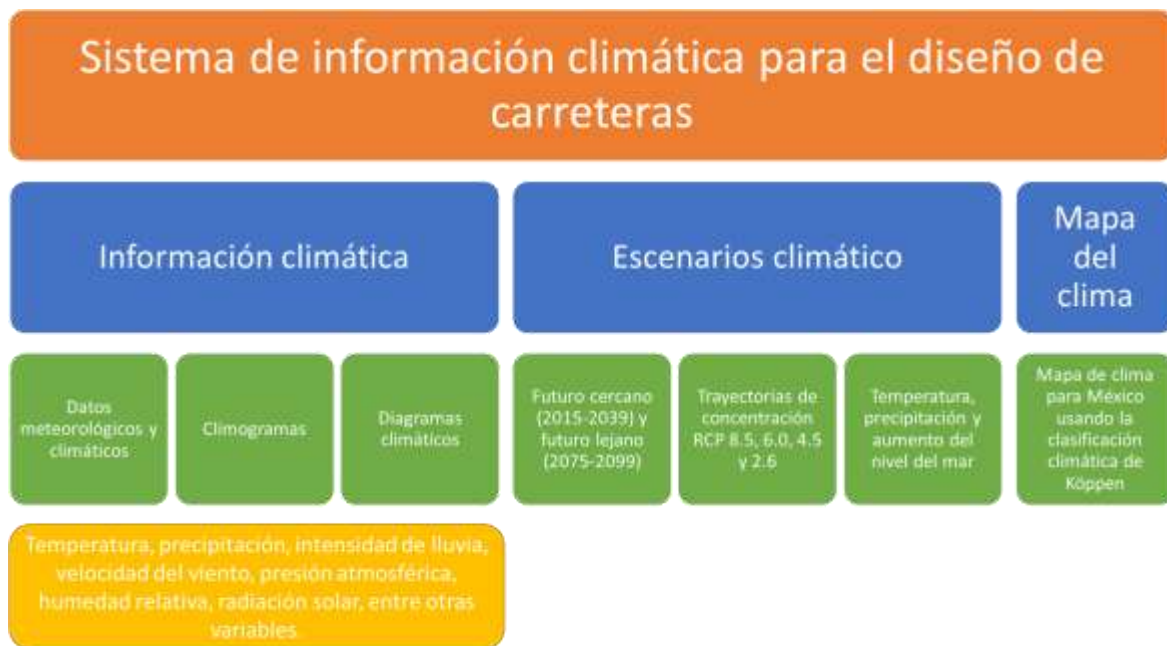


Figura 2.8 Arquitectura del SICliC

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe el contenido de cada sección del sistema.

2.3.1 Información climática

Esta sección está compuesta por la capa principal de estaciones meteorológicas automáticas del país, que se encuentran a una distancia no mayor a 5 kilómetros de una carretera (ver figura 2.9), donde se puede hacer una selección y el Sistema, después de una búsqueda, ofrecerá las estaciones disponibles más cercanas a la zona donde se localice el proyecto.



Figura 2.9 Búsqueda de estación meteorológica del SIClic

Fuente: Elaboración propia con base en *Open Street Map*.

Una vez seleccionada la estación, el diseñador de carreteras podrá consultar la información climática de las diferentes variables, tales como: temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa y radiación solar.

La información puede descargarse como archivo de Microsoft Excel, los diagramas climáticos podrán ser visualizados de manera interactiva (ver figura 2.10) o en imágenes (ver figura 2.11-2.18), así como los climogramas anuales (ver figura 2.6).



Figura 2.10 Ejemplo de diagrama climático del SIClic

Fuente: Elaboración propia con base en *Open Street Map*.

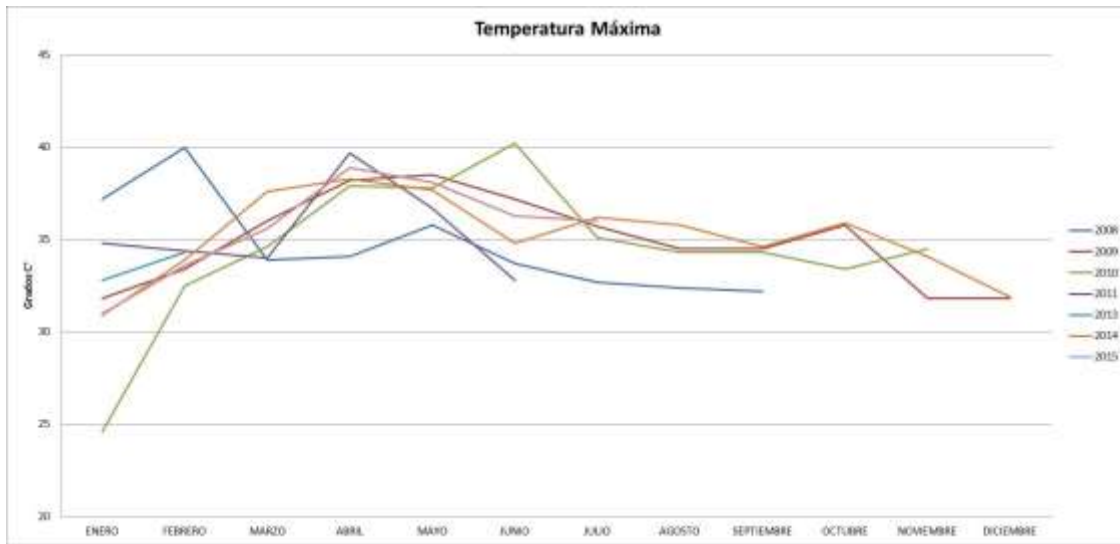


Figura 2.11. Temperatura máxima, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

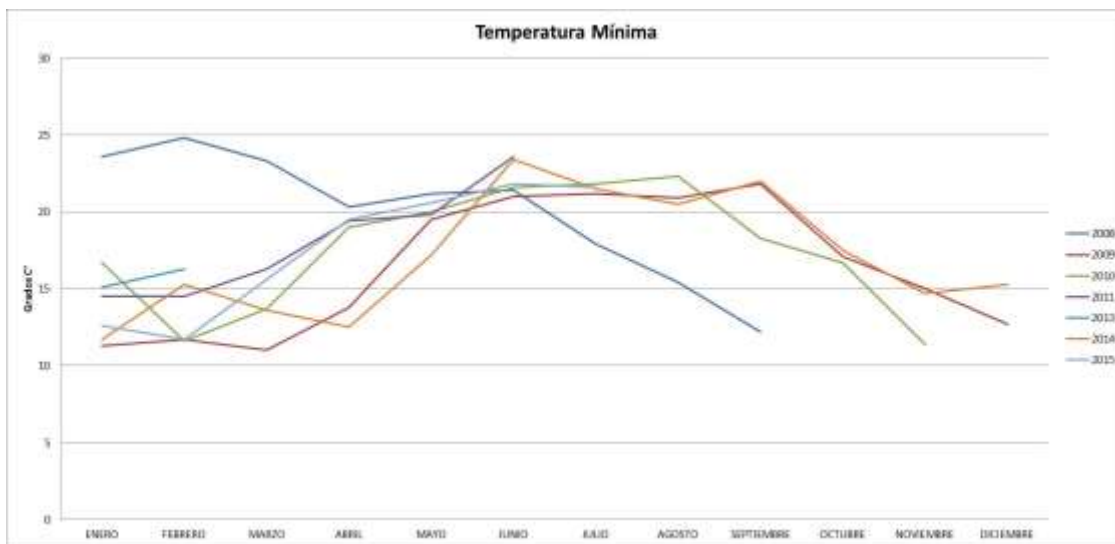


Figura 2.12. Temperatura mínima, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

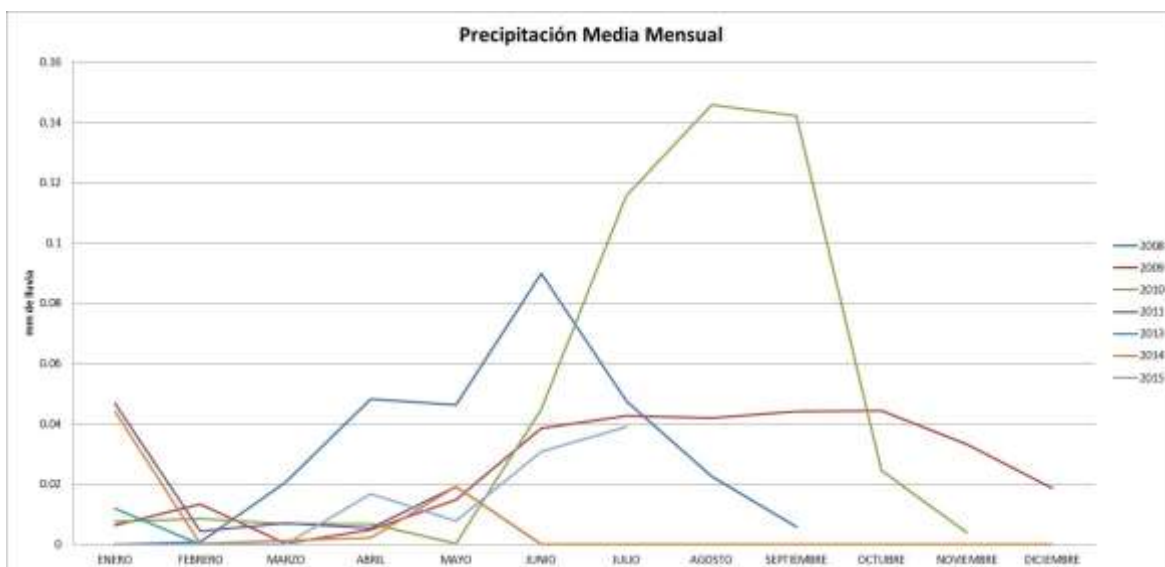


Figura 2.13. Precipitación media mensual, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

