

Índice General

Capítulo 1	Introducción	1
Capítulo 2	Marco de Referencia	9
2.1	Fundamentos Teóricos. Calidad de Aire y modelos	9
2.1.1	Calidad del Aire	9
2.1.2	Fuentes de contaminación	10
2.1.3	Contaminantes criterio	10
2.1.3.1	Ozono (O ₃)	11
2.1.3.2	Partículas suspendidas (PM's)	13
2.1.3.2.a	Clasificación de las partículas en suspensión	14
2.1.3.3	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	16
2.1.3.4	Monóxido de carbono (CO)	16
2.1.3.5	Dióxido de sulfuro (SO ₂)	17
2.1.3.6	Plomo (Pb)	17
2.2	Regulaciones de los contaminantes criterio	19
2.2.1	Normas oficiales mexicanas	19
2.2.2	Normas oficiales de Estados Unidos y California	20
2.2.3	Normas de la Organización Mundial de la Salud	21
2.3	Calidad del aire en la frontera México - Estados Unidos	21
2.3.1	Convenios Binacionales	22
2.4	Modelos de Predicción de la Calidad del Aire	23
2.4.1	Resultados buscados en los modelos de predicción	25
2.5	Características de la Zona de Estudio	26
2.5.1	Región Mexicali - Calexico	26

2.5.2 Región Ciudad Juárez - El Paso.....	28
2.6 Contaminantes criterio modelados.....	29
2.6.1 Partículas en suspensión y ozono	29
Capitulo 3 Objetivos	31
Capitulo 4 Hipótesis	35
Capitulo 5 Materiales y métodos	39
5.1 Métodos aplicados para el desarrollo de los modelos de predicción	40
5.1.1. Persistencia	40
5.1.2 Regresión Lineal Multivariante	41
5.1.3 Regresión Ridge.....	42
5.1.4 Redes Neuronales Artificiales	42
5.1.5 Redes Perceptrón Multicapa (MLP).....	44
5.1.6 Red Perceptrón Multicapa Cuadrática (SMLP).....	46
5.1.7 Redes de Base Radial (RBF)	47
5.1.8 Redes Elman	49
5.1.9 Máquina de Vectores Soporte (SVM).....	50
5.2 Datos utilizados	52
5.2.1 Fuentes de datos.....	52
5.2.2 Zona Mexicali-Calexico.....	54
5.2.3 Zona Ciudad Juárez-El Paso	55
5.3 Los modelos de predicción desarrollados	56
5.3.1 Modelos de Predicción de PM _{2.5}	56
5.3.2 Modelos de Predicción de Ozono.....	57
5.4 Tratamiento de huecos de datos y total de datos analizados.	58
5.5 Las Herramientas.....	59

Capítulo 6 Resúmenes de Publicaciones	61
6.1 Primer artículo publicado	62
6.1.a Resumen en inglés.....	62
Neural Network Prediction Model for Fine Particulate Matter (PM _{2.5}) on the US-Mexico border in El Paso (Texas) and Ciudad Juárez (Chihuahua)	62
6.1.b Resumen en español	63
Modelo de Predicción con Redes Neuronales para material de partículas finas (PM _{2.5}) en la Frontera US-México en El Paso (Texas) y Ciudad Juárez (Chihuahua).	63
6.2 Segundo artículo publicado	65
6.2.a Resumen en inglés.....	65
Development and Comparative Analysis of tropospheric ozone prediction models using linear and artificial intelligence –based models in Mexicali, Baja California (Mexico) and Calexico, California (US)	65
6.2.b Resumen en español.....	66
Desarrollo y análisis comparativo de los modelos de predicción de ozono troposférico basados en herramientas lineales y de inteligencia artificial en Mexicali, Baja California (México), y Calexico, California (US).	66
6.3 Artículo Publicado en Congreso Internacional.....	68
6.3.a Resumen en inglés.....	68
Comparison and Analysis of Statistical and Artificial Intelligence Techniques for the Modelling of Tropospheric Ozone. Emphasis in the U.S-México Border.	68
6.3.b Resumen en español.....	69

Comparación y análisis de técnicas estadísticas simples y de inteligencia artificial usadas en la modelación del ozono troposférico. Énfasis en la Franja fronteriza México-Estados Unidos	69
Capitulo 7 Discusión de Resultados	71
7.1 Modelo de predicción de partículas suspendidas PM_{2.5}.....	71
7.2 Modelo de Predicción de Ozono Troposférico	76
Capitulo 8 Conclusiones	87
Capitulo 9 Desarrollos Futuros.....	93
Capitulo 10 Bibliografía	95

