



UNIVERSIDAD DE VALPARAISO

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA Y CIENCIAS

AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

**“DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO BASE,
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA TEORIA DE REDES
NEURONALES, PARA LA PREDICCIÓN DE EPISODIOS
CRITICOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA”**

**TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

TESISTA: BRUNO PACHECO CARREÑO

PROFESOR GUIA: PATRICIO ARELLANO RICOTTI

VALPARAISO, DICIEMBRE DE 2006

Índice

	Pág.
Glosario.....	4
Resumen.....	6
1.-Marco Teórico.....	7
1.1-Características generales.....	7
1.2.- Contaminación atmosférica.....	8
1.2.1.-Contaminantes primarios.....	9
1.2.2.- Contaminantes secundarios.....	10
1.2.3.- Origen de la Contaminación Atmosférica (Emisiones).....	11
1.3.- Conceptos de modelación de la contaminación atmosférica.....	15
1.4.- Contaminación atmosférica en la zona central de Chile.....	24
1.4.1.- Calidad del aire en Santiago.....	27
1.4.2.- Contaminación atmosférica en Valparaíso.....	34
1.5.- Estado actual de la modelación computacional de la contaminación atmosférica.....	38
1.6- Introducción a la teoría de las redes neuronales artificiales.....	40
1.6.1.-Redes neurales biológicas.....	41
1.6.2.-Redes neurales artificiales.....	44
1.7.-Algunos tipos de redes neuronales y algunas aplicaciones generales Y en las ciencias ambientales.....	53
2. – Problema.....	49
3.- Objetivos.....	54
3.1- Objetivos generales.....	54
3.2.- Objetivos específicos.....	54
4.- Materiales y métodos.....	55
4.1.-Elección de los vectores de entrada.....	55
4.2.- implementación del modelo.....	57
5.- Resultados.....	61
6.- Discusión.....	67
7.-Conclusiones.....	72
8.-Referencias bibliográficas.....	73

“A mis padres, que han puesto su esfuerzo, su cariño y esperanza en mi persona y trabajo. También a mis abuelos que me dieron su cariño y apoyo constante”

Agradecimientos

PATRICIO ARELLANO RICOTTI, profesor de la carrera de ingeniería ambiental y profesor guía del presente trabajo de titulación por toda su colaboración, paciencia y apoyo.

JOSÉ CÁCERES ESPINOZA, profesor de la carrera de ingeniería ambiental por su guía, compañía y dedicación hacia mi persona.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo de titulación.

Glosario

- **Confiabilidad:** Posibilidad que tiene un sistema de realizar sin fallas las funciones para las que fue diseñado. Expresa la seguridad y certeza que refleja un trabajo y/o una opinión.
- **Episodios críticos:** condiciones atmosféricas y de contaminación en niveles superiores a los permitidos, y que ponen en riesgo la salud de la población
- **Estabilidad atmosférica:** La estabilidad se define en términos de la facilidad o dificultad existente en la atmósfera para el movimiento vertical de las masas de aire: Una atmósfera es estable cuando impide los movimientos verticales de aire. Una atmósfera es inestable cuando favorece el movimiento ascendente de las masas de aire.
- **Heterogeneidad de los datos:** disparidad en magnitud de los datos entrantes en la red.

Temperatura equivalente (THTE): Es la temperatura que tendría una parcela de aire si toda su humedad se condensara mediante un proceso pseudoadiabático (es decir, si el calor latente de condensación se usara para calentar la muestra de aire) y luego la parcela se llevaría adiabáticamente seca hasta su punto de presión inicial. Esta temperatura suele llamarse Temperatura isobárica equivalente (T_{ie}), que es un poco más baja, y no puede en general suponerse que es aproximadamente igual (T_e (temperatura equivalente) no es igual que T_{ie}).

- **Temperatura potencial (THTA):** Es la temperatura que tendría una muestra de aire si se la llevase adiabáticamente seca hasta la presión de 1000 mb. Para cualquier presión dada, la temperatura potencial es igual al valor de la adiabática seca que pasa por la curva de temperatura a ese nivel. Las temperaturas potenciales se expresan en °K.

- **Temperatura virtual (THTV):** es aquella a la cual el aire seco, a la misma presión, tendría la misma densidad que el aire húmedo. Temperatura del aire seco (T) y Temperatura del aire húmedo (T*) son casi iguales en los niveles altos de la atmósfera donde la humedad es escasa; por ende las curvas correspondientes tienden a unirse; pero en las capas bajas su diferencia puede ser muy significativa.
- **Templado mediterráneo:** es una variedad del clima subtropical, que se caracteriza por sus inviernos húmedos y templados; y los veranos secos y calurosos. La principal característica de este clima es la presencia de un periodo de uno o varios meses de sequía, seguido de otro periodo de lluvias torrenciales y una amplitud de más de 15°C, mayores al clima subtropical típico.
- **Sistema experto:** Aplicación informática que procura capturar conocimiento y luego utilizarlo para emular el mecanismo de raciocinio de un experto humano, para la resolución de problemas concretos. Esto se logra automatizando su procedimiento de toma de decisiones. Es decir, los creadores de sistemas de este tipo analizan no sólo lo que un experto sabe, sino además la manera en que resuelve problemas, con el fin de tratar de replicar ese proceso artificialmente.

Resumen

Los modelos predictivos para el estudio de la atmósfera y la concentración de contaminación en ella, tienen el objetivo de realizar un pronóstico confiable de la contaminación atmosférica en un futuro cercano, que permita tomar a tiempo medidas adecuadas con el fin de evitar la ocurrencia de una situación crítica.

Actualmente, es de principal necesidad el contar con un modelo confiable para la predicción de episodios de contaminación, y evitar así gastos y molestias innecesarias, al momento de evaluar impacto ambiental o aplicar medidas de mitigación y poder tomar medidas oportunas.

Las redes neuronales representan una alternativa a los modelos matemáticos clásicos, y han demostrado ser, en muchos otros casos, de mayor eficiencia que ellos. Este proyecto propone desarrollar un sistema experto basado en la teoría de las redes neuronales, que modele la dinámica de la atmósfera con el objetivo de predecir eventos de contaminación.

La metodología a aplicar en este proyecto consiste en diseñar una red neuronal que efectúe el análisis de las variables ambientales atmosféricas y de contaminación relacionadas con la aparición de episodios críticos de contaminación en la ciudad de Valparaíso, y entregue como resultado la probabilidad de ocurrencia de estos eventos atmosféricos.

Se espera que la metodología aquí propuesta de como resultado el prototipo de un modelo funcional y aplicable a la realidad, que represente una alternativa de predicción para los episodios de contaminación.

1.- Marco Teórico

1.1- Características generales

Los modelos numéricos predictivos han sido usados desde fines de la década de los setenta como la herramienta más importante en el mejoramiento de los pronósticos meteorológicos, siendo este esfuerzo hecho en centros que proporcionan datos meteorológicos provenientes de diferentes fuentes, como satélites, estaciones meteorológicas, radio-sondas, radar, etc. que son resumidos y combinados a través de complejos modelos.

Generalmente estos modelos atmosféricos son desarrollados con el objetivo de representar las condiciones que se presentarán en la atmósfera en un tiempo futuro, lo que permite tomar medidas de contingencia en casos en que estas predicciones anticipen episodios de emergencia.

Son de gran aplicación los modelos de regresiones múltiples, los cuales relacionan variables, usando para esto su comportamiento en tiempos pasados. Un ejemplo de esto es lo que sucede en los Estados Unidos de N. A. en lo que se refiere al estudio del desplazamiento de los huracanes, que en la época de verano en el hemisferio norte amenazan las costas de Norte América y la América Central y el Caribe, pudiendo con esto permitir a la población prepararse para enfrentar las condiciones climáticas que se presentarán.

En las ciencias ambientales y en particular en lo que a la contaminación atmosférica se refiere, los modelos también son ampliamente usados para determinar la forma en que se dispersan los contaminantes generados por distintos tipos de fuentes. La mecánica de fluidos ha permitido comprender leyes físicas que son aplicadas por estos modelos, que además de la cantidad de contaminantes emitidos dependen en gran medida de las características dinámicas de la atmósfera local, como lo que sucede en los modelos de Briggs de caja fija y en la ecuación de la difusión.

En los modelos de dispersión atmosférica se logra determinar principalmente la concentración de un contaminante a una distancia de la fuente determinada siendo

ésta puntual, difusa, móvil o de otro tipo, según las características del modelo aplicado. Como podemos ver estos modelos no permiten representar la dinámica de la atmósfera, sino que se dedican a determinar la dilución que ha sufrido un contaminante.

1.2.- Contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas, fauna, flora y bienes de cualquier naturaleza.

Todas las actividades humanas, y los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la Tierra van acompañados de emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles. Estos, al difundirse en la atmósfera, se integran en los distintos ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la Tierra.

De la definición de contaminación atmosférica dada arriba, se desprende que el que una sustancia sea considerada contaminante o no dependerá de los efectos que produzca sobre sus receptores. Se considera contaminantes aquellas que se definen en la ley 19.300 de bases generales del medio ambiente, definición que se muestra a continuación:

“Contaminante: todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la reservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental”.

Con frecuencia, los contaminantes naturales ocurren en cantidades mayores que los productos de las actividades humanas, los llamados contaminantes antropogénicos. Sin embargo, los contaminantes antropogénicos presentan la amenaza más

significativa a largo plazo para la biosfera, basándonos para ello en por ejemplo el calentamiento global, la lluvia ácida o la destrucción de la capa de ozono.

Tabla 1.1 Contaminantes Naturales del Aire

Fuente	Contaminantes
Volcanes	Óxidos de azufre, partículas
Incendios forestales	Monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas
Vendavales	Polvo
Plantas (vivas)	Hidrocarburos, polen
Plantas (en descomposición)	Metano, sulfuro de hidrógeno
Suelo	Virus, polvo
Mar	Partículas de sal

Una primera clasificación de estas sustancias, atendiendo a cómo se forman, es la que distingue entre contaminantes primarios y contaminantes secundarios.

1.2.1.- Contaminantes primarios

Entendemos por contaminantes primarios aquellas sustancias contaminantes que son vertidas directamente a la atmósfera. Los contaminantes primarios provienen de muy diversas fuentes dando lugar a la llamada contaminación convencional. Su naturaleza física y su composición química son muy variadas, si bien podemos agruparlos atendiendo a su peculiaridad más característica, tal como su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos).

Entre los contaminantes atmosféricos más frecuentes que causan alteraciones en la atmósfera se encuentran:

- Aerosoles (en los que se incluye las partículas sedimentables y en suspensión y los humos).
- Óxidos de azufre, SO_x.
- Monóxido de carbono, CO.
- Óxidos de nitrógeno, NO_x.
- Hidrocarburos, Hn Cm.
- Ozono, O₃.
- Anhídrido carbónico, CO₂.

Además de estas sustancias, en la atmósfera se encuentra una serie de contaminantes que se presentan más raramente, pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión a la atmósfera muy localizada. Entre otros, se encuentra como más significativos los siguientes:

- Otros derivados del azufre.
- Halógenos y sus derivados.
- Arsénico y sus derivados.
- Componentes orgánicos.
- Partículas de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc.
- Partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos.
- Sustancias radiactivas.