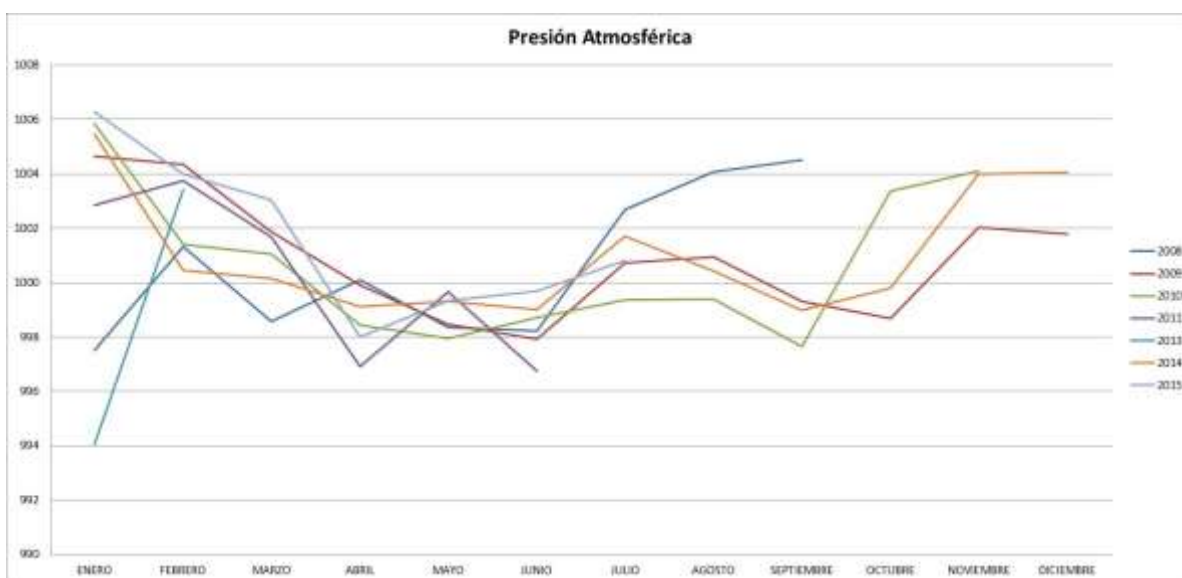


Figura 2.14. Presión atmosférica, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

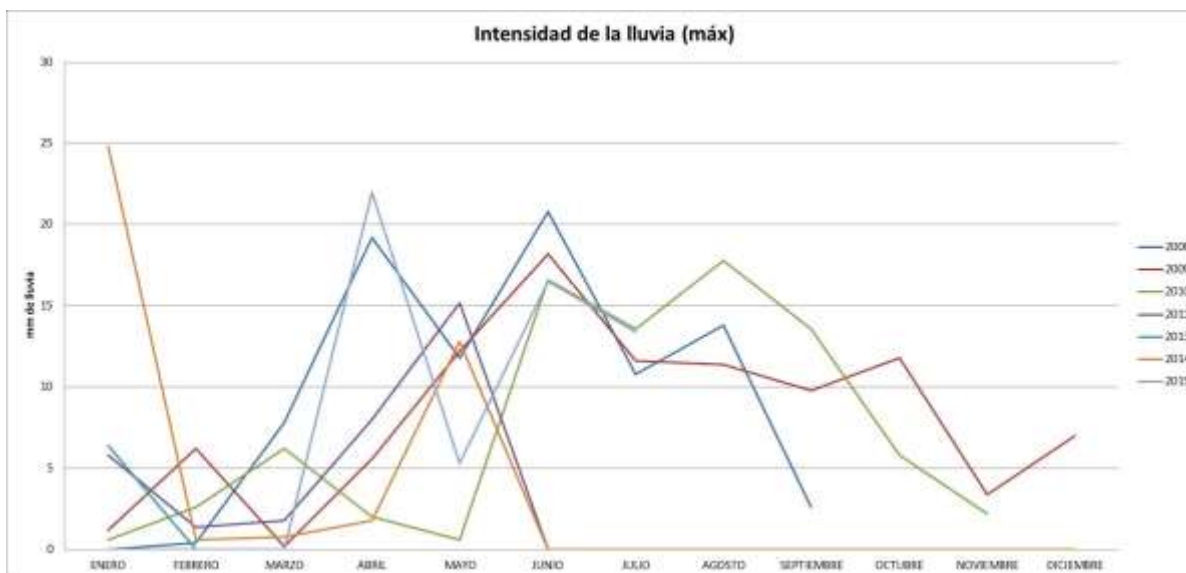


Figura 2.15. Intensidad de lluvia, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

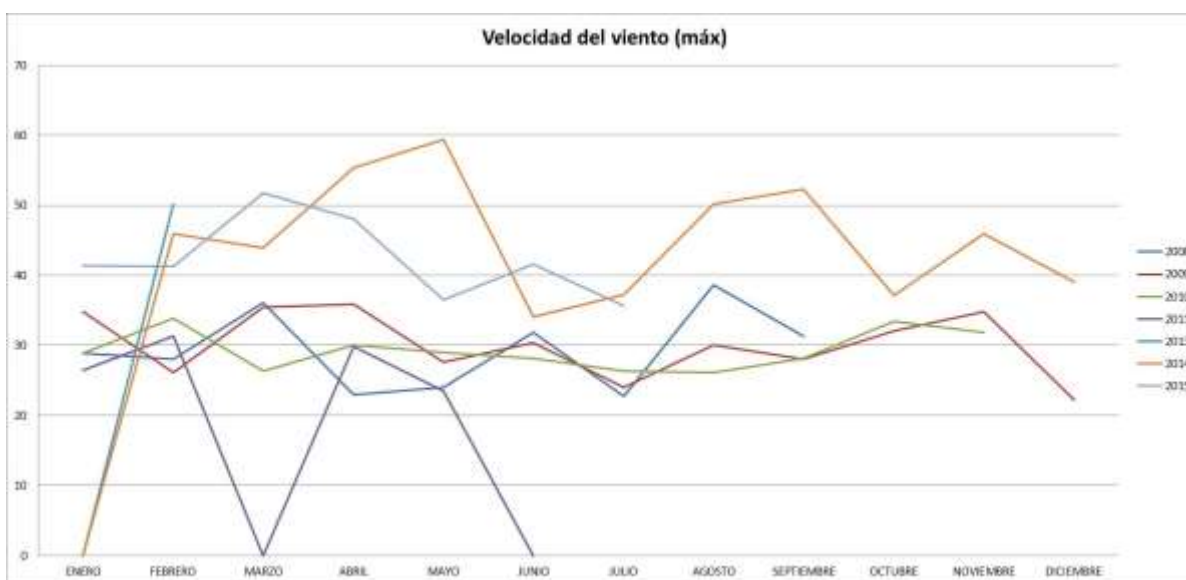


Figura 2.16. Velocidad del viento, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

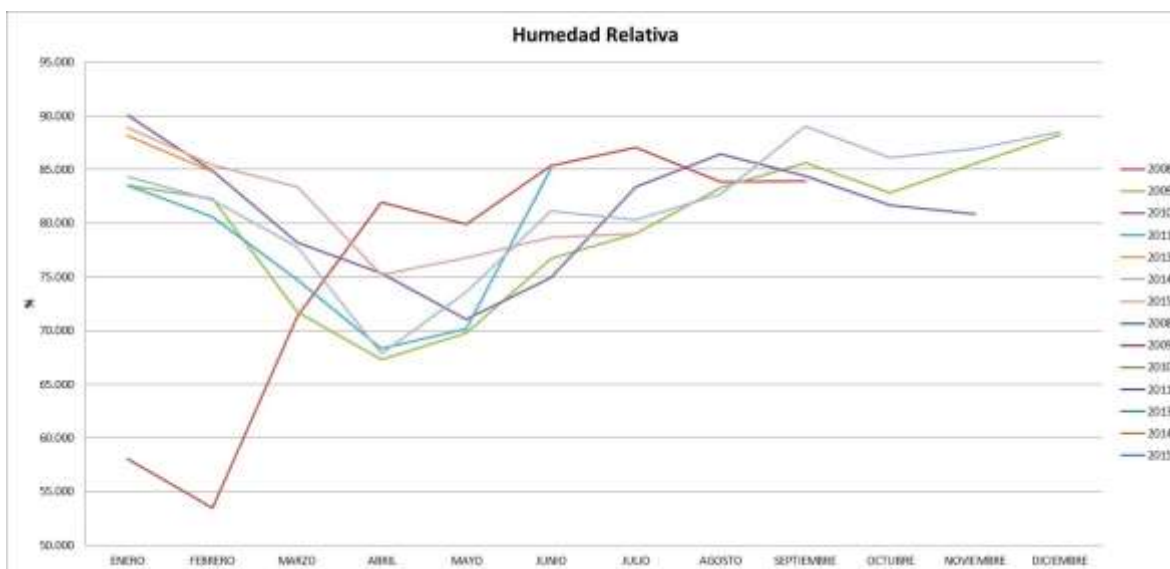


Figura 2.17. Humedad relativa, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