Índice de Figuras

Figura 1. Este esquema muestra las áreas generales que conforman las líneas de investigación en Proyectos de Ingeniería, donde todas tienen necesariamente espacios de trabajo coincidentes con la protección, respeto y mejoramiento ambiental.....	2
Figura 2. Mapa seccionado de México y Estados Unidos. Los círculos señalan las zonas fronterizas que fueron materia de este estudio. La franja entre las líneas superior e inferior delimita el área binacional de cuidado ambiental establecida en el acuerdo de La Paz de 1983, de 100 Km a cada lado de la línea fronteriza (Figura modificada de mapa proporcionado por la Agencia de Protección Ambiental, US-EPA).....	4
Figura 3. Ubicación de las distintas capas de la atmósfera. En los primeros 10 Km a partir de la superficie de la tierra se forma el <i>ozono troposférico</i> , considerado dañino. (Figura adaptada de: www.eduspace.esa.int).....	12
Figura 4. Proceso fotoquímico para la formación del ozono.	13
Figura 5. Referencia gráfica de las dimensiones de las partículas suspendidas respecto al diámetro de un cabello humano (Fuente: <i>Air Resources Board de California</i>).....	14
Figura 6. Clasificación de las partículas suspendidas de acuerdo a su diámetro aerodinámico (Figura adaptada de Wilson & Suh, 1997).	15
Figura 7. Dentro del mapa, las flechas identifican los grupos de trabajo establecidos en el programa de trabajo binacional vigente: “Frontera 2012”. Franja fronteriza demarcada en el convenio de “La Paz”. (Mapa cortesía de US-EPA).....	23
Figura 8. Ciudades de Mexicali y Calexico (Fuente: Google map, 2007).	26
Figura 9. Mapa de la región de Ciudad Juárez y El Paso (Fuente: Google map, 2007).	28

Figura 10. En esta figura se muestra la comparación entre una <i>neurona biológica</i> (a la izquierda) y una <i>neurona artificial</i> o perceptrón (a la derecha) (Figura adaptada de cse.stanford.edu).....	43
Figura 11. Red Perceptrón Multicapa (MLP) con cuatro neuronas de entrada (variables de entrada), 3 neuronas en la capa oculta y una neurona de salida (variable de salida). Alimentación hacia delante.....	45
Figura 12. Esquema de una Red de Base Radial (RBF).	47
Figura 13. Arquitectura básica de las redes Elman (Adaptada de: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/nnet/ ...	49
Figura 14. SVM proyecta la información en espacios de mayor dimensionalidad, con el objetivo de convertir los datos en clases linealmente separables (Figura adaptada de www.imtech.res.in/raghava/rbpred/home.html)	50
Figura 15. Monitor fuente principal de datos atmosféricos y metereológicos analizados (Mapa adaptado de: http://www.arb.ca.gov/qaweb/mapdemo/map_module.php).....	54
Figura 16. Monitor C12, fuente principal de datos atmosféricos y metereológicos. Mapa adaptado de material de Texas Comisión (Environmental Quality, 2007).....	55
Figura 17. Graficas de dispersión y correlación entre las distintas variables predictoras correspondientes a la Matriz B.	80
Figura 18. Gráfica de valores reales (línea continua) v/s predichos (línea punteada) de acuerdo SVM.	82
Figura 19. Gráfica de valores reales (línea continua) v/s predichos (línea punteada) de acuerdo a ELMAN.	83
Figura 20. Gráfica de valores reales (línea continua) v/s predichos (línea punteada) de acuerdo a MLP.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Estándares mexicanos de contaminantes criterio.....	19
Tabla 2. Límites de los contaminantes criterio establecidos por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (USEPA) y el Consejo de Recursos del Aire de California (Air Resources Board, ARB).....	20
Tabla 3. Nuevos límites para cualquier región, recomendados por la OMS en octubre del 2006 para PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3	21
Tabla 4. Medidas de Rendimiento del Paquete de Validación de Modelos o “Model Validation Kit”, (Chang et al, 2005). En las ecuaciones descritas, C_p = Representa <i>valores pronosticados</i> , C_o = <i>Valores observados</i> , $Media$ = <i>Media aritmética</i>	33
Tabla 5. Parámetros utilizados para el desarrollo los modelos de predicción de las partículas menores a dos y media micras ($PM_{2.5}$).....	57
Tabla 6. Parámetros Registrados utilizados para el desarrollo de los modelos de predicción de ozono.....	58
Tabla 7. Medidas de rendimiento calculadas para los distintos modelos desarrollados para la predicción de $PM_{2.5}$	74
Tabla 8. Resultado de los modelos de predicción de ozono usando Matriz A, propuestos en esta tesis.....	78
Tabla 9. Resultado de los modelos de predicción de ozono usando Matriz B, propuestos en esta tesis.....	78

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de regresión multivariante.....	41
Ecuación 2. Ecuación de Regresión Ridge.....	42
Ecuación 3. Función de aproximación MLP con una capa oculta	46
Ecuación 4. Función de activación de propagación hacia atrás	46
Ecuación 5. Función de aproximación SMLP.....	46
Ecuación 6. Función de activación de SMLP	46
Ecuación 7. Función de activación de SMLP.....	46
Ecuación 8. Función de aproximación RBF.....	48
Ecuación 9. Función de activación gaussiana RBF	48
Ecuación 10. Función de transferencia tangente- sigmodal de la Red Elman	49
Ecuación 11. Función de transferencia lineal de la Red Elman	49
Ecuación 12. Función de valor del error SVM.....	51
Ecuación 13. Función de aproximación de SVM	51
Ecuación 14. Función de Lagrange para SVM.....	51
Ecuación 15. Restricciones de la Función de Lagrange para SVM.....	51