1.2.2.- Contaminantes secundarios

Los contaminantes atmosféricos secundarios no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la misma.

Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios son:

- la contaminación fotoquímica;
- la acidificación del medio; y
- la disminución del espesor de la capa de ozono.

1.2.3.- Origen de la Contaminación Atmosférica (Emisiones)

Los contaminantes presentes en la atmósfera proceden de dos tipos de fuentes emisoras bien diferenciadas: las naturales y las antropogénicas. En el primer caso la presencia de contaminantes se debe a causas naturales, mientras que en el segundo tiene su origen en las actividades humanas.

Las emisiones primarias originadas por los focos naturales provienen fundamentalmente de los volcanes, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos. Por su parte, los principales focos antropogénicos de emisiones primarias los podemos clasificar en:

Tabla 1.2 Focos antropogénicos de emisiones primarias

		Procesos industriales
	Industriales	Instalaciones fijas de combustión
Focos fijos	Domésticos	Instalaciones de calefacción
Focos móviles	Vehículos automóviles	
	Aeronaves	
	Buques	
Focos compuestos	Aglomeraciones industriales	
	Áreas urbanas	

Centro Nacional del Medio Ambiente (2001).

Atendiendo a la distribución espacial de estas emisiones se observa que en las regiones más industrializadas de Europa y Norteamérica las emisiones antropogénicas de SO_2 alcanzan proporciones muy superiores a las naturales. Así en el Norte de Europa las emisiones antropogénicas originan alrededor del 90% del azufre que está en circulación en la atmósfera (Centro nacional del medio ambiente, 2001).

Otra circunstancia a tener en cuenta es que los focos de emisión antropogénicos están concentrados, por lo general, en áreas urbanas e industriales. Este conjunto de circunstancias hace que la contribución de las emisiones antropogénicas al problema de la contaminación atmosférica a escala regional sea predominante.

Focos antropogénicos de emisión

Los principales focos de contaminación atmosférica de origen antropogénico son las chimeneas de las instalaciones de combustión para generación de calor y energía eléctrica, los tubos de escape de los vehículos automóviles y los procesos industriales, según el Centro Nacional del Medio Ambiente (2001).

Contaminantes emitidos por los vehículos automóviles

En las últimas décadas, el automóvil ha aparecido de forma masiva en las ciudades, contribuyendo a incrementar los problemas de contaminación atmosférica como consecuencia de los gases contaminantes emitidos por los tubos de escape. Los principales contaminantes lanzados por los automóviles son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), y compuestos de plomo.

No todos los vehículos lanzan los distintos tipos de contaminantes en las mismas proporciones; éstas dependerán del tipo de motor que se utilice. Los vehículos que emplean gasolina como carburante emiten principalmente monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos de plomo. La emisión de este último tipo de contaminante se debe a la presencia en algunos tipos de gasolina de tetraetilo de plomo, aditivo que se añade para aumentar su compresibilidad y con ello el índice de octano.

Los principales contaminantes emitidos por los vehículos que utilizan motores de ciclo diésel (camiones y autobuses, por ejemplo) son partículas sólidas en forma de hollín que dan lugar a los humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible.

Calefacciones domésticas

Las instalaciones de calefacción domésticas son una de las principales fuentes de contaminación atmosférica de las grandes ciudades. Este tipo de focos puede contribuir con un 20 a 30% de las emisiones totales a la atmósfera en áreas urbanas. Los principales contaminantes producidos dependen del tipo de combustible empleado.

En el caso del carbón los principales contaminantes producidos son: anhídrido sulfuroso, cenizas volantes, hollines, metales pesados, CO, CO₂ y óxidos de nitrógeno. Cuando el combustible empleado es líquido (gasóleo o gasoil), los principales contaminantes emitidos son: SO₂, SO₃, NO_x, hidrocarburos volátiles no quemados y partículas carbonosas.

El gas natural es el combustible más limpio de los actualmente disponibles para calefacción, siendo su producción de contaminantes despreciable respecto a los otros combustibles. A la introducción masiva del gas para calefacciones domésticas, sustituyendo al carbón y al gasoil anteriormente utilizado, se debe en gran parte el éxito del Plan de Descontaminación Atmosférica de la ciudad de Londres (Gran Bretaña).

Calderas industriales de generación de calor

Entre las distintas fuentes de contaminación atmosférica de origen industrial, la combustión de combustibles fósiles para la generación de calor y electricidad ocupa

un lugar preponderante, tanto por la cantidad como por los tipos de contaminantes emitidos. Especial atención merecen las centrales térmicas de producción de electricidad.

Los combustibles utilizados por este tipo de instalaciones son el carbón y el fuel-oil. La producción de contaminantes depende en gran medida de la calidad del combustible, en especial de las proporciones de azufre y cenizas contenidas en el mismo y del tipo de proceso de combustión empleado.

Durante el proceso de combustión se libera a la atmósfera en forma de anhídrido sulfuroso el azufre contenido en el combustible, junto con otros contaminantes como óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, metales pesados y una gran variedad de sustancias. Cuando se utiliza como combustible el carbón, se emiten abundantes partículas finas que pueden ser trasladadas a grandes distancias.

Contaminantes emitidos por la industria

La contaminación de origen industrial se caracteriza por la gran cantidad de contaminantes producidos en las distintas fases de los procesos industriales y por la variedad de los mismos. Por otra parte, en los focos de emisión industriales se suele combinar las emisiones puntuales, fácilmente controlables, con emisiones difusas de difícil control.

Los tipos de contaminantes producidos por los focos industriales dependen fundamentalmente del tipo de proceso de producción empleado, de la tecnología utilizada y de las materias primas usadas. Las actividades industriales que producen contaminantes atmosféricos son muy variadas, pero los principales focos están en los procesos productivos utilizados en las industrias básicas.

Entre los sectores que dan lugar a la mayor emisión de contaminantes atmosféricos podemos destacar:

- La siderurgia integral. Produce todo tipo de contaminantes y en cantidades importantes, siendo los principales: partículas, SO_x, CO, NO_x, fluoruros y humos rojos (óxidos de hierro).

- Refinerías de petróleo. Producen principalmente: SO_x , HC, CO, NO_x , amoníaco, humos y partículas.
- Industria química. Produce, dependiendo del tipo de proceso empleado: SO_2 , nieblas de ácidos sulfúrico, nítrico y fosfórico y da lugar a la producción de olores desagradables.
- Industrias básicas del aluminio y derivados del flúor. Producen emisiones de contaminantes derivados del flúor.

1.3.- Conceptos de modelación de la contaminación atmosférica

Existen numerosas formas y técnicas para describir el comportamiento de los contaminantes de en la atmósfera, basadas en las directrices dadas por la mecánica de los fluidos. Dentro de éstas, la ecuación de difusión gaussiana es uno de los modelos de dispersión de contaminantes más usados para determinar la concentración de contaminantes a una distancia determinada de la fuente.

A continuación se hace una introducción a la teoría de dispersión de contaminantes por medio de la pluma de dispersión.

La ecuación de difusión Gaussiana:

El modelo gaussiano de fuente puntual continua, supone como hipótesis de partida que las concentraciones de contaminante en cualquier punto considerado viento abajo están estabilizadas y no dependen del tiempo. Este modelo describe el comportamiento de los gases/vapores de fuerza ascensional neutra, dispersados en la dirección del viento y arrastrados a la misma velocidad.

Respecto a los gases pesados una configuración típica de un escape a nivel del suelo se muestra en la figura1.

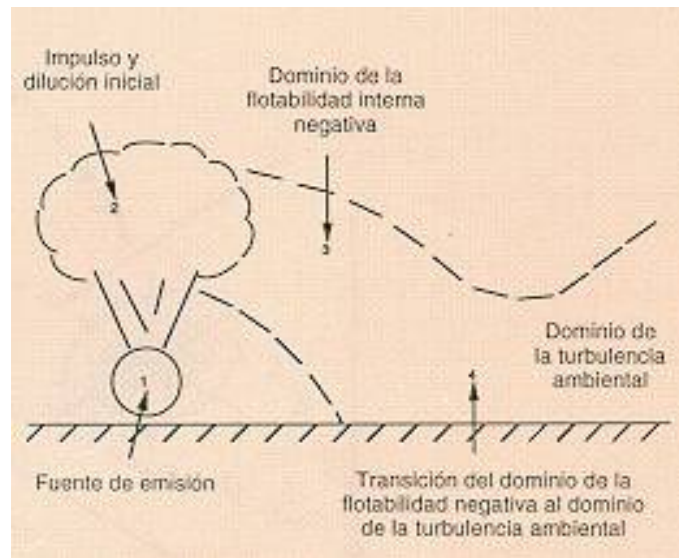


Figura1.- Desarrollo y dispersión de una nube de gas pesado

Los gases pesados muestran una elevación inicial del penacho debido al impulso de salida, como sucede en todo escape, seguida de una cierta caída en curva por influencia de su densidad. Comparándolos con los gases neutros se ve que los gases pesados presentan en los momentos iniciales un comportamiento distinto, por lo cual se han desarrollado modelos sofisticados que no se considera en este documento. Sin embargo, al cabo de un cierto tiempo y a medida que se diluyen en el aire, las características y el comportamiento se pueden asimilar a los de un gas neutro. Si el escape de un gas pesado es de una proporción o intensidad de descarga moderadas, se puede tratar aceptablemente con el modelo gaussiano de gas neutro que es de aplicación mucho más sencilla, especialmente si lo que queremos es estudiar lo que sucede en puntos que no sean excesivamente próximos al punto de emisión.

Descripción del modelo

El fundamento para el modelo de difusión llamado comúnmente como sus proponentes, Pasquill-Gifford, es una dispersión gaussiana en los ejes horizontal y vertical (figuras 2 y 3). La fórmula normalizada para la dispersión de una fuente puntual elevada es:

$$C = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)$$

Siendo,

C = Concentración en el punto x, y, z (kg/m³)

G = Intensidad de la emisión (kg/s)

H = Altura de la fuente emisora sobre el nivel del suelo, más la elevación del penacho (m).

σ_y, σ_z = Coeficientes de dispersión (m).

u = Velocidad del viento (m/s).

La utilización de esta fórmula está limitada a distancias entre 100 m y 10 km, y es aplicable para cortos períodos de tiempo, hasta de unos diez minutos, que es el tiempo promediado o tiempo de muestreo normalizado. Para períodos de tiempo superiores a diez minutos, la concentración viento abajo de la fuente de emisión es en cierta manera inferior, debido a la alteración de la dirección del viento.