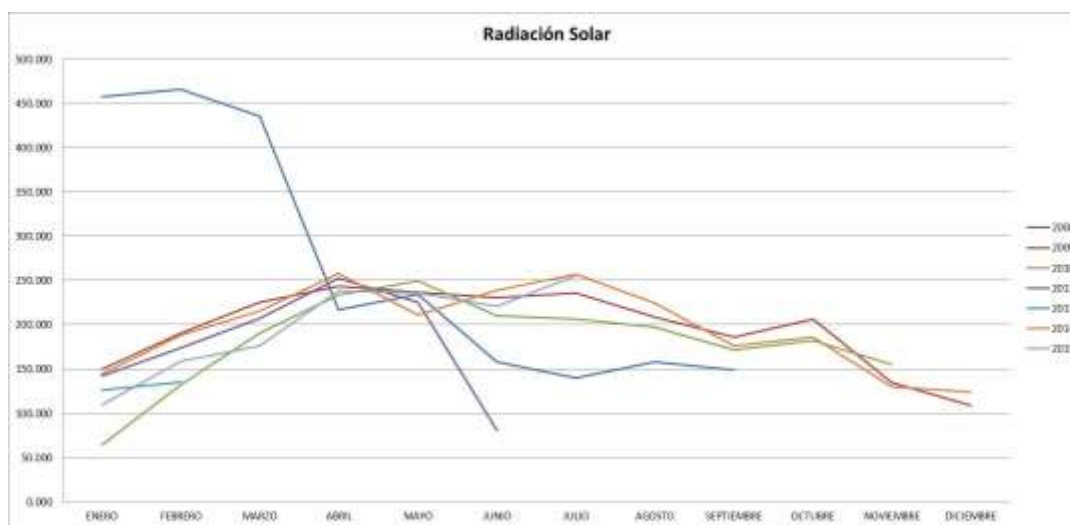


Figura 2.18. Radiación solar, estación Acayucan.

Fuente: Elaboración propia con información del SMN.

La información puede descargarse o visualizarse, la primera es seleccionando la estación meteorológica y después el botón del menú “descargar”, el cual le permitirá al usuario visualizar la información histórica de la estación o descargar el archivo en formato “csv”, el cual es compatible con Microsoft Excel. La figura 2.19 muestra la opción de descarga indicada. La segunda opción, debe seleccionar el botón “visualizar” y se desplegará la información en la pantalla.



Figura 2.19 Visualización y descarga de datos históricos del SICliC

Fuente: Elaboración propia con base en *Open Street Map*.

2.3.2 Escenarios climáticos

Esta sección está compuesta por los escenarios climáticos desarrollados en el país, los cuales estarán disponibles para que el diseñador de carreteras considere los cambios en el futuro del clima.

Los escenarios utilizados fueron desarrollados por el INECC, quien es responsable de las políticas de cambio climático. Los escenarios tuvieron como base las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), en tres escenarios futuros: el RCP4.5 y RCP6.0 (escenarios de estabilización) y el RCP8.5 (escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero).

Las variables de análisis para las proyecciones fueron, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación. Para el caso del aumento del nivel del mar se utilizaron dos escenarios, un incremento de 2 metros y otros de 5 metros, de acuerdo a los análisis del CReSIS (Center of Remote Sensing of Ice Sheets).

Los periodos de análisis son: futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). Estos corresponden a lapsos de 25 años para cada uno.

Esta información permitirá al diseñador identificar zonas de riesgo, donde la infraestructura carretera ha estado expuesta y cuya integridad continuará peligrando en el futuro, basados también en los análisis de escenarios climáticos.

La figura 2.20 muestra la visualización de los escenarios climáticos para la temperatura.



Figura 2.20 Visualización del escenario climático de temperatura en el SICliC

Fuente: Elaboración propia del editado en Gradilla et al. (2018).

De la misma manera se podrán utilizar las capas para los escenarios de precipitación (figura 2.21) y aumento del nivel del mar (figura 2.22).



Figura 2.21 Visualización del escenario climático de precipitación en el SICliC

Fuente: Elaboración propia del editado en Gradilla et al (2018).



Figura 2.22 Visualización del escenario climático de aumento del nivel del mar en el SICliC

Fuente: Elaboración propia del editado en Gradilla et al. (2018).

2.3.3 Mapa climático

Esta sección está compuesta por el mapa del clima del país, desarrollado por García (1998), para la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

El mapa estaba basado en la clasificación climática de Köppen, el cual fue adaptado debido a la diversidad de microclimas en escalas espaciales muy pequeñas en el país.

Algunas de las modificaciones más importantes es la posibilidad de considerar la altitud como un factor importante en la distribución de climas, así como incluir otras divisiones al sistema de Köppen con nuevos criterios de clasificación.

Este mapa permite al diseñador contar con información del clima base de la zona donde se realizará el proyecto carretero.

La figura 2.23 muestra la visualización del mapa climático.



Figura 2.23 Visualización mapa del clima en el SICliC

Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO (1998).

2.4 Uso potencial del sistema de información climática para el diseño de carreteras

El uso potencial del sistema de información climática para el diseño de carreteras puede ser muy amplio, pero también puede tener un crecimiento importante para adaptarse a las necesidades de los ingenieros de carreteras.

A continuación, se enuncian algunos usos potenciales de la información de la herramienta, clasificados por parámetro climático.

2.4.1 Temperatura

- Determinar las temperaturas máximas y mínimas del lugar para el diseño de la mezcla asfáltica y, con ello, asegurar un buen desempeño del pavimento.
- Determinar las temperaturas máximas y mínimas para un futuro cercano (escenario climático) y, con ello, poder seleccionar el asfalto y los aditivos adecuados para asegurar tanto la durabilidad como el desempeño de la carpeta asfáltica durante toda su vida útil.
- Determinar la temperatura máxima actual y futura del lugar para la selección de elementos, tales como cojines en puentes, o aditivos en pavimentos, como el material de los sellos para las juntas de pavimentos de concreto.

- Evaluar el comportamiento de las losas de concreto, conforme a las temperaturas máximas y mínimas para un futuro cercano (escenario climático).
- Seleccionar los circuitos eléctricos de los sistemas de señalización para que estos actúen correctamente bajo condiciones extremas de temperatura máxima o mínima.
- Revisar las temperaturas mínimas (ceranas al punto de congelación) para determinar el tipo de superficie de rodamiento y así contar con un índice de fricción adecuado.
- Seleccionar los materiales y aditivos adecuados para los diferentes elementos de la carretera.

2.4.2 Precipitación

- Para el diseño del pavimento, determinar la precipitación máxima actual y para un futuro cercano (escenario climático).
- Determinar la precipitación máxima actual y para un futuro lejano (escenario climático) con el fin de diseñar las obras de drenaje menores y mayores, así como todo el drenaje superficial y subterráneo necesario.
- Determinar la intensidad de lluvia para establecer el bombeo óptimo de la calzada de la carretera.
- Determinar la intensidad de lluvia y su periodo de retorno para la determinación del nivel/altura mínima de la subrasante de la carretera.
- Evaluar la tasa de socavación en función de la velocidad de los nuevos flujos de agua debido a una precipitación extrema.
- Determinar el “periodo de retorno” adecuado para calcular las dimensiones de algunas estructuras, tales como puentes y alcantarillas.
- Identificar el aumento de la precipitación en algunas regiones y poder planear adecuadamente la infraestructura con base en riesgos.
- Calcular la acumulación de agua en la superficie de rodamiento y poder evitar inundaciones de la calzada, así como determinar los materiales de sello adecuados para proteger las capas del pavimento.

- Incluir en los modelos de deterioro de los pavimentos la precipitación e intensidad de la lluvia actual y para un futuro cercano (escenario climático), para el diseño de la mezcla asfáltica y del pavimento.
- Determinar el nivel de visibilidad adecuado para la señalización en la carretera, tanto las marcas en el pavimento como las señales verticales.