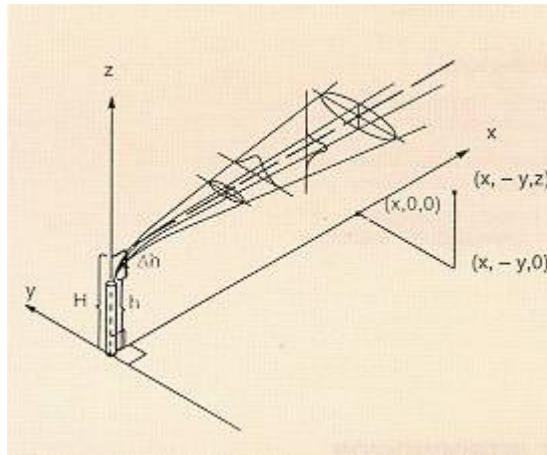


Figura 2.- Sistema de coordenadas y geometría básica de la ecuación gaussiana del penacho

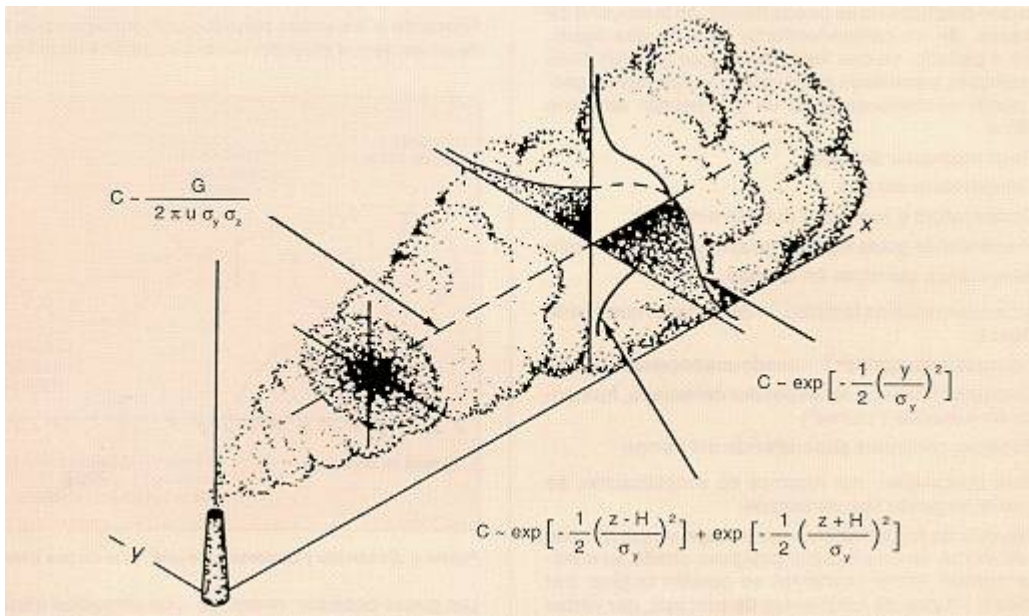


Figura 3.- Los tres términos de la ecuación gaussiana del penacho: concentración en el eje central y términos vertical y lateral

Estimación de la elevación del penacho

La elevación del penacho (Δh) se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente. Esta elevación está originada por la fuerza ascensional y el impulso vertical del efluente.

La temperatura de salida del efluente en el caso de que supere en más de 50 °C la temperatura ambiental, tiene mayor influencia que el impulso vertical en la determinación de la altura que alcanzará el penacho.

Como regla general la elevación del penacho es directamente proporcional al contenido calorífico del efluente y a la velocidad de salida del mismo, e inversamente proporcional a la velocidad local del viento.

Una de las fórmulas más empleadas para el cálculo de esta elevación es la de Holland:

$$\Delta h = \frac{V_s d}{u} \left(1,5 + 2,68 \cdot 10^{-3} \cdot P \frac{T_s - T_a}{T_s} d \right) \quad (2)$$

Siendo:

Δh = Elevación del penacho por encima de la fuente emisora (m)

V_s = Velocidad de salida del contaminante (m/s)

d = Diámetro interior del conducto de emisión (m)

u = Velocidad del viento (m/s)

P = Presión atmosférica (mbar)

T_s = Temperatura del contaminante (K)

T_a = Temperatura ambiente atmosférica (K)

$2,68 \cdot 10^{-3}$ es una constante expresada en $\text{mbar}^{-1} \text{m}^{-1}$

Los valores de Δh obtenidos con esta fórmula deben corregirse (tabla 1.4) multiplicando por un factor, establecido por Pasquill-Gifford-Turner, que es función de las condiciones meteorológicas, que se describen más adelante.

Tabla 1.4 factores de corrección

Categorías de estabilidad (clases)	Factor de corrección aplicado al Δh , calculado por la fórmula de Holland
A, B	1,15
C	1,10
D	1,00
E, F	0,85

Factores que influyen en la dispersión del penacho

Las condiciones meteorológicas y la duración del escape tienen una gran importancia en el alcance de la dispersión del penacho. Los factores principales son: la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica.

La estabilidad atmosférica viene definida en función del gradiente vertical de temperatura de las capas del aire.

Los datos de velocidad del viento y estabilidad atmosférica, siempre que sea posible, deben obtenerse de estaciones meteorológicas locales. Dado que no siempre es posible disponer de esta información, a través de una tabla establecida por Pasquill (Tabla 1.5) puede obtenerse la categoría de estabilidad atmosférica estimada según las condiciones de insolación y velocidad del viento.

Tabla 1.5: Condiciones de estabilidad meteorológica de Pasquill y Gifford

Velocidad del viento (m/s) a 10 metros de altura	Insolación diurna			Condiciones nocturnas	
	Fuerte	Moderada	ligera	Finamente cubierto ó mas de la mitad cubierto	Nubosidad $\leq 3/8$
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

La velocidad del viento se acostumbra a medir a 10 metros de altura. Esta velocidad, a niveles más bajos de 10 metros, se ve reducida notablemente debido a los efectos

de rozamiento. Para niveles distintos de este valor, la velocidad del viento debe corregirse según la relación:

$$U_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (3)$$

Siendo:

u_z = Velocidad del viento a la altura de la fuente emisora (m/s)

u_{10} = Velocidad del viento a la altura de 10 m (m/s)

z = Altura de la fuente emisora (m)

p = Coeficiente exponencial

Los valores de p son función de la estabilidad atmosférica y la rugosidad del suelo.

En la tabla 1.6 se presentan tales valores.

Tabla 1.6: Coeficientes de corrección de la velocidad del viento

Estabilidad	Coeficiente exponencial atmosférico (p)	
	Urbano	Rural
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,20	0,10
D	0,25	0,15
E	0,40	0,35
F	0,60	0,55

Coeficientes de dispersión

En la expresión (1), los parámetros σ_y y σ_z son las desviaciones tipo en las direcciones lateral y vertical respectivamente, que representan una medida de la dispersión del penacho en dichas direcciones. Tales parámetros son función de la distancia a la fuente emisora viento abajo y de la clase (categoría) de estabilidad atmosférica definida en el punto anteriormente.

Estos coeficientes se suelen presentar en forma gráfica o pueden calcularse según fórmulas empíricas. Diferentes autores llegan a expresiones que difieren ligeramente.

En las figuras 4 y 5 se muestran unos gráficos ampliamente utilizados para obtener las σ_y y σ_z , obtenidos a partir de las fórmulas de Turner. Estos gráficos indican que para una determinada distancia viento abajo de la fuente de emisión, la amplitud del penacho es máxima cuando la inestabilidad atmosférica es también máxima y es mínima cuando la atmósfera es muy estable.

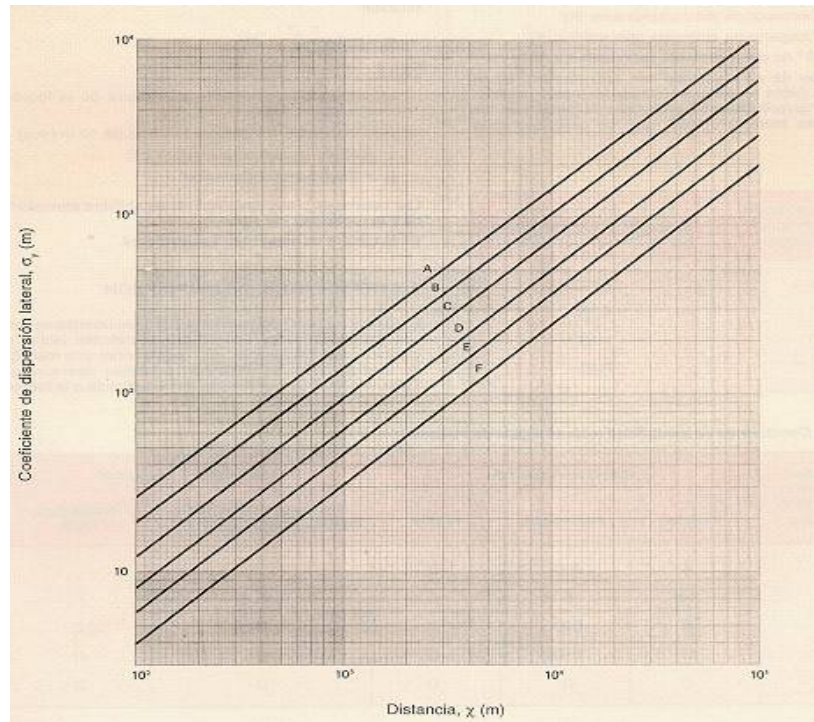


Figura 4.- Grafica para el cálculo del coeficiente de dispersión lateral σ_y según distancia y categoría de estabilidad atmosférica

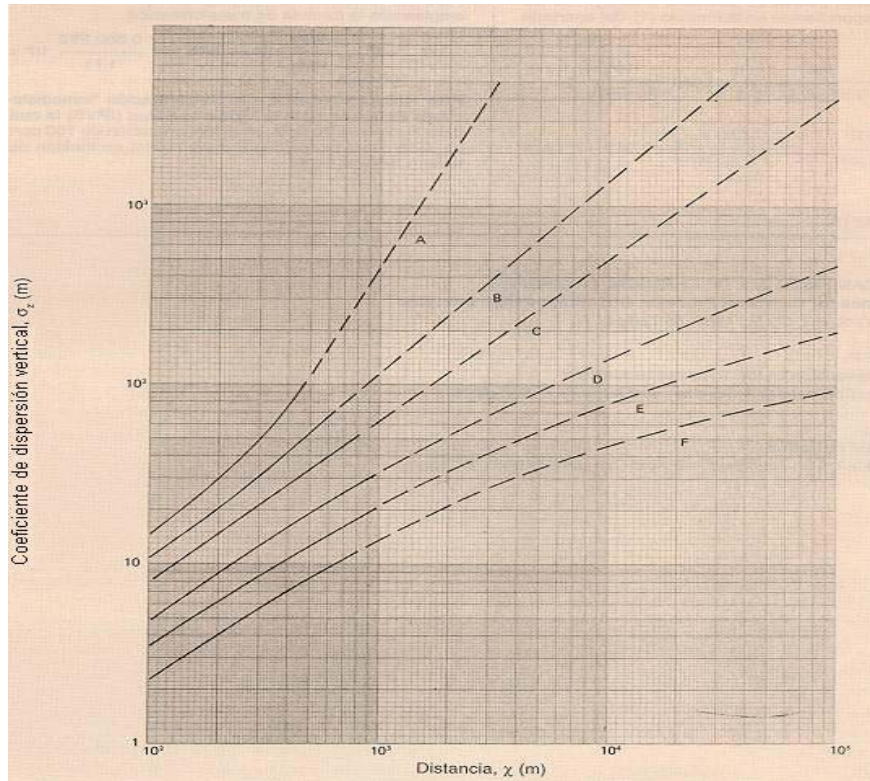


Figura 5.- Coeficiente de dispersión vertical σ_z según distancia y categoría de estabilidad atmosférica

Los valores obtenidos de estos gráficos o de las fórmulas que han dado lugar a ellos, solamente son aplicables en campo abierto y debe tenerse en cuenta que en condiciones inestables (A) y estables (F) se puede cometer errores en la estimación de σ_z .