2.4.3 Humedad

- Determinar el contenido de humedad en las capas del pavimento es necesario, ya que el agua al congelarse se expande, por lo que aumentará la masa de las capas y podrá generar grietas en ellas.
- Determinar la humedad del lugar, la cual puede afectar la compactación de las diferentes capas de la estructura del pavimento y la cimentación del mismo.
- Evaluar los cambios en el contenido de humedad para la estabilidad de taludes, terraplenes y laderas.
- Identificar las regiones donde habrá una disminución de la humedad del suelo, que provocará más erosión en los diferentes elementos, pérdida de vegetación, etc. Y, por otro lado, los escurrimientos superficiales se incrementarán debido a la deforestación por las sequías.

2.4.4 Radiación solar

- Determinar la radiación solar, la cual afecta la última capa del pavimento, acelerando su envejecimiento y su desempeño.

2.4.5 Velocidad del viento

- Determinar la velocidad del viento, la cual puede utilizarse para el diseño de la señalización vertical e incluso para corroborar datos para el diseño por viento de los puentes.

2.4.6 Otros

El deshielo del granizo o una nevada eventual generan una mayor cantidad de agua que aumenta el flujo de los escurrimientos superficiales y pueden colapsar los sistemas de drenaje, por lo que estas condiciones deben ser actualizadas e incluidas en los diseños de los diferentes elementos del drenaje carretero, para desalojar el agua de manera más eficiente y rápida.

2.5 Sitio web

La página en su versión 1.0 puede ser consultada en el sitio web www.siclic.imt.mx. El sitio web continuará en desarrollo para integrar funciones y capas de información adicionales al Sistema.

3 Sistema de Información meteorológica para la operación de carreteras

El clima tiene un efecto importante en la seguridad vial, así como en los retrasos en los viajes de las personas y las mercancías. Por lo que en múltiples países se han implementado sistemas que provean información a los usuarios sobre el clima y el estado del tiempo, para que estos puedan viajar de forma segura y con mínimas interrupciones.

La temperatura y el estado de las condiciones superficiales de la carretera (seco, húmedo/mojado, congelado, o con presencia de granizo o nieve) pueden variar durante el día o la noche, o entre estaciones del año, así como por su localización geográfica.

El mantener la operación de una carretera abierta a todas horas y todos los días del año, requiere de altas inversiones en muchos países y, en el caso contrario, el no invertir en sistemas de seguridad (preventivo) e información, implica consecuencias económicas importantes derivadas de accidentes viales, perturbaciones de las cadenas logísticas, demoras por cierres parciales o totales, aumento de los tiempos de viaje, etc. Este desafío ha llevado a las agencias de carreteras a utilizar tecnologías avanzadas para enfrentar el clima y su impacto tanto en el tránsito como en su operación, de tal manera que puedan garantizar una conducción segura en las carreteras bajo cualquier condición climática.

La primera estrategia que han utilizado las organizaciones de carreteras para hacer frente al clima son los Sistemas Inteligentes para el Transporte (ITS, por sus siglas en inglés), cuyo principal objetivo es optimizar la operación de la infraestructura del transporte, impactando en una mejora de la movilidad de las personas y las mercancías

Los ITS tienen diversas finalidades, tales como aumentar la seguridad, mejorar la calidad de la red, etc., pero la que interesa en el presente capítulo son aquellos sistemas “ITS” que proporcionan información a los usuarios.

La información para los usuarios normalmente es sobre congestionamiento, tiempos de viaje, alerta de accidentes viales, principalmente. Pero recientemente ha cobrado especial importancia obtener información sobre el estado del tiempo y las condiciones meteorológicas, debido a que tienen impactos significativos en la operación de las redes viales, acentuados más aún por el cambio climático y el clima extremo.

Para integrar un sistema que apoye una operación segura de las redes de carreteras, es necesario identificar los factores que influyen en las condiciones de la carretera.

3.1 Sistemas de Información Meteorológica en Carreteras

En México, los usuarios utilizan páginas web, aplicaciones para dispositivos móviles o los canales de televisión para conocer el estado del tiempo y las condiciones meteorológicas, sin embargo, estas no son plataformas específicas para alertar a los usuarios de las redes de transporte, para ello existen los Sistemas de Información Meteorológica en Carreteras (RWIS, *Road Weather Information System*).

Un Sistema de Información Meteorológica en Carreteras es una combinación de tecnologías que utilizan datos climatológicos históricos y actuales para proporcionar información útil sobre el clima a los usuarios de las carreteras y, con ello, ayudar en la toma de decisiones relacionadas con su viaje en la carretera. Los datos son recolectados por sensores ambientales colocados sobre la carretera y en la carretera misma.

Estas avanzadas tecnologías se han convertido en un componente crítico de los esfuerzos para la operación y el mantenimiento de muchas agencias de carreteras.

Estos sistemas requieren fusionar las tecnologías actuales en el análisis meteorológico, el pronóstico del tiempo, las telecomunicaciones y el monitoreo de las condiciones del camino, para producir información y pronósticos a corto plazo en sitios específicos, conjuntamente con un método de disseminación rápido y oportuno para los usuarios de las carreteras.

Los sistemas están alimentados por unidades de procesamiento remoto, que se colocan a lo largo de la carretera, las cuales pueden contener algunos o todos los sensores meteorológicos y sensores conectados al pavimento y subcapas de éste en el sitio (Figura 3.1). Las unidades están vinculadas a una unidad central de procesamiento que proporciona comunicación, recopilación, archivo y distribución de los datos.

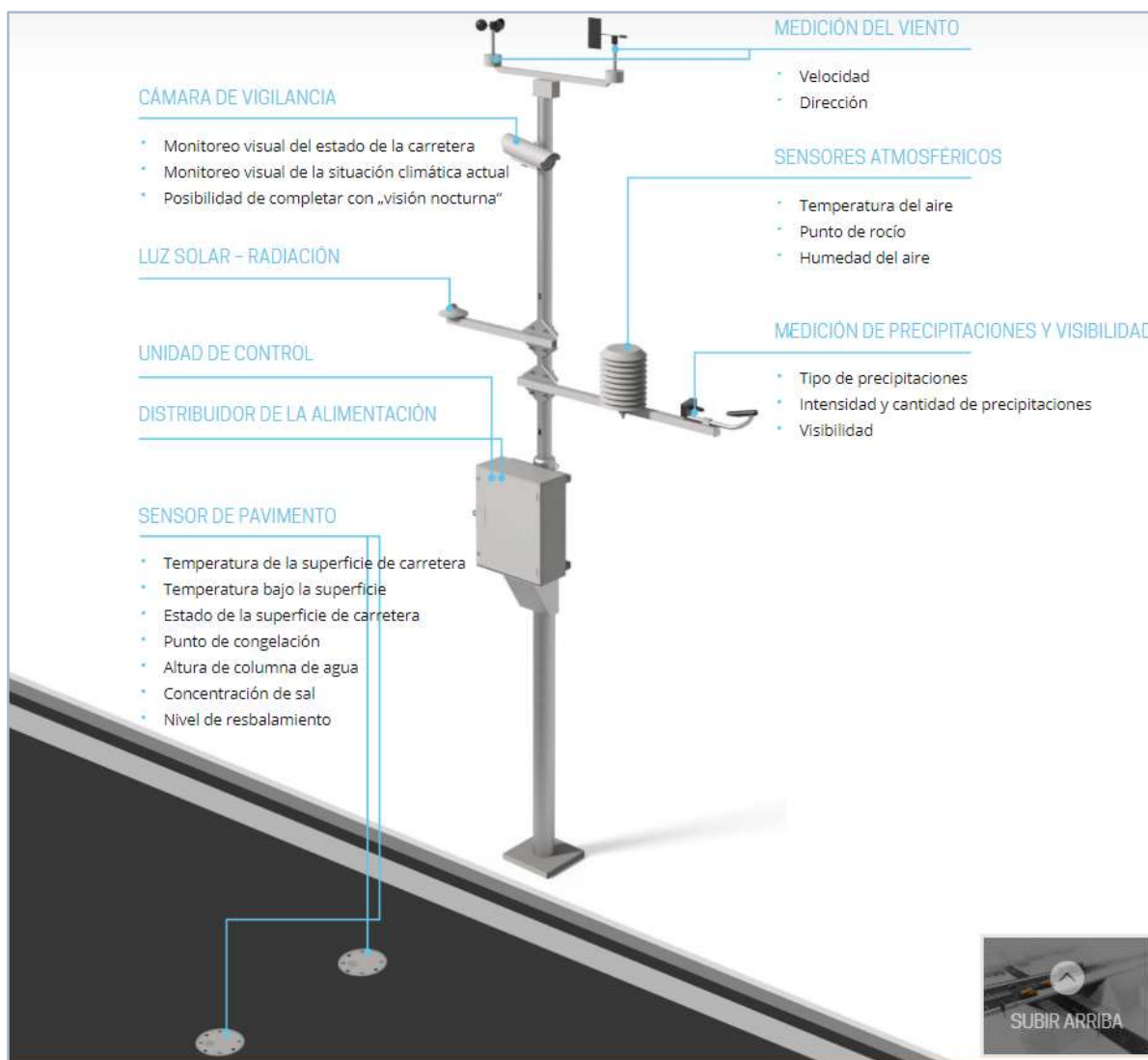


Figura 3.1. Estación meteorológica de carretera (RWS)

Fuente: CROSS Zlin A.S. (Recuperada de <http://www.cross.cz>)

Los sistemas RWIS usan estaciones de clima automáticas en campo (*Road Weather Stations, RWS's*), un sistema de comunicación para la transferencia de datos y un sistema central para recopilar datos de campo. Estas estaciones miden en tiempo real diversas variables atmosféricas, el pavimento, las condiciones del nivel del agua y la visibilidad. El hardware y software central de los RWIS procesan las observaciones de las estaciones para desarrollar transmisiones en tiempo real o pronósticos, con el objeto de exhibir o diseminar la información del estado del tiempo en el camino en un formato que pueda ser fácilmente interpretado por los usuarios.