Para condiciones de estabilidad intermedias entre las anteriores, se puede esperar que la estimación de σ_z se desvíe como máximo, al doble del valor estimado por los gráficos.

1.4.- Contaminación atmosférica en la zona central de Chile

El caso más cercano y documentado a nivel nacional de esto, es el caso de la Región Metropolitana. Desde comienzos de la década de los sesenta, los habitantes de la ciudad de Santiago se han visto expuestos en forma creciente a la acción de diversos agentes nocivos, la que es percibida como impactos mayormente en sus vías respiratorias y también en sus ojos. La presencia de estos agentes se denomina contaminación atmosférica, concepto que actualmente se considera inevitablemente ligado al hábitat urbano. En efecto, el mayor o menor grado de contaminación de una ciudad forma parte integral de su descripción con similar relevancia a la de su clima.

Por una parte, una proporción importante de los contaminantes a los que está expuesta la población, no se origina directamente de las emisiones de cada fuente. En efecto, existen los contaminantes denominados primarios, producidos directamente por actividad humana, tales como partículas y gases generados por combustión o polvo en suspensión proveniente del tránsito de vehículos que levanta el polvo de las calles. Otros, los secundarios, provienen de reacciones químicas o de condensación de vapores en la atmósfera de productos llamados precursores, proceso que puede tomar horas o días. Por ejemplo, el contaminante criterio ozono troposférico no se emite directamente por alguna fuente. Pertenece a una familia de productos altamente reactivos llamados oxidantes fotoquímicos que se forman a partir de compuestos orgánicos volátiles (COV) tales como benceno, aguarrás, tolueno, acetona, etc. y óxidos de nitrógeno (NO_x) en una reacción que requiere radiación solar (CONAMA Chile, "www.conama.cl").

Por otra parte, el material particulado (PTS), el contaminante más dañino en Santiago, no es estrictamente hablando "un" contaminante, si no que es una especie de caldo con contenidos que difieren en el daño que generan. Genéricamente corresponde a sólidos en suspensión, pero sus efectos dependen del tamaño de las partículas suspendidas y del contenido de estas partículas (por ejemplo, el daño que generan es diferente cuando contienen arsénico y cuando no). Respecto del tamaño, cabe distinguir entre el PM₁₀, partículas pequeñas que pasan por un "tamiz" cuadrado de

lado 10 micrones, y el PM 2.5 que es mucho más fino, pasando por un filtro cuadrado de 2.5 micrones.

El particulado de tamaño mayor que PM10 se deposita rápidamente y forma la mayor parte del polvo que se retira diariamente de los muebles y el piso. Esta molestia se transforma en riesgo al disminuir el tamaño a menos de 10 micrones. Mientras menor sea el tamaño de partícula, aumentan las probabilidades de alcanzar los alvéolos pulmonares o aún directamente el sistema circulatorio. Adicionalmente, un grano de particulado fino tiene mucha mayor capacidad de transportar otros productos nocivos en su superficie, recolectados durante su trayecto atmosférico. Además, su alta relación área/volumen le confiere un largo tiempo de residencia en la atmósfera, y por estos motivos, recientemente varios países han iniciado el control estricto de PM2.5, pues se estima que su peligrosidad es órdenes de magnitud mayor que la del PM10.

Para complicar aún más el cuadro, el material particulado en el aire está compuesto por partículas primarias emitidas directamente por las fuentes, y por partículas secundarias, formadas a partir de gases en la atmósfera. Estos gases “precursores” son el SO₂ (principalmente generado por la industria), NO_x (principalmente generado por buses y otros vehículos) y amoníaco (cuyas fuentes son, por ejemplo, desechos orgánicos y la agricultura).

La importancia de este particulado secundario se ha reconocido sólo recientemente para Santiago. Por lo tanto, para controlar el crítico problema del particulado en Santiago, es importante también controlar gases como el SO₂, NO_x y amoníaco, además de las emisiones directas.

En el ámbito de la contaminación atmosférica, la cuenca de Santiago es conocida por sus niveles históricos de malas condiciones de ventilación y por consiguiente de la calidad del aire, es por ello que la preocupación en esto es constante por parte de las autoridades.

De acuerdo con lo establecido en el cuerpo legal correspondiente, la ley 19.300 de bases generales del medio ambiente, se ha desarrollado un plan de prevención y descontaminación atmosférica para la región metropolitana (RM) bajo las siglas PPDA.

Este plan en funcionamiento desde 1998, tiene como objetivos lo establecido en la reglamentación vigente, recuperar los niveles señalados en las normas primarias de calidad del aire que dieron lugar a la declaración de Zona Saturada de la Región metropolitana (Decreto supremo N° 131 región metropolitana Chile 1996), y evitar la superación de la norma primaria de calidad que dio lugar a su declaración de Zona latente.

Para el desarrollo de lo anterior se aplicó un sub-plan operacional, para el cual se definieron tres líneas de acción que son las siguientes:

- N° 1, en que se considera medidas de carácter preventivo a implementar durante todo el periodo otoño-invierno.
- N° 2, en que se considera las medidas de mitigación una vez alcanzados los niveles considerados crítico y peligroso (300 y 500 ICAP, respectivamente).
- N° 3, en que se considera las medidas destinadas a perfeccionar constantemente el plan operacional (plan de prevención y descontaminación de la región metropolitana, junio 1997).

Como podemos ver dentro de las líneas de trabajo propuestas por la autoridad, es de principal importancia el conocer lo que aquí se llama ICAP, índices de calidad del aire por material particulado.

Para ésto se cuenta desde 1988 con estaciones de monitoreo de calidad del aire que han permitido conocer el comportamiento de los contaminantes de la cuenca de Santiago, siendo el ICAP uno de los índices de control más importantes que la autoridad utiliza para predecir la presencia de un episodio crítico de contaminación, y junto con ello determinar la aplicación de las medidas de mitigación correspondientes.

La red de monitoreo encargada de esta función controla calidad del aire y meteorología llamada MACAM-2 y puesta en marcha en 1988, en un principio con 5 estaciones y que luego fue ampliada a 8. Completamente automáticas, dependientes del servicio de salud metropolitano del ambiente (SESMA, "www.sesma.cl"), las

estaciones están conectadas con SESMA y CONAMA Región metropolitana, con lo que se tiene acceso a la información en tiempo real.

Los planes para la red de monitoreo ambiental son ser ampliada para satisfacer los requerimientos de la modelación fotoquímica de la atmósfera, acción recomendada por la auditoria internacional realizada al Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA).

Tabla 1.7 Condiciones meteorológicas y dispersión de contaminantes

Condiciones de ventilación y dispersión	Factores meteorológicos asociados
Favorables	Pasos de sistemas frontales activos, precipitaciones y ausencia de inversión térmica de subsidencia.
	Condiciones de inestabilidad post frontal,
	Paso de frentes de regular actividad o de núcleos fríos en altura.
	Advecciones intensas de aire marino saturado en agua (desplazamiento de masas de aire desde la costa al valle central).
Regulares	Alta Subtropical del Pacífico,
	Paso de sistemas frontales en altura.
	Advecciones débiles de aire costero.
Malas (episodios críticos de contaminación)	Configuraciones meteorológicas de tipo A, BPF o mixtas.

1.4.1.- Calidad del aire en Santiago

Las estaciones de monitoreo de calidad del aire han permitido seguir desde 1988 el comportamiento de los contaminantes de la cuenca de Santiago. Uno de los índices más relevantes es el ICAP (Índice de Calidad del Aire por Material Particulado), indicador que sirve como antecedente para que la autoridad pueda determinar que estamos en presencia de un episodio crítico de contaminación.

La red oficial de Monitoreo Automático de Calidad del Aire y Meteorología (Red MACAM) fue puesta en marcha en 1988 con 5 estaciones de monitoreo, mayoritariamente ubicadas en el sector céntrico de Santiago. En el invierno de 1997, dicha red fue renovada y ampliada a 8 estaciones de monitoreo automático, en lo que hoy se denomina como Red MACAM-2, dependiente del Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA).

Las estaciones de monitoreo están conectadas en forma remota con el SESMA y CONAMA Región metropolitana, lo que permite el acceso en tiempo real a los datos de calidad del aire por parte de esas instituciones.

En la siguiente tabla es posible apreciar los contaminantes que las estaciones están registrando, el nombre de cada una de ellas y el año en que comenzaron sus funciones.

Tabla 1.8 contaminantes medidos por cada estación de monitoreo

Nombre (ubicación)	Año inicio	Contaminantes medidos actualmente
Las Condes	1988	CO, SO ₂ , O ₃ , NO _x /NO ₂ , MP 2.5, MP10,
Seminario	1988	CO, SO ₂ , O ₃ ,MP10, NO _x /NO ₂ (hasta 1996).
La Paz	1988	CO, SO ₂ , O ₃ ,MP10
Parque O'Higgins	1988	CO, SO ₂ , O ₃ ,MP10, MP 2.5, NO _x /NO ₂ (hasta 1996).
La Florida	1997	CO, SO ₂ , O ₃ , MP10, MP 2.5,
Pudahuel	1997	CO, SO ₂ , O ₃ ,MP10, MP 2.5, NO _x /NO ₂ ,
El Bosque	1997	CO, SO ₂ , O ₃ , MP10,
Cerrillos	1997	CO, SO ₂ , O ₃ , MP10, NO _x /NO ₂ ,

CH₄: metano, NMH: hidrocarburos no metánicos y THC: hidrocarburos totales (SESMA-CONAMA)

Red de estaciones meteorológicas

La red meteorológica operada por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) cuenta con 22 estaciones, todas ellas registran segundo a segundo las variables atmosféricas de la región.

La red de estaciones meteorológicas del CENMA cuenta con 22 estaciones de superficie y un perfilador de temperatura y viento LAP-RASS. 20 de las estaciones se encuentran dispersas en la cuenca de Santiago y las 2 restantes están ubicadas en la localidad de Pichidangui, comuna de Los Vilos, en la IV Región y Putú, comuna de Constitución, VII Región.

El equipo perfilador LAP-RASS está instalado en el recinto La Platina del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), en la comuna de La Pintana, en Santiago. Este sistema está compuesto en realidad por dos equipos: LAP3000 y RASS, fabricados por la empresa Radian International. El equipo LAP3000 (Lower Atmospheric Profiler) es un radar para medir perfiles verticales de viento, mientras que el RASS (Radio Acoustic Sounding System) es un equipo opcional que complementa al anterior para obtener perfiles verticales de temperatura.

Los equipos que conforman el sistema se programan para obtener mediciones en escalas verticales y temporales según se planifique y de acuerdo a los requerimientos de la información.

La altura máxima en medición de viento es aproximadamente 4300 metros, mientras que para la temperatura ésta llega a los 1700 metros.

Los equipos de sondeo, en tanto, se usan en forma itinerante de acuerdo a campañas específicas. En particular el Radioteodolito se encuentra en INIA para la realización de los sondeos de comparación para el equipo LAP-RASS.

Todas las estaciones meteorológicas muestrean las variables atmosféricas cada segundo. El datalogger, en su memoria intermedia, guarda y promedia los valores medidos para un período de 15 minutos. Así, para un día de mediciones, existe una serie temporal de 96 mediciones promedios. Este período se ha adoptado de acuerdo

a las recomendaciones de U. S. EPA, "On-Site Meteorological Program Guidance For Regulatory Modeling Applications", edición 1993.