Estos sistemas están específicamente diseñados para proporcionar información para el transporte terrestre, es por ello que los operadores de las redes de carreteras deben hacerse de información meteorológica, principalmente de sistemas RWIS.

De acuerdo con la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), la información meteorológica que los usuarios de las carreteras requieren para un desplazamiento seguro y confiable está compuesta por:

- Datos atmosféricos: incluyen temperatura y humedad del aire, distancia de visibilidad, velocidad y dirección del viento, tipo y frecuencia de precipitación, cobertura de nubes, ocurrencia de tornados o trombas marinas, rayos, ubicación y seguimiento de las células de tormenta, así como la calidad del aire.
- Datos del pavimento: incluyen la temperatura del pavimento, el punto de congelación del pavimento, el estado del pavimento (por ejemplo, húmedo, helado, inundado), la concentración química del pavimento y las condiciones del subsuelo (por ejemplo, la temperatura del suelo).
- Datos del nivel de agua: incluyen los niveles de arroyos, ríos y lagos cercanos a las carreteras, así como los niveles de mareas (es decir, mareas de tormenta de huracanes).

Los datos recabados mediante RWS deben ser enviados a un centro de control, para su procesamiento y toma de decisiones, así como la diseminación de la información a los usuarios. La figura 3.2 muestra un ejemplo de la arquitectura del sistema.

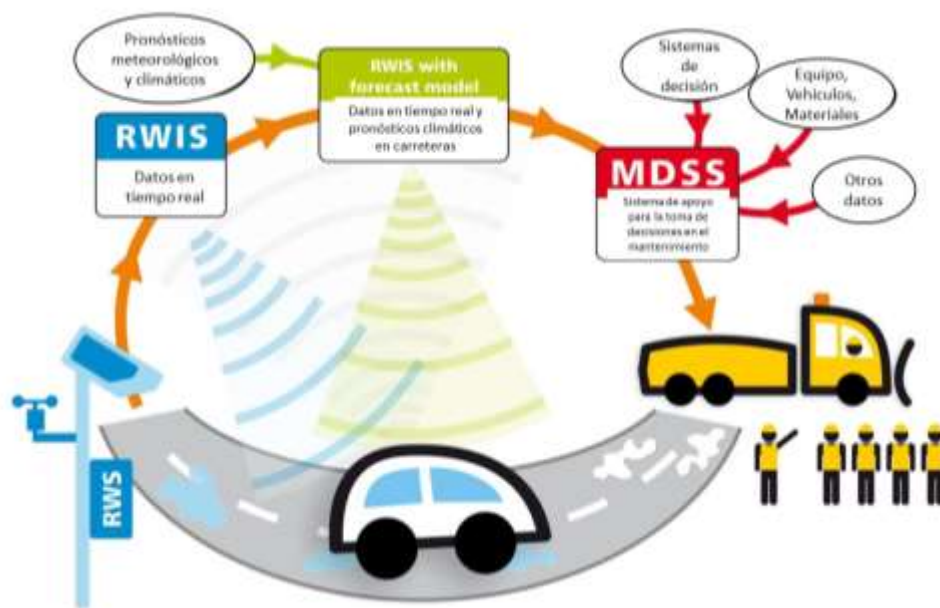


Figura 3.2 Arquitectura de un sistema RWIS

Fuente: Editada al español de <http://www.cgs-labs.com>

3.1.1 Tipos y funciones de los Sistemas de Información Meteorológica en Carreteras

Los sistemas se pueden clasificar de acuerdo a su función en tres tipos:

- Los que proporcionan información a los usuarios sobre el estado del tiempo y las condiciones meteorológicas, la cual les permite tomar decisiones relacionadas a su viaje.
- Los que proporcionan información sobre alertas meteorológicas y requieren tomar acciones para atender potenciales emergencias en las carreteras, así como advertir a los usuarios de riesgos emergentes en el camino.
- Los que proporcionan información a los operadores de carreteras y los encargados del mantenimiento, para la toma de decisiones y activar los protocolos de trabajo, lo cuales permitan mantener la transitabilidad de la carretera.

A continuación, se muestran algunos ejemplos existentes que permiten detallar los tipos y funciones de estos sistemas

3.1.1.1 Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC)

Los datos RWIS en tiempo real también son utilizados para proporcionar información a los usuarios a través de los Sistemas Avanzados de Información Meteorológica en Carreteras (*Advanced Road Weather Information System - ARWIS*).

ARWIS recopila datos meteorológicos como temperatura, humedad relativa, punto de rocío y condiciones de la carretera (seco, húmedo, hielo/nieve, químico húmedo). Además, determina los porcentajes de hielo y calcula la fricción superficial relacionada con el clima.

El sistema transfiere los datos medidos continuamente y en tiempo real a los usuarios a través de diferentes dispositivos tales como una tableta, un teléfono inteligente o un dispositivo de salida alternativo en la cabina del conductor (pantalla en el interior del vehículo).

La información que el sistema usualmente envía a los usuarios es:

- Información de pronóstico (lo que sucederá); para predecir fenómenos meteorológicos a corto plazo y eventos potenciales en formación.
- Información actual (lo que está sucediendo); proporcionando temperatura y precipitación en la superficie de la carretera y condiciones meteorológicas relevantes para los conductores.

- Información de estado (lo que sucedió); registrar lo que se hizo y el nivel de servicio actual, posterior a la presencia de un fenómeno meteorológico como un tormenta o precipitaciones intensas.

El Departamento de Transporte de Indiana en los Estados Unidos hace uso de una aplicación para dispositivos, que informa a los usuarios de las carreteras, el cual se observa en la figura 3.3



Figura 3.3 Visualización de un ARWIS

Fuente: http://www.lufft-marwis.com/en_US/features

En el 2004, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos estableció la iniciativa CLARUS para desarrollar un sistema integrado de gestión del estado del tiempo, realizar pronósticos y observaciones del clima para el transporte terrestre, y para establecer una asociación entre los diferentes actores para crear un sistema nacional de observación y predicción meteorológica del transporte terrestre. El objetivo de CLARUS es proporcionar información a todos los operadores de transporte y usuarios para disminuir efectos negativos asociados al clima y fenómenos meteorológicos extremos (por ejemplo, muertes, lesiones y retrasos).

Cuando se difunde en tiempo real la información meteorológica a una amplia audiencia de usuarios, esta impactará en las decisiones de los conductores y los operadores de transporte y contribuirá tanto en la seguridad como en la congestión generada por el clima adverso.

El uso de Sistemas de Información Geográfica es de suma importancia para representar espacialmente los datos de las estaciones meteorológicas de los RWIS, mediante los cuales se puedan reportar a los usuarios las condiciones meteorológicas actuales y las proyecciones esperadas, tal y como se muestra en la figura 3.4.

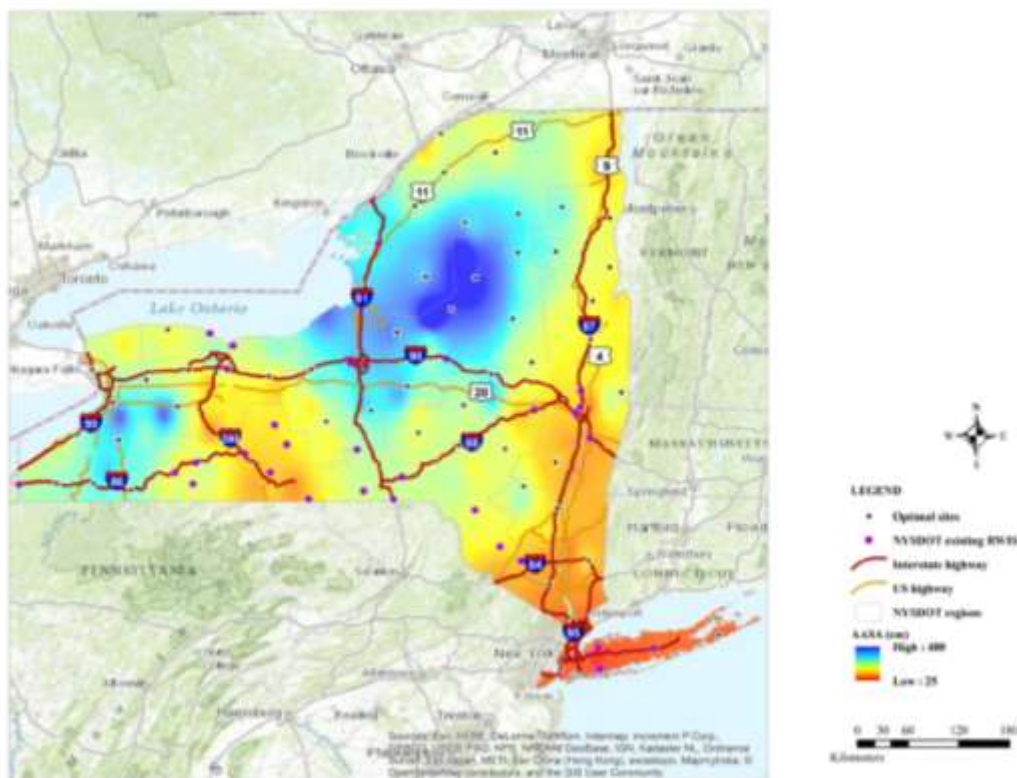


Figura 3.4 Red carretera y observaciones del RWIS del Estado de Nueva York

Fuente: Zhao et al., 2015.