1.4.1.1.-Modelo de pronóstico para episodios de contaminación

Dentro del plan de prevención y descontaminación atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA), se establece la necesidad de desarrollar un sistema que permita la predicción de los episodios de contaminación, dada la importancia que tiene este hecho desde el punto de vista de aplicar medidas mitigatorias a estos problemas ambientales de forma anticipada y resguardar a la población de la misma forma.

Por otro lado, el decreto supremo N° 59 del ministerio Secretaría General de la Presidencia en 1988, establece la norma de calidad primaria para material particulado respirable PM10, que también establece los límites máximos permitidos de concentración de contaminantes atmosféricos que permiten mantener la salud de la población, y junto con esto, la necesidad de pronosticar éstos episodios críticos de contaminación.

Mediante la resolución N° 12.612 de 1988 del Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente SESMA, se aplica por primera vez un modelo de pronóstico de la calidad del aire de la ciudad de Santiago, puesto en marcha en julio de 1988.

En 1999 CONAMA Chile, con el objetivo de mejorar esta herramienta, encargó un estudio para mejorar la metodología aplicada, lo que dio como resultado un nuevo modelo llamado (como el autor) Cassmassi. Se usó como fuente de información de este modelo los datos aportados por la red MACAM-2 y los datos meteorológicos de

altura de la zona central de Chile, entre el 1 de abril y el 17 de septiembre de los años 1997 y 1998.

La metodología utilizada para desarrollar este modelo de predicción de PM10 es correspondiente a algoritmos de cálculo desarrollados mediante aplicación de técnicas estadísticas de regresión múltiple, con el objetivo de establecer posibles relaciones entre las variables predictivas y la variable a predecir. El predictor usado considera para esto variables meteorológicas observadas, índices de condiciones meteorológicas observadas y pronosticadas, concentraciones de contaminantes observadas, índices de variaciones esperadas de emisiones, y otros; éstos se detallan más adelante.

El modelo en uso pronostica el valor máximo de concentración promedio de 24 horas de material particulado respirable PM10 para el período de 00 a 24 horas del día siguiente, expresado en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en cada una de las estaciones de la red MACAM-2 clasificadas como estaciones de monitoreo de PM10 con representatividad poblacional (EMRP), según lo establece la Resolución N° 11.481 de 1998 del SESMA.

Se describe también que cada estación de monitoreo cuenta con ecuaciones que la describen particularmente; las variables, que se describen más adelante, se obtienen de la información del cambio esperado de las concentraciones de PM10 medidas en la red MACAM-2, y la información de la situación meteorológica de altura entregada por la Dirección Meteorológica de Chile cercana a Santiago y de las condiciones meteorológicas de escala sinóptica y regional observadas y pronosticadas para la región.

VARIABLES UTILIZADAS POR EL MODELO DE PRONÓSTICO

VARIABLES RELACIONADAS CON EMISIONES:

- Día de la semana
- Índice de día feriado/no feriado
- Factor de cambio de concentraciones según día de la semana usado en el modelo de CONAMA Chile.

- Factor de cambio de concentraciones según día de la semana específico para cada estación de monitoreo

VARIABLES DE CALIDAD DEL AIRE (PM10). Para cada estación de monitoreo:

- Concentración máxima de 24 hrs. observada al día anterior
- Concentración promedio de 24 hrs. observada a las 11 hrs. del día actual.
- Cambios de concentraciones medias de 24 hrs. observadas a las 10 hrs. (en la última hora, últimas 3 hrs., últimas 6 hrs).

VARIABLES METEOROLÓGICAS OBTENIDAS DEL RADIOSONDEO CERCAÑO A SANTIAGO (QUINTERO, SANTO DOMINGO) REALIZADO A LAS 12 UTC DEL DÍA ACTUAL:

- Altura, temperatura, humedad, vientos observados a niveles estándar de presión (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa).
- Altura, presión, temperatura de la base y tope de la capa de inversión térmica cercana a la superficie.
- Variables derivadas de las anteriores (espesores, diferencias con el día anterior)

VARIABLES A PRONOSTICAR PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES MONITORAS:

- Concentración máxima de 24 hrs. de PM10 esperada para el día siguiente.

(Fuente: CONAMA-Cassmassi)

1.4.1.2.-Potencial meteorológico de contaminación atmosférica

La aplicación operacional de esta metodología considera dos algoritmos de predicción para cada estación monitora. Un primer algoritmo incluye el "Índice de Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica" (PMCA) pronosticado para el día

siguiente. La figura 6 muestra que el PMCA tiene una buena correspondencia con los promedios de 24 horas de las concentraciones observadas de PM10.

El segundo algoritmo está basado solamente en observaciones (del mismo día y del día anterior). De esta forma, si el primer algoritmo no se puede aplicar por insuficiencia de la información, se utiliza el segundo algoritmo.

Tabla 1.9 Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica (PMCA)

Categoría del, PMCA (N° de denominación)	Condiciones de ventilación/dispersión de contaminantes	Características
1 Bajo	Muy buenas	Ausencia de inversión térmica de subsidencia.
		Sistemas frontales activos
		Marcada inestabilidad
2 Regular/bajo	Buenas	Inversión térmica de subsidencia débil y/o elevada.
		Sistemas frontales de regular actividad o inestabilidad ligera
		Advecciones generalizadas de aire húmedo y nubosidad baja.
		Bajas segregadas o núcleos fríos.
3 Regular	Regulares	Predominio anticiclónico normal del período invernal
		Ausencia de precipitaciones
		Advecciones débiles de nubosidad baja al sector poniente de la cuenca.
4 regular/ alto	Malas a críticas	Presencia de configuraciones tipo A o BPF. (*)
		Índice de circulación zonal medio o alto.
5 Alto	Críticas	Presencia de configuraciones tipo A o BPF.
		Bajo índice de circulación zonal.

Fuente: CENMA-Universidad de Chile

(*) Corresponde a dos tipos de configuraciones meteorológicas que inciden en los episodios críticos de contaminación.

En 1999 y 2000 se evaluó el modelo Cassmassi por parte del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, para lo cual se utilizó información del período entre el 1 de abril al 17 de septiembre de 1999. Así se garantiza la validación del modelo y el cumplimiento de éste con los requerimientos del Decreto Supremo. N° 59 de 1998. Esta evaluación produjo los siguientes resultados (considerando la reducción por las medidas implementadas):

- Acierto Total: 71%
- Acierto a Buenas Condiciones: 91%
- Acierto a Condiciones de Alerta: 44%
- Acierto a Condiciones de Preemergencia y Emergencia: 60%.

La descripción detallada Del modelo Cassmassi se encuentra en el trabajo "Improvement of the Forecast of Air Quality and of the Knowledge of the Local Meteorological Conditions in the Metropolitan Region" (Cassmassi 1999).

1.4.2.- Contaminación atmosférica en Valparaíso

En 1996, cuando CONAMA Chile inició sus estudios sobre el recurso atmosférico, se encontró con que casi no existían datos sobre la Calidad del Aire en las distintas ciudades de Chile, con excepción de Santiago; por tanto preparó un proyecto para estudiar la realidad de este recurso en las cinco ciudades de mayor desarrollo industrial o urbano del país. Desde Enero desde 1997 se empezó en la V Región la ejecución del proyecto de "Calidad del Aire en cinco ciudades de desarrollo Urbano - Industrial", proyecto financiado conjuntamente por la Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE) y la CONAMA Chile.

El objetivo del proyecto fue realizar una extensa prospección de gases contaminantes, que pudieran estar perjudicando la salud de la población en las dos ciudades de mayor desarrollo industrial o urbano de nuestra Región, Valparaíso y Viña del Mar.

Los gases que se estudiaron fueron:

- El Dióxido de Nitrógeno
- El Anhídrido Sulfuroso (SO₂)
- El Ozono (O₃)
- Material Particulado Respirable (PM10 y PM2,5)

Los resultados más destacados de la primera fase de este estudio de Calidad del Aire en Valparaíso fueron los siguientes:

1. La calidad del aire en la ciudad con respecto a la contaminación con óxidos de nitrógeno y Azufre, NO₂ y SO₂ respectivamente, no ha sobrepasado las normas nacionales, por tanto se considera aceptable.
2. A pesar de esto, se ha detectado niveles importantes de NO₂ en las principales arterias de la ciudad; por tanto se hace prioritario continuar la vigilancia en sectores tales como las calles Esmeralda, Pedro Montt, y Av. España.
3. El Ozono (O₃) no fue comparado con la norma nacional dado que la metodología de medición no lo permitía, pero a cambio fue comparado con la recomendación de la Organización Mundial para la Salud, respecto de la cual no tuvo excedencias (ver tabla de normas).
4. El Material Particulado Respirable (PM10) sí mostró 4 excedencias a la norma nacional durante un año, en el monitor de la Av. Brasil.
5. El Material Particulado Respirable (PM2,5) no tiene norma nacional aún por lo cual fue comparado con la norma norteamericana EPA, según la cual este contaminante mostró niveles sobre la norma en una oportunidad en la estación Esmeralda.

Los resultados de este estudio de Calidad del Aire en Viña del Mar fueron los siguientes:

1. La calidad del aire en la ciudad con respecto a la contaminación con óxidos de nitrógeno y Azufre, NO₂ y SO₂ respectivamente, no ha sobrepasado las normas nacionales, por tanto se considera aceptable.
2. Al igual que en Valparaíso, la ciudad mostró niveles importantes de NO₂ en su centro comercial y por otro lado en los sectores altos del ubicados al norte se encontraron niveles de 50% de la norma de SO₂.
3. El Ozono (O₃) no tuvo excedencias con respecto a la recomendación de la Organización Mundial para la Salud.
4. El Material Particulado Respirable (PM10) sí mostró 2 excedencias a la norma nacional durante un año, en las estaciones de El Salto y Av. Ecuador.
5. El Material Particulado Respirable (PM2,5) tuvo una excedencia con respecto a la norma EPA en la estación de El Salto.

En virtud de los resultados obtenidos y dado que la proyección del estudio hace necesario seguir vigilando la calidad del aire en estas dos ciudades, como también se hace urgente la necesidad de encontrar soluciones a los futuros desafíos que la contaminación atmosférica nos pueda presentar, CONAMA Chile y COSUDE han decidido continuar con la segunda parte de este proyecto por 21 meses más.

Los objetivos de esta segunda fase son similares a los de la fase anterior, con acento en la labor de gestión y sensibilización de las autoridades y público en general que debe generar el proyecto.

Hay que tener claro que las condiciones meteorológicas en la zona costera son completamente diferentes a las presentes en zonas alejadas al mar, climáticamente se clasifica como templado mediterráneo. Tanto el océano Pacífico, en general, como la corriente de Humboldt, en particular, condicionan en gran medida la conducta de los elementos climáticos de la región. Las direcciones predominantes de los vientos, todas de componente oceánico y portadoras de humedad, explican la constante presencia de este factor en el clima regional.