3.1.1.2 Sistemas de Alerta con Información Meteorológica en Carreteras (SAIMC)

Los sistemas de alerta tienen un enfoque hacia los usuarios, pero también hacia las organizaciones de protección civil y de atención de emergencias, ya que no únicamente informan sobre las condiciones meteorológicas, sino que se centran en aquellos fenómenos que podrían tener consecuencias mayores en la red carretera, tales como los ciclones tropicales y los huracanes.

Los Sistemas de Alerta con Información Meteorológica en Carreteras (WRWIS, por sus siglas en inglés), son alimentados con datos de los RWIS en tiempo real. Estos sistemas de advertencia hacia los conductores informan sobre condiciones de viaje inseguras a través de una carretera o una sección específica de la misma; así como de alertas meteorológicas en ruta, tales como visibilidad reducida, precipitación intensa y peligro por acuaplaneo, zonas de inundación, etc.; o condiciones del pavimento (congelamiento, calentamiento, presencia de nieve, etc.). Estos sistemas forman parte de los sistemas de alerta temprana, para que los usuarios de la red carretera respondan oportuna y adecuadamente a los peligros asociados al clima y fenómenos meteorológicos extremos.

Los sistemas de aviso, de alerta o de advertencia, a los conductores permiten aumentar la conciencia del viajero sobre las condiciones actuales del clima y del

pavimento, los cuales se pueden realizar mediante diversos medios digitales (ver figura 3.5).



Figura 3.5 Ejemplo de una aplicación meteorológica de carreteras RWIS en Alemania

Fuente: Massachusetts Department of Transportation, 2016

Los sistemas permiten además implementar diversas estrategias de manera automática para operar la red de carreteras bajo condiciones climática adversas, tales como:

- Estrategias para el control de la velocidad bajo inclemencias del tiempo, mediante la publicación de la velocidad recomendada de viaje en señalamientos de mensaje variable. La velocidad regulada se ajusta conforme a las condiciones del tránsito y las condiciones climáticas.
- Estrategias de restricción de vehículos que implican la imposición de limitaciones sobre los tipos o características de los vehículos que pueden utilizar una instalación durante inclemencias del tiempo. Estas estrategias pueden incluir restricciones de tamaño, altura, peso o perfil.
- Estrategias de restricción operacional, las cuales restringen el uso de una instalación durante las inclemencias del tiempo para ayudar a los viajeros a evitar secciones de carreteras que son peligrosas.
- Estrategias para el control de las señales de tránsito, las cuales implican realizar modificaciones o influir en el funcionamiento de las señales de tránsito, durante las inclemencias del tiempo, para permitir un flujo de tráfico

más uniforme en función de las condiciones climáticas predominantes o previstas.

La explotación de la información meteorológica para aumentar la eficiencia del sistema de carreteras requiere datos del clima, del estado de la carretera, el tránsito y otras observaciones que son representativas de la carretera.

El principal beneficio de un SAIMC será la reducción de los accidentes carreteros, que conlleva a heridos, muertos y pérdidas materiales.

3.1.1.3 Sistemas de Información Meteorológica en Carreteras para el Mantenimiento (SIMCM)

La información de los RWIS también es utilizada por el personal de mantenimiento para ayudar en el proceso de toma de decisiones sobre los trabajos, el equipo y los materiales necesarios para recuperarse de un evento meteorológico o mientras éste se presenta. Este tipo de sistemas son conocidos como Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones en el Mantenimiento (*Maintenance Decision Support System*, MDSS).

Algunos fenómenos meteorológicos pueden afectar rápidamente las condiciones del camino y provocar problemas de seguridad, así como reducir la movilidad, por lo que un MDSS tiene la capacidad de diagnóstico en función del clima imperante, mediante el cual se pueden tomar decisiones para tomar acciones de mantenimiento en las carreteras.

Los MDSS pueden procesar datos para generar mapas de diagnóstico y pronóstico de las condiciones de la carretera a lo largo de los corredores, con énfasis en el horizonte de 1 a 48 horas, con capacidad de visualización del estado de la carretera.

Posterior al diagnóstico, el personal de mantenimiento debe decidir qué tratamientos aplicar y cuándo aplicarlos, según su conocimiento de las condiciones actuales del pavimento, las condiciones climáticas actuales y previstas, así como las técnicas y recursos de mantenimiento disponibles.

De esta manera las agencias podrían proporcionar un mantenimiento más eficaz y proporcionarlo de manera más eficiente, con la ayuda de un MDSS.

El modelo denominado METRo (*Model of the Environment and Temperature of Roads*), utilizado en Estados Unidos de América, tiene la capacidad de reproducción de eventos para ver pronósticos meteorológicos anteriores y recomendaciones de tratamiento.

3.2 Sistema de Información meteorológica para la operación de carreteras en México

El primer elemento a considerar en el sistema son las fuentes de la información meteorológica en carreteras.

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con múltiples herramientas para proporcionar una importante cantidad de información para la predicción del tiempo, las cuales presentan mediciones de las condiciones atmosféricas reales observadas (temperatura, sensación térmica, velocidad y dirección del viento, humedad, precipitación, etc.) en tiempo real.

Entre las herramientas con que cuenta el SMN están las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's), las cuales conforman un total de 188 y 97 denominadas Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESIME's)

Una Estación Meteorológica Automática (EMA) está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de una o tres horas por estación.

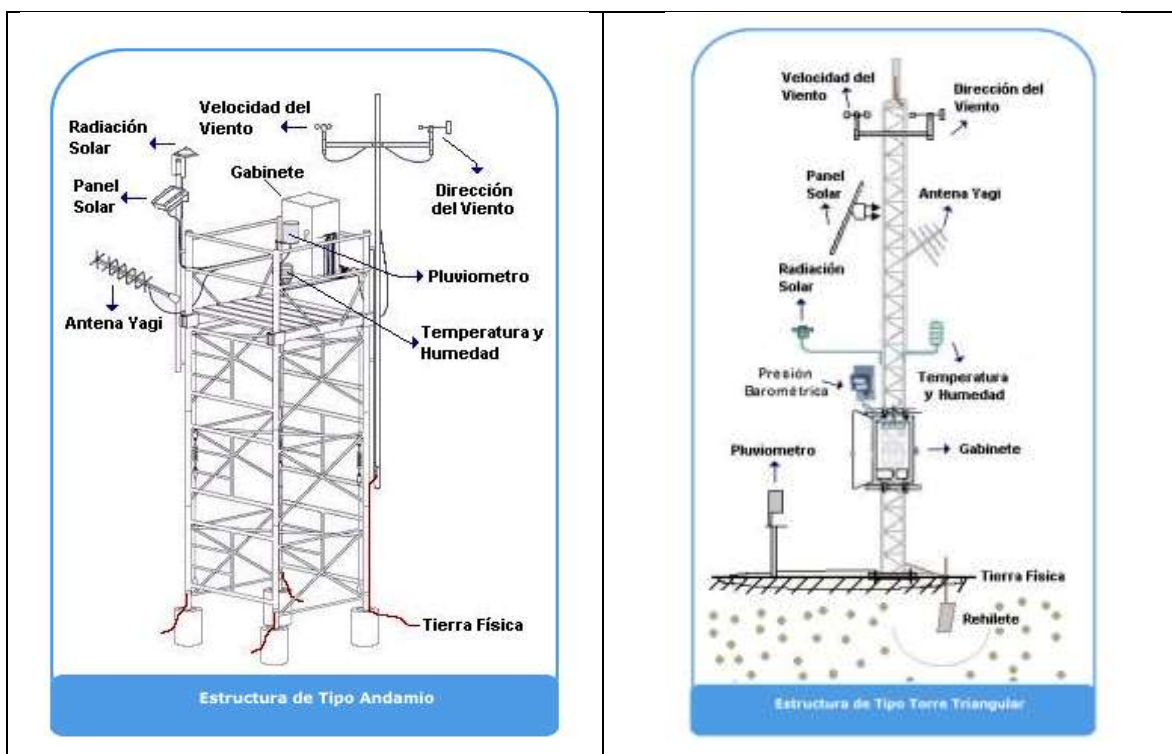


Figura 3.6 Estación Meteorológica Automática (EMA)

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (recuperada de <https://smn.cna.gob.mx>)

Una ESIME es un conjunto de dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática.