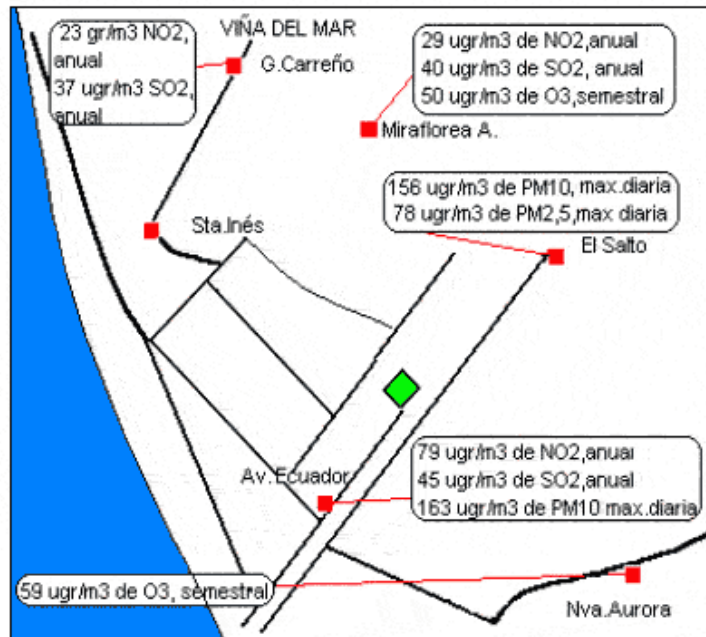


Figura 6.- Puntos de muestreo y resultados obtenidos del estudio de la calidad del aire.

El carácter frío de la corriente de Humboldt determina la existencia permanente de una banda de bajas temperaturas vecinas a la costa, contribuyendo al descenso de las temperaturas continentales y con ello al perfil de temperaturas de la atmósfera.

De acuerdo a lo anterior y haciendo comparación con el caso de la Región Metropolitana, según René Garreaud y José Rutllant tenemos que sobre la base de cartas meteorológicas (Reanálisis) y datos de superficie y altura obtenidos durante el crucero CIMAR 6 Islas Oceánicas, se documenta y discute el efecto de la variabilidad de escala sinóptica en la nubosidad asociada a la capa límite marina y en la inversión térmica que la limita por arriba. Esta variabilidad fue más marcada durante la primera mitad del CIMAR 6, debido a la proyección de perturbaciones de latitudes medias sobre el sector subtropical del Pacífico sur-oriental.

La amplitud de estas perturbaciones resultó ser más pronunciada en la costa, posiblemente debido a ascensos y descensos realizados por los Andes. El flujo cálido del este y el descenso de la inversión térmica asociados a la entrada de dorsales cálidas en altura que siguieron a estas perturbaciones se extendió hasta unos 800 km mar afuera, aunque una delgada capa superficial mantuvo la dirección sur (hacia el ecuador) en los vientos. Se puede concluir que a nivel local no existe una relación

simple entre subsidencia de gran escala y espesor de la capa límite marina, probablemente debido a la advección cálida que produce el viento del este al descender sobre la ladera andina.

Es por ello que al momento de modelar por medio de cualquier tipo de metodología se debe tener este fenómeno en cuenta, ya que es determinante para la dispersión de los contaminantes de la zona costera.

1.5.- Estado actual de la modelación computacional de la contaminación atmosférica

Actualmente existen variados programas computacionales capaces de calcular la contaminación atmosférica, basados en la teoría de la dispersión, o si se quiere basado en otros procesos desarrollados en la atmósfera como los fotoquímicos, pero en general éstos evalúan magnitudes de contaminación. Todo depende del aspecto ambiental que el usuario quiera modelar.

Por ejemplo, existen variantes del modelo de la ecuación de difusión gaussiana de contaminación, para parámetros de interés como los nombrados anteriormente (Aerosoles, en los que se incluye las partículas sedimentables y en suspensión y los humos, Óxidos de azufre SO_x , Monóxido de carbono CO , Óxidos de nitrógeno NO_x , Hidrocarburos HnC_m , Ozono O_3 y Anhídrido carbónico, CO_2). Existen para estos aspectos softwares como SCREEN3 e ISC3; estos programas han sido desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental (USA). El primero de ellos se emplea para desarrollar cálculos de contaminación total; el segundo también, pero aplicado a fuentes industriales complejas, y posee filtros que consideran una tasa de decaimiento para algunos contaminantes, como el SO_x y su filtro Kalman.

En general existen modelos para cada aspecto de la atmósfera, definiendo aspecto atmosférico como el enfoque específico de los ciclos atmosféricos que se quiere describir con la modelación.

Por el contrario, el objetivo final de la modelación de cualquier matriz ambiental es la evaluación ya no del impacto sino que del episodio de contaminación. Un episodio de contaminación se define como el intervalo de tiempo en el cual se presenta en el ambiente la contaminación, la que a su vez es caracterizada por umbrales o índices que la declaran mala, regular o aceptable, según sea el caso. Además en este intervalo de tiempo se presenta las variables que determinan la concentración de un contaminante en determinado estado o condición, es decir, la presentación de un impacto a causa de diferentes variables en un periodo de tiempo determinado.

Como podemos observar, cada aspecto atmosférico que intente caracterizar los procesos que tienen que ver con la contaminación debe ser relacionado por el usuario con resultados de otros modelos e índices, para poder evaluar si se encuentra o no en un episodio de contaminación, y la magnitud o gravedad de éste. Más aun, para evaluar la calidad del aire se debe desarrollar índices dinámicos y temporales, pues es ésta la forma de evaluar a distintas escalas temporales y determinar si cierto territorio está contaminado o no.

Para solucionar este problema de la relación y evaluación de los resultados de los episodios de contaminación se ha intentado con buenos resultados implementar modelos matemáticos basados en la teoría de las redes neuronales, como se explicará en los capítulos posteriores.

1.6- Introducción a la teoría de las redes neuronales artificiales

Las redes neuronales

El cerebro es un procesador de información con unas características muy notables: es capaz de procesar a gran velocidad enormes cantidades de información procedentes de los sentidos, combinarla o compararla con la información previamente almacenada, y dar respuestas adecuadas, incluso en situaciones nuevas. Logra discernir un susurro en una sala ruidosa, distinguir una cara en una calle mal iluminada o leer entre líneas en una declaración política; pero lo más impresionante de todo es su capacidad de aprender a representar la información necesaria para desarrollar tales habilidades sin instrucciones explícitas para ello.

Aunque no se conoce completamente la manera en que el cerebro aprende a procesar la información que recibe, se ha desarrollado modelos que intentan simular estas características, los que vistos del punto de vista de un sistema digital son envidiables en lo que corresponde a su robustez y tolerancia a las fallas (una pérdida de neuronas no implica necesariamente la ocurrencia de fallas), su flexibilidad pues es capaz de ajustarse a nuevas condiciones por medio del aprendizaje y no es necesario volver a programarlo, pues se programan sólo basados en algunos paradigmas básicos; pueden manejar información difusa, ruidosa o inconsistente con impresionante rapidez, son prácticamente procesadores paralelos, consumen poca energía y son, con respecto a la aplicación, de considerable poco tamaño. En general son sistemas de procesamiento de información increíbles, que maneja información imprecisa a gran velocidad, tienen la capacidad de discernir cuando la información no es clara y principalmente la capacidad de aprender sin requerir instrucciones explícitas (Krasnopolsky 2002).

Basados en las características de estos procesos y su alta eficiencia, varios investigadores han desarrollado teorías para la creación de redes neurales artificiales, las cuales imitan las características más básicas de las redes biológicas antes nombradas (Gómez 1999 “www.iiia.csic.es”).

Los sistemas de procesamiento de información convencionales son de tipo secuencial, y de acuerdo a ello también ejecutan sus tareas, estando compuestos por un procesador, el cual ejecuta instrucciones y manipula datos que son ingresados a su memoria, lo que hace de este procedimiento uno de tipo secuencial, con un orden de procesamiento predeterminado. Por otro lado las redes neurales tratan la información de forma paralela, no siendo con esto necesario formular instrucciones, sino que el conocimiento se va almacenando en las conexiones entre las unidades componentes de esta red y en su topología particular (Historia de las redes neuronales artificiales, "<http://ingenieria.udea.edu.co/investigacion/mecatronica/mectronics/redes.htm>").

1.6.1.- Redes neuronales biológicas

El cerebro se encuentra formado por células altamente especializadas, unidades funcionales llamadas neuronas, que presentan las siguientes estructuras: dendritas, axón y cuerpo o soma, como lo muestra la figura, y se encuentran formando circuitos entre ellas. Las dendritas corresponden a la principal estructura receptora de la neurona; éstas entregan señales de tipo electroquímico al soma de la célula, el que genera sus respuestas en el cono axónico, y el axón se encarga de transportarlas a otras neuronas.

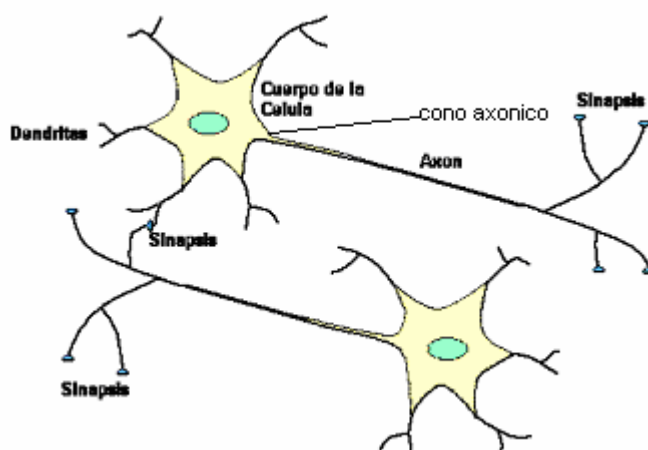


Figura 7.- Esquema de una neurona

Los lugares donde se establece comunicación entre una célula y otra son llamados sinapsis, como se puede apreciar en las figuras 8 y 9. Todas las neuronas transmiten la información de manera similar: ésta viaja por los axones en forma de impulsos electroquímicos denominados potenciales de acción. La membrana en reposo mantiene una diferencia de potencial de unos 70 mV entre su interior y su medio externo, el signo que está dado por la carga negativa del interior de la célula, en contraposición con el medio extracelular, el cual tiene una alta concentración de iones de sodio.

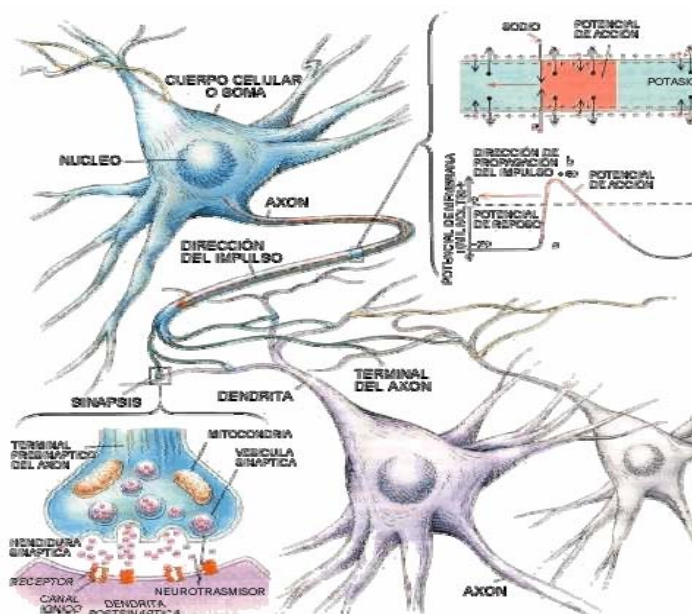


Figura 8.-Comunicación entre neuronas (Acosta 2000)

Los estímulos físicos o químicos que reducen el potencial trans-membrana hacen aumentar la permeabilidad de la membrana, facilitando el flujo de iones sodio hacia el interior de la célula, acentuando con ello la despolarización de la membrana, hasta un punto crítico denominado umbral de excitación. Allí se inicia una realimentación positiva del proceso, que hace que la membrana llegue a invertir su polaridad, con lo que la permeabilidad decae y la membrana retorna a su carga en reposo.

Aunque la señal se transmite por el axón regenerando el potencial de acción a lo largo del camino, para pasar de una neurona a otra la señal siempre está mediada por transmisores químicos llamados neurotransmisores, que son almacenados en

vesículas intracelulares, como lo muestra la figura 9, y que son liberados en la sinapsis y vertidos en una hendidura de aproximadamente 20 nanómetros que separa las dos células. En cuanto éstos son liberados, se enlazan con receptores post-sinápticos donde inducen el cambio en la permeabilidad de la neurona receptora.

Las sinapsis pueden ser excitatorias o inhibitorias, de acuerdo con el neurotransmisor liberado, y son clasificadas de acuerdo con su posición en la neurona de destino, con lo que tenemos los siguientes tipos: axo-dendrítica, axo-somática y axo-axónica.

Algunas de estas redes son determinadas desde el nacimiento del organismo, el que aprende estableciendo nuevas conexiones y haciendo desaparecer otras de forma definitiva; estas conexiones se afianzan y establecen caminos que son reforzados por estímulos frecuentes.

Tomando como ejemplo lo que sucede en el hombre cuando realiza por primera vez alguna acción como comer una fruta determinada, este estímulo establece caminos que lo reconocen; a la larga, si se sigue presentando estos estímulos, los caminos que lo reconocen se tornan tan robustos que no es necesaria una gran manifestación del estímulo para que el sistema sea excitado. Es por ello que el cerebro reconoce fragancias, formas, sabores, etc. de forma independiente, una pequeña excitación de un camino ya reforzado produce una gran reacción del sistema, y el organismo ve representado esto como una imagen de memoria.

En resumen el aprendizaje en estas redes se produce mediante la variabilidad de la actividad sináptica, que a su vez establece y modifica la influencia de unas neuronas sobre otras (peso de la conexión sináptica). De acuerdo a esto se deduce que la arquitectura, la forma o tipo de las conexiones y la efectividad de éstas son en cierto modo el espacio de memoria, mejor dicho el estado de memoria o estado de conocimiento de la red neuronal.

1.6.2.-Redes neuronales artificiales

Características de una neurona artificial

Para comprender de forma simple este tipo de red, es necesario comenzar desde lo más elemental, que en este caso son los nodos.

Una neurona artificial o unidad de proceso se compone específicamente de un conjunto de conexiones de entrada, una función de red que procesa la entrada total combinada de todas las conexiones, una unidad de proceso que contiene y aplica la función de activación, y una salida por donde se transmite la señal generada.

En general son sistemas de procesamiento de información, conformados por elementos simples llamados nodos (neuronas), organizados en capas. Cada nodo está interconectado con otros mediante enlaces de comunicación, cada uno de los cuales tiene asociado un peso o ponderación, que como sucede en la sinapsis biológica contiene una parte del conocimiento de la red sobre un problema determinado (Introducción al tutorial de redes neuronales, “www.gc.ssr.upm.es”).

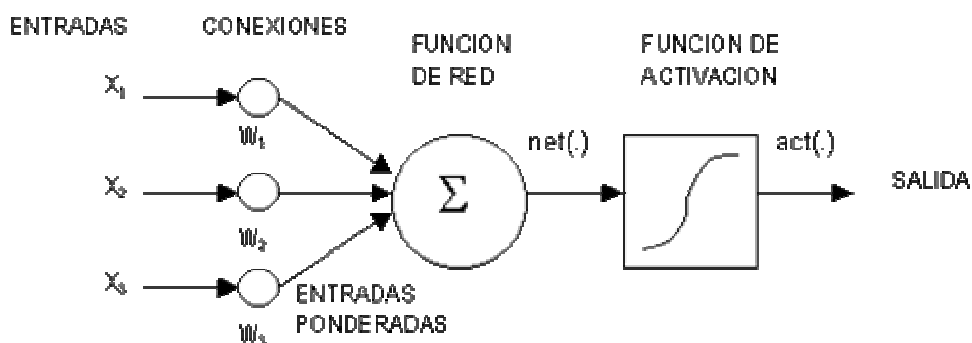


Figura 9.-Esquema de una neurona artificial tipo

Haciendo una analogía con las redes neuronales biológicas, y en función de la figura 9, podemos describir lo siguiente:

- Las X_i corresponden a las entradas del sistema, y representan las señales provenientes de otras neuronas que las emiten, y que son capturadas por las dendritas.
- W_i corresponden a los pesos (del inglés weight), y representan el grado de facilitación de la sinapsis en una neurona biológica; los valores X_i y W_i son números reales.
- La función de red corresponde a la capacidad de la neurona de sumar las entradas ponderadas de las señales, de tipos excitatorias o inhibitorias, logrando con esto un valor de base, es decir el producto de los pesos W_i por las entradas al sistema, X_i . Esto puede escribirse de la siguiente manera:

$$neta = \sum_{i=1}^n W_i X_i = \vec{X} \vec{Y}$$

- La función de activación, como el nombre lo dice, hace el papel correspondiente en la neurona biológica al umbral de activación del sistema, representado artificialmente como una función umbral, o en general funciones no lineales. Se encarga de calcular el estado de la neurona en función de las entradas ponderadas al sistema. La salida del sistema dependerá de si este estado es superior o no a un nivel umbral definido.
- Las conexiones permiten la entrada al sistema, siendo el símil de las sinapsis neuronales. Son de tipo ponderadas y su importancia corresponde al peso de la conexión; sus signos indican el carácter de excitatorio o inhibitorio de la señal.
- La salida del sistema generalmente está dada por una función identidad, que se aplica al valor de activación, y que en las neuronas biológicas corresponde a la tasa de disparo, que recordemos es la frecuencia de generación de los impulsos nerviosos.

Como podemos observar, las RNA presentan una morfología estructural básicamente similar a la de una neurona biológica. Las señales de entrada son de tipo continuo (no

discreto), y cumplen con las características principales de las neuronas, como son las interconexiones y su posterior función de activación. Este procedimiento se muestra en la figura 10.

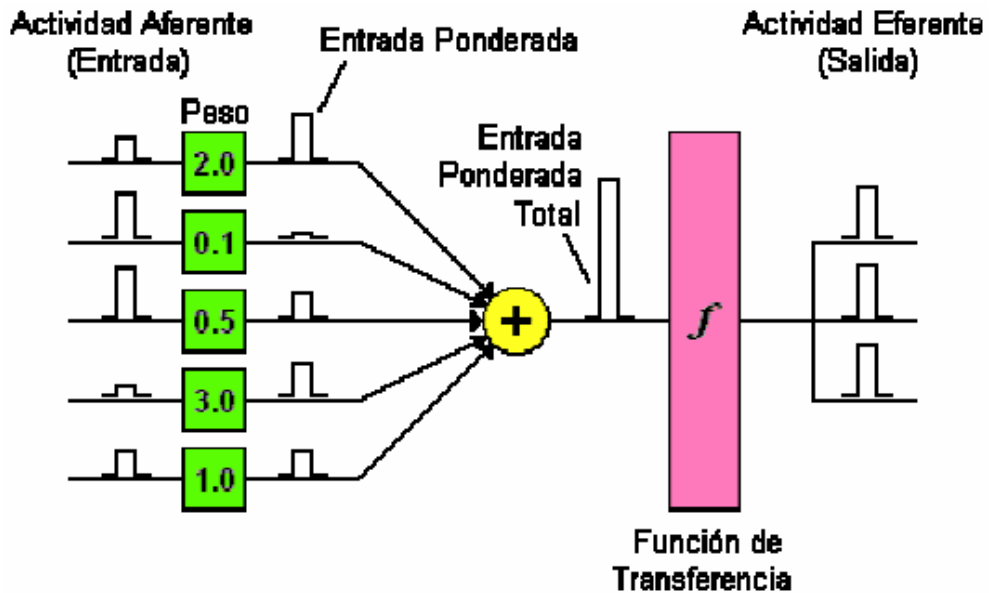


Figura 10.-Proceso efectuado por una red neural

Al alcanzarse el valor de activación, la salida del sistema corresponderá entonces a:

$$x_i = f_i(neta .)$$

f_i corresponde a la función de activación de la neurona, elegida para transformar las entradas netas en el valor de salida; esta función se determina de acuerdo al tipo de red.

Topología de una red neural

Las redes neuronales artificiales (RNA) no poseen la complejidad de una biológica, pero cuentan con las características más generales de una. Son conformadas por sencillas unidades de procesamiento altamente interconectadas, donde las conexiones determinan las funciones y alcances de una red neural. Gracias a esto, la red artificial también cuenta en cierta medida con las ventajas descritas que posee una red neural biológica (Redes neuronales artificiales: introducción y recursos, "<http://www.redes-neuronales.tk>").

La forma de la red determina las funciones y capacidades de ésta, como también para el caso de las RNA. Por lo tanto es importante establecer cómo estarán conectadas unas neuronas con otras, y junto con ello determinar el peso de cada conexión. Lo más usual es disponerlas en forma de capas, que podemos definir como una colección de neuronas. De acuerdo a esto podemos hablar de redes de una, dos o más capas, llamadas también redes multicapas. Considerando el caso propuesto en la figura 12, tendremos las siguientes definiciones para los distintos tipos de capas:

- **Capa de entrada:** actúa como almacén de la información en su forma bruta, y realiza un sencillo pre-proceso que prepara la información para ser recibida por las capas interiores. El pre-proceso consiste en revisar que la información de entrada no sea incompatible con la recepción posterior de la data ¿?
- **Capas intermedias o capas ocultas:** se encargan de extraer, procesar y memorizar la información.
- **Capa de salida:** almacena la información resultante para que pueda ser leída.

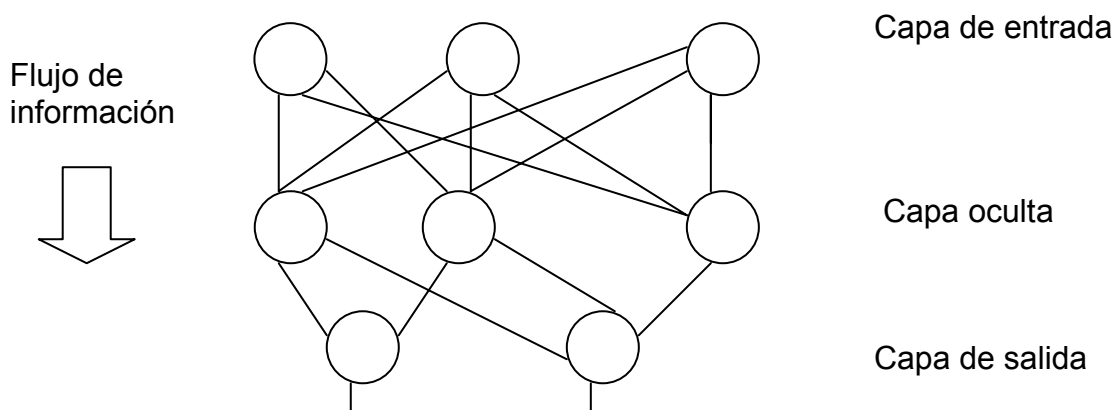


Figura 11.-Diagrama de red en cascada en tres capas

Además del número de capas, podemos clasificar una red neural según la forma en que se conectan unas neuronas con otras. En la figura 11 podemos ver una red de tipo cascada la cual se caracteriza por que la información fluye unidireccionalmente, y no son permitidas en su diseño conexiones entre capas; también son llamadas feed-forward y no-recurrentes.