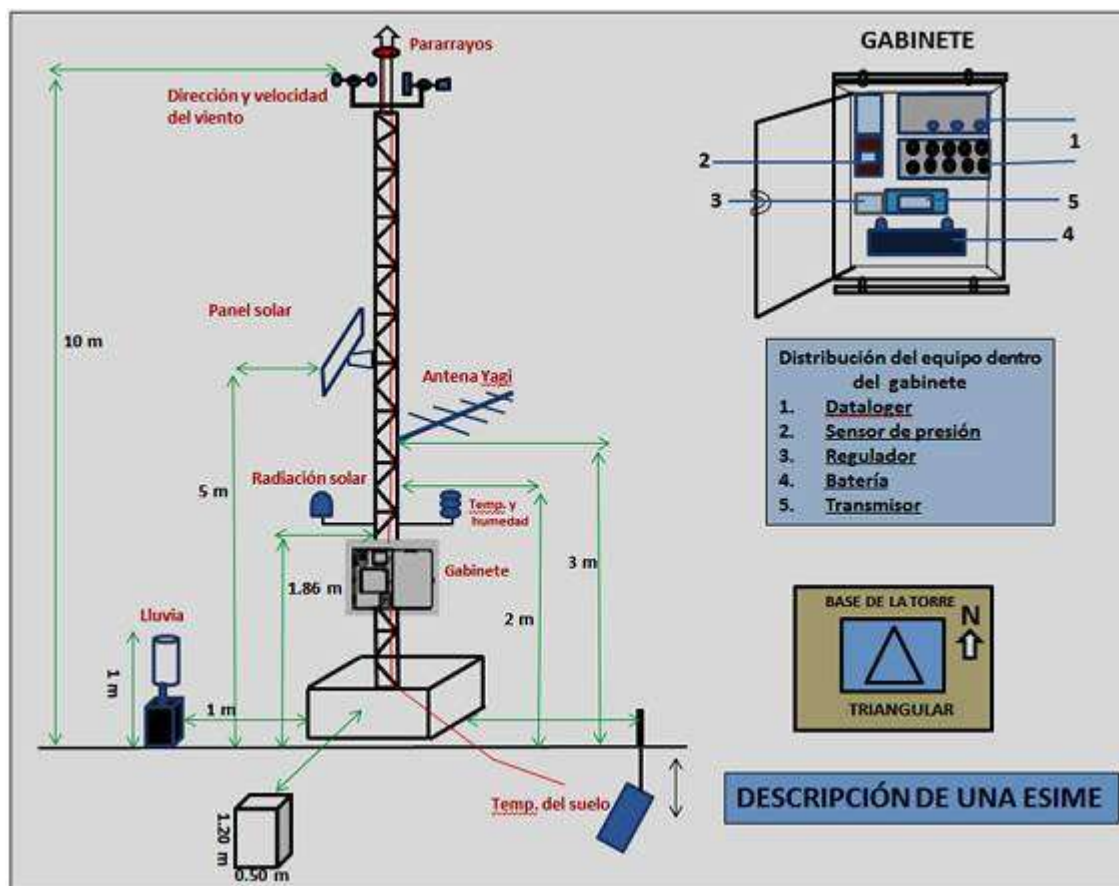


Figura 3.7 Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME)

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (recuperada de <https://smn.cna.gob.mx>)

Otras dependencias contribuyen con información a la red de estaciones del país, tales como:

- 34 estaciones del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM)
- 32 estaciones del Organismo de Cuenca Golfo Norte (OCGN)
- 70 estaciones del Organismo de Cuenca Lerma - Santiago - Pacífico (OCLSP)
- 45 estaciones del Organismo de Cuenca Río Bravo (OCRB)
- 79 estaciones del Organismo de Cuenca Río Frontera Sur (OCFS)
- 39 estaciones de Protección Civil del Estado de Guerrero
- 13 estaciones administradas por Protección Civil del Estado de Chiapas
- 15 estaciones administradas por Protección Civil del Estado de Oaxaca
- 11 estaciones administradas por Protección Civil del Estado de Guanajuato
- 15 estaciones administradas por Protección Civil del Estado de Tabasco

- 35 estaciones de la Secretaría de Marina
- 14 estaciones del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU)
- 5 estaciones administradas por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)
- 30 estaciones administradas por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG)
- 2 estaciones administradas por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM)

Adicionalmente, universidades y dependencias de gobierno contribuyen con estaciones adicionales, dando un total aproximado de 724 estaciones meteorológicas, cuya distribución se puede observar en la figura 3.8.

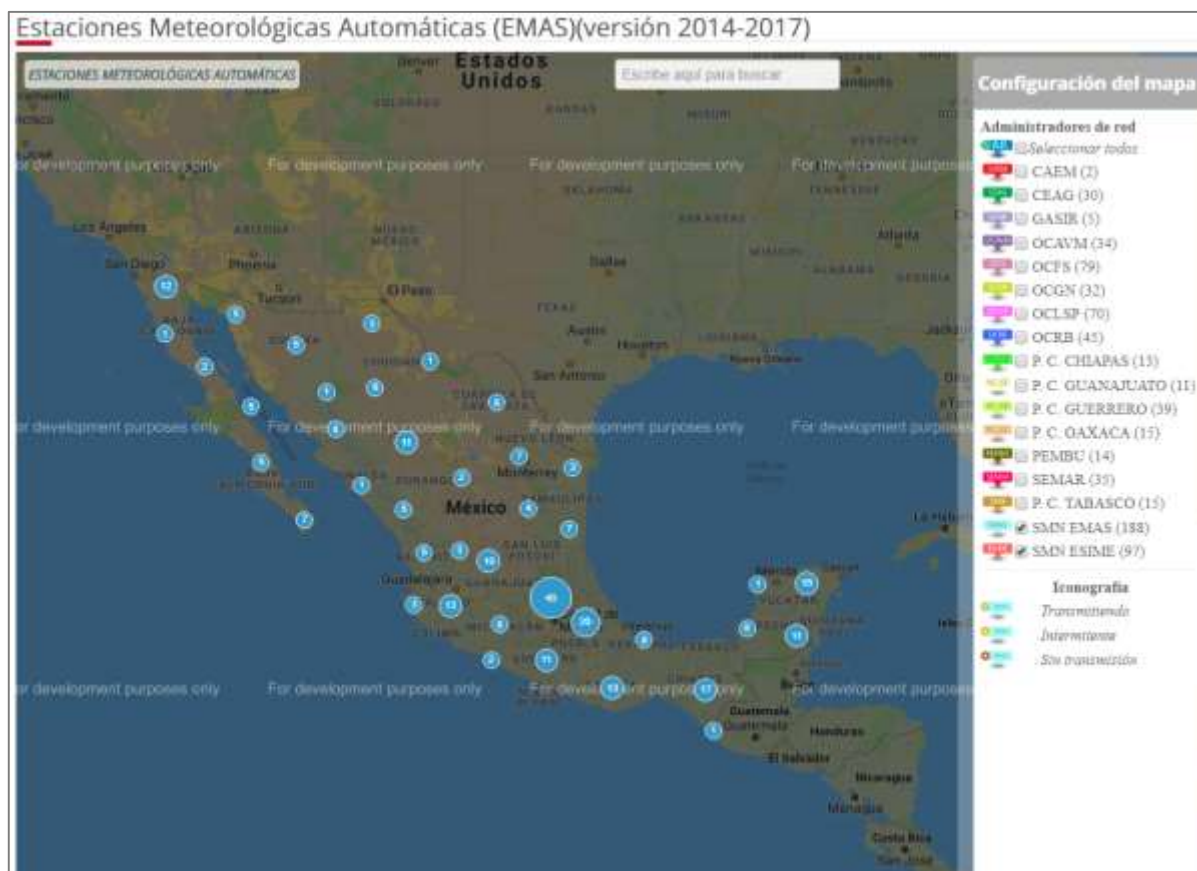


Figura 3.8 Pantalla de visualización de la localización de las Estaciones Meteorológicas en México

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (recuperada de <https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>)

Para segregar las estaciones del SMN se tomó como criterio incluir, en un Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC), a aquellas

estaciones localizadas en un radio menor o igual a 5 kilómetros próximos a una carretera, de tal manera que fuera posible seleccionar aquellas que pudieran servir como Estaciones Meteorológicas Carreteras (EMC's / RWS's). De esta manera, se obtuvieron datos de 302 estaciones meteorológicas ubicadas en diversos estados y de diferentes redes que opera el SMN en México.

La integración de estos datos en un sistema informático permitiría ofrecer información necesaria para la toma de decisiones, tanto para los usuarios como para los operadores de la red de carreteras.

En la figura 3.9 se muestra la información, en tiempo real, de la temperatura registrada en la última hora mediante la página web del SMN. El objetivo de un Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC) será visualizar dicha información al consultar una ruta mediante un dispositivo móvil o una página web.



Figura 3.9 Pantalla de visualización de la información meteorológica de las EMA's en México

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (recuperada de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>)

El proceso para la integración de la información se ha esquematizado en la figura 3.10, donde se establece la manera en que se obtiene la información, las acciones que el SMN realiza para el análisis de la información y su publicación, así como las nuevas actividades que la SCT o cualquier organización de carreteras debe realizar para el manejo de la información que será útil para los usuarios de las carreteras.



Figura 3.10 Proceso para la alimentación del SIMUC

Fuente: Elaboración propia.

La información del SEMUC podría ser adicionada a los sistemas actuales para que los usuarios tracen su ruta, tales como el MAPPIR de la SCT (ver figura 3.11), el “traza tu ruta” del sistema IAVE (ver figura 3.12) o el “diseña tu ruta” de RCO (ver figura 3.13).

Figura 3.11 Visualización del sistema MAPPIR

Fuente: http://app.sct.gob.mx/sibuac_internet/ControllerUI?action=cmdEscogeRuta (recuperada 28-Feb-20)



Figura 3.12 Visualización de traza tu ruta del sistema IAVE

Fuente: <https://www.capufe-iave.com.mx/traza-tu-ruta> (recuperada 28-Feb-20)



Figura 3.13 Visualización de diseña tu ruta

Fuente: <https://www.redviacorta.mx/es/disena-tu-ruta> (recuperada 28-Feb-20)

También la información puede ser compartida a las plataformas tradicionales para dispositivos móviles como Waze o Google Maps, las cuales proveen información del tránsito, pero no sobre el estado del tiempo, mismo que influye de diferentes maneras en la operación del tránsito.

3.3 Pasos a seguir

Este capítulo únicamente propone el desarrollo de un sistema para informar a los usuarios de las carreteras sobre las condiciones prevalecientes del camino.

Se considera que en la actualidad se cuenta con la disponibilidad de información que puede ser integrada en una plataforma que proporcione información para los usuarios, por lo que solo se requiere la programación de aplicaciones y sitios web para distribuirla e incluso alertar a los usuarios en la red de carreteras del país.

Conclusiones

En México se cuenta con una red para la observación de datos meteorológicos que ha integrado el Servicio Meteorológico Nacional, sin embargo, existen otras redes de medición aisladas que no coadyuvan a contar con una base más robusta e integrada de información.

A pesar de ello, la información del SMN permite contar con información valiosa sobre la meteorología y el clima, la cual puede ser de gran utilidad para cada sector.

De esta manera surgió la idea para desarrollar un sistema de gestión de datos, diseñado específicamente para satisfacer la necesidad de mejorar la investigación del clima en las carreteras, el cual permitirá fortalecer las capacidades operativas de la organización de carreteras y, por otro lado, aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera mediante diseños que incluyan la variabilidad climática y el clima futuro.

El principal producto de la presente investigación fue el desarrollo del Sistema de Información Climatológica para el diseño de Carreteras (SICliC), el cual es una herramienta que ha permitido integrar en una sola plataforma la información y los datos disponibles del clima pasado, actual y futuro, de tal manera que pueda ser de utilidad para los diseñadores de carreteras.

Esta plataforma es dinámica y deberá irse actualizando conforme más información se genere sobre las mediciones de las diferentes variables climáticas, en las estaciones meteorológicas del país, así como de la actualización de escenarios futuros sobre el clima, por lo que el mantenimiento de la plataforma informática demandará esfuerzos adicionales.

Este primer esfuerzo en conjuntar la información meteorológica y climática disponible en el país, se espera sea de amplia utilidad para el sector carretero y el académico, ya que el diseño de los diferentes elementos que integran una carretera demanda datos específicos sobre las diferentes variables del clima y podrán ser consultadas en una fuente específica.

Los siguientes pasos a seguir serán, por un lado, la constante actualización de la información tanto meteorológica como climática y, por otro lado, la construcción de mapas climáticos específicos para el diseño de elementos determinados; por ejemplo, la zonificación climática para la selección de asfaltos de acuerdo a las variables de clima tales como la temperatura y la precipitación, acorde a datos medidos actualmente y a los escenarios climáticos futuros.

Por otro lado, esta investigación propone un Marco conceptual para construir un Sistema de Información Meteorológica para Usuarios en Carreteras (SIMUC), ya que es urgente contar con múltiples mecanismos para comunicar información sobre el clima y las condiciones meteorológicas de la carretera a diversos usuarios, de manera que respalde una toma de decisiones mejor informada.

Es necesario un esfuerzo coordinado de investigación para aumentar la comprensión de los fenómenos climáticos que afectan las carreteras del país y la implementación de buenas prácticas sobre SIMUC que permitan aumentar la seguridad, la movilidad y la eficiencia de las carreteras ante el cambio climático y el clima extremo.

Cada vez es más importante mejorar las capacidades de modelado y la utilización de herramientas diseñadas para proporcionar información relevante y útil a quienes construyen, administran, mantienen y usan las carreteras del país.

El país demanda una infraestructura que aprovecha las nuevas tecnologías tanto para monitorear como para predecir de manera efectiva las condiciones del camino y, luego, transmitir de manera efectiva la información del clima y condiciones meteorológicas del camino a los usuarios finales.

Bibliografía

Boselly III, S. Edward; Doore, G. Stanley; Thornes, John E.; Ulber, Cyrus. Road Weather Information Systems. Volume 1: Research Report. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC. (1993).

Cavazos, Teresa; Salinas, José Antonio; Martínez, Benjamín; Colorado, Gabriela; De Grau, Pamela; Prieto González, Ricardo; Conde Álvarez, Ana Cecilia; Quintar Isaías, Arturo; Santana Sepúlveda, Julio Sergio; Romero Centeno, Rosario; Maya Magaña, María Eugenia; Rosario de la Cruz, José Guadalupe; Ayala Enríquez, Ma. del Rosario; Carrillo Tlazazanatz, Heriberto; Santiesteban, Oscar; Bravo, María Elena. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. México, DF.

Federal Highway Administration. An introduction to standards for Road Weather Information Systems (RWIS). Washington, DC (2012)

Federal Highway Administration. Road Weather Management Program. <https://ops.fhwa.dot.gov/weather/index.asp>

García, E. (1998). Catálogo de Climas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, DF.

Gradilla Hernández, Luz Angélica; Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Orantes Olvera, Héctor; Marcos Palomares, Omar Alejandro (2018). Aproximación Geoespacial para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México. Publicación Técnica No. 523 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change (2000). Special Report on Emissions Scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK. [IPCC, 2000]

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Köppen, W. P. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. Petermanns Geog. Mitt. 64. 193–203; 243–248.

Köppen, W. P.; R. Geiger. (1930–1939). Handbuch der Klimatologie. Berlin: Gebruder Borntraeger, 6 vols.

Massachusetts Department of Transportation. Evaluation of Portable Road Weather Information Systems. University of Massachusetts (2016).

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro (2017a). Panorama Internacional de la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático. Publicación Técnica No. 488 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro; Mobayed Vega, Nabil Jorge; Orantes Olvera, Héctor (2017b). El clima y las carreteras en México. Publicación Técnica No. 498 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

National Center for Atmospheric Research. A Comparison of Road Temperature Models: FASST, METRo, and SNTHERM. Boulder, Colorado, USA (2007).

National Research Council. Where the Weather Meets the Road: A Research Agenda for Improving Road Weather Services. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10893> (2004).

Owens, Mark S. The Advanced Transportation Weather Information System (ATWIS). Mid-continent transportation symposium proceedings. <https://trid.trb.org/view/655578>

Talerton, Jon. Transportation and Moisture: What is the Point? Improving Decision Making Abilities by Measuring Atmospheric Moisture Values Will Save Lives and Resources. Vaisala, Inc. Helsinki, Finland (2009).

The National Academies Press. Where the Weather Meets the Road: A Research Agenda for Improving Road Weather Services. Transportation Research Board. National Research Council Of The National Academies. Washington, DC (2004)

White ,Steve P.; Thornes, John E. Chapman, Lee. A Guide to Road Weather Information Systems. University of Birmingham, UK (2006).

Wilks, D.S. (2006). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. International Geophysics Series. Elsevier Inc. USA.

Zhao, Liuhui; Chien, Steven, I.; Liu, Xiaobo; Liu, Weisong. Planning a road weather information system with GIS. Journal of Modern Transportation. September 2015, Volume 23, Issue 3, pp 176–188.

Páginas web:

American Meteorological Society, http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page (recuperada en julio 2019).

U.S. Climate Extremes Index (CEI),
<https://www.ncdc.noaa.gov/extremes/cei/introduction> (recuperada en abril 2019)

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no (recuperada en noviembre 2019)

CRISIS (Center of Remote Sensing of Ice Sheets). <https://www.cresis.ku.edu/>

Ligas de interés:

https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm

<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/cloud-cover>

<https://smn.cna.gob.mx/es/observando-el-tiempo>

<https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>

<https://www.redesclim.org.mx/>

<http://clicom-mex.cicese.mx/malla/>

http://www.rap.ucar.edu/projects/rdwx_mdss/



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>