Por otra parte existen RNA de tipo recurrente, las cuales presentan en su diseño lazos de realimentación; son comúnmente llamadas de feed-back o retroalimentadas, y permiten en su diseño conexiones entre capas o laterales, incluso de una neurona consigo misma. En general puede considerarse que existen todas las conexiones, y las ponderaciones definen la intensidad de cada conexión, o incluso si ella no existe (ponderación muy baja o nula).

Las conexiones entre una capa y otra pueden ser parciales o totales, dependiendo de la cantidad de conexiones establecidas con la capa de destino; usualmente se emplea patrones aleatorios.

Un aspecto no tratado dentro de este punto con respecto a la forma en que las unidades computan su activación con respecto al tiempo, es que en cada ciclo de aprendizaje se calcula la activación de todas las unidades de una capa, o si cada unidad tiene una probabilidad de computar en cada ciclo de aprendizaje. En el primer caso de éstos se habla de redes síncronas y en el segundo de redes asíncronas o probabilísticas (Tutorial sobre redes neuronales artificiales, "[http://www.answermath.com/redesneuronales o neurales.htm](http://www.answermath.com/redesneuronales%20o%20neurales.htm)").

1.7.-Algunos tipos de redes neuronales, aplicaciones generales y en las ciencias ambientales

1.7.1.- Algunos tipos de redes neuronales

Las aplicaciones de las redes neuronales en la ingeniería son múltiples. En general se aplican a problemas que presentan dificultades a la hora de relacionar resultados o cuando los modelos clásicos entregan resultados inciertos. Como se vio en el capítulo anterior, las redes neurales son apropiadas para trabajar en fenómenos con alta incertidumbre.

A continuación se discute algunos tipos de redes neuronales clásicas y luego algunas aplicaciones en las ciencias ambientales.

ADALINE: Contemporánea al trabajo de Frank Rosenblatt (Perceptrón),

ADALINE (ADAptive LInear NEuron), desarrollada por Bernard Widrow y su estudiante Marcian Hoff, introdujeron el modelo de la red y su algoritmo de aprendizaje LMS (Least Mean Square).

La red ADALINE es similar al Perceptrón excepto en su función de transferencia, la cual es de tipo lineal en lugar de un limitador fuerte, aunque presentan la misma limitación al poder resolver sólo problemas linealmente separables. Sin embargo el algoritmo LMS es mucho más potente que la regla de aprendizaje Perceptrón ya que minimiza el error cuadrático medio, característica que lo hace muy práctico en el procesamiento de señales digitales; por ejemplo, las líneas telefónicas de gran distancia utilizan ADALINE para cancelar el ruido inherente a su recorrido.

BACKPROPAGATION o de retropropagación: es el primer algoritmo de aprendizaje desarrollado para redes multicapa.

En general esta regla de aprendizaje general aprovecha la naturaleza paralela de las redes neuronales para acortar el tiempo requerido por un procesador secuencial para determinar la correspondencia entre patrones dados. Además el tiempo de desarrollo de cualquier sistema que se esté tratando de analizar se puede reducir como consecuencia de que la red puede aprender el algoritmo correcto sin que alguien tenga que deducir por anticipado el algoritmo en cuestión.

En resumen, puede llevar a cabo aplicaciones que deban explorar un gran espacio de entrada, o intentan correlacionar todas las permutaciones posibles de un conjunto de patrones muy complejo.

Este sigue siendo el algoritmo de entrenamiento de redes neuronales más rápido, a pesar de su gran esfuerzo computacional, cuando se trabaja con un número moderado de parámetros de entrada en la red. Si el número de parámetros es muy grande, utilizarlo es poco práctico.

Aprendizaje asociativo: ésta es una red auto-supervisada, es decir que no necesita información externa para organizar el peso de sus neuronas; por eso son llamadas capaces de auto organizarse. La red no recibe ninguna información por parte del entorno indicándole si la salida es correcta o no. De esta forma debe encontrar ella sola las características, correlaciones o categorías que se pueda establecer con los datos de entrada.

Este tipo de redes se utiliza en todas las áreas que requieran procesos de caracterización de datos, ya que existen variadas posibilidades para su salida que dependen de su estructura y del algoritmo de aprendizaje empleado.

Algunas de estas redes entregan en su salida un grado de familiaridad o similitud de los datos de entrada con respecto de los de salida; en otros casos podría entregar una categorización de la data, llamada clustering. También permite la codificación de la información de entrada, y algunas redes entregan como salida una disposición geométrica que permite organizar las respuestas en un tipo de mapa (feature mapping).

Con respecto a los algoritmos de aprendizaje, para las redes de aprendizaje no supervisado existen dos tipos, de aprendizaje asociativo y de aprendizaje competitivo.

En el primer caso se intenta medir la familiaridad de los datos, y en el segundo hacer una clasificación de ellos.

Redes recurrentes: Son redes dinámicas, de naturaleza estática como las multicapa, que logran un comportamiento dinámico mediante la realimentación de sus entradas con muestras de salidas anteriores, este tipo de comportamiento hace que las redes recurrentes sean una poderosa herramienta para simular sistemas dinámicos no lineales.

Dentro de ellas encontramos las redes Hopfield, Jordan y Elman, desarrolladas en los 80s, producto del fracaso de las metodologías aplicadas en la inteligencia artificial y la disponibilidad de herramientas computacionales de bajo costo, permitieron el desarrollo de redes neurales recurrentes con el objetivo principal de controlar e identificar sistemas no lineales.

1.7.2.- Algunas aplicaciones de las redes neuronales

Principalmente dedicadas a la ingeniería en los campos de la electricidad, electrónica y las finanzas, desde los 90s se han aplicado con éxito en lo que a modelamiento atmosférico sinóptico y de contaminación se refiere. A continuación se muestra un listado de sus aplicaciones (Tutorial redes neuronales, "<http://ohm.utp.edu.co/neuronales/main.htm>").

- Detección de obstáculos por medio de un robot
- Filtro adaptivo (filtros de ecualización en módems de alta velocidad)
- Procesamiento de señales e imágenes digitales
- Redes neurales para el cálculo eficiente de la densidad del agua de mar o de salinidad de la ecuación de estado de la UNESCO.(Vladimir Krasnopolsky)

- Para el cálculo eficiente de flujo de radiación infrarroja (Vladimir Krasnopolsky)
- Aproximación para la interacción no lineal de los modelos de olas de viento (Vladimir Krasnopolsky)
- Red neuronal artificial para la predicción de PM10 en la ciudad de Milán(M. Cecchetti, G. Corani)
- Predicción de concentraciones de PM2.5 con varias horas de adelanto usando redes neuronales, Santiago de Chile (Universidad de Santiago de Chile)
- Predicción de SO₂ y de la concentración de P.M. en el área de la mina costera de Zonguldak, Turquía.(Lokman Hakan Tecer 2004).
- Análisis de clasificación: Una técnica para estimar los controles meteorológicos sinópticos en la química del aire y de la precipitación - método y usos (Dorling 2003)
- Dióxido de nitrógeno y material particulado en el Reino Unido (Gardner y Dorling 1999)
- Modelo Neuronal Sinérgico de la región metropolitana (Jorge Reyes, departamento de geofísica de la universidad de Santiago de Chile).

2.- Problema

Los modelos de predicción de episodios críticos de contaminación basados en técnicas matemáticas clásicas poseen en general una eficiencia baja en comparación con los modelos desarrollados en redes neurales para predicción meteorológica (Yuval 2000), que como se dijo antes poseen la capacidad de trabajar con datos confusos y modelar procesos dinámicos, como es la naturaleza.

Tomando como ejemplo el modelo Cassmassi de predicción de episodios críticos de contaminación, que según lo expuesto en la evaluación hecha por CONAMA y dada a conocer por medio de su sitio Web, posee una eficiencia total del 71%, y en lo que a emergencias y preemergencias se refiere de un 60%. Si los recursos deben ser dispuestos de la forma más eficiente posible, ya que las molestias que la población y también el sector industrial sufren durante estos episodios derivan en grandes esfuerzos en cuanto a la salud de la población, lo económico y lo administrativo. La autoridad tiene la responsabilidad de contar con herramientas de gestión precisas.

De acuerdo con estos antecedentes, se puede ver la necesidad de encontrar una mejor alternativa de predicción; por otro lado es importante dedicar el tiempo y el trabajo necesarios a investigar, o en el mejor de los casos, a desarrollar sistemas que ayuden a superar los porcentajes de eficiencia de los sistemas que se encuentran en uso.

Una de esas líneas de investigación ha propuesto el usar la teoría de redes neuronales para desarrollar un sistema experto para la predicción de episodios críticos de contaminación atmosférica en la ciudad de Santiago de Chile (Reyes 2000).

El presente trabajo de titulación pretende proponer un modelo que prediga estos episodios críticos de contaminación mediante la aplicación de la teoría de redes neuronales.

3.- Objetivos

3.1.- Objetivos generales

- Aportar al conocimiento de las redes neuronales artificiales como herramienta de predicción de condiciones ambientales.

3.2.- Objetivos específicos

- Definir el tipo de red neural artificial más adecuado para ser aplicado en la predicción de episodios críticos de contaminación atmosférica.
- Proponer un modelo base de predicción de episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado.

4.- Materiales y métodos

Para la realización de este trabajo se optó por integrar variables similares a las del modelo Cassmassi ya que es el de conocimiento más cercano y completo.

4.1.- Elección de los vectores de entrada.

Según lo descrito por Corral 2004, los vectores de entrada para el modelo Cassmassi de regresiones múltiples son los siguientes:

VARIABLES RELACIONADAS CON EMISIONES:

- Día de la semana
- Índice de día feriado/no feriado
- Factor de cambio de concentraciones según día de la semana usado en el modelo de CONAMA.
- Factor de cambio de concentraciones según día de la semana específico para cada estación de monitoreo

VARIABLES DE CALIDAD DEL AIRE (PM10). PARA CADA ESTACIÓN DE MONITOREO:

- Concentración máxima de 24 hrs. observada al día anterior
- Concentración promedio de 24 hrs. observada a las 11 hrs. del día actual.
- Cambios de concentraciones medias de 24 hrs. observadas a las 10 hrs. (en la última hora, últimas 3 hrs., últimas 6 hrs).

VARIABLES METEOROLÓGICAS OBTENIDAS DEL RADIOSONDEO CERCAÑO A SANTIAGO (QUINTERO, SANTO DOMINGO) REALIZADO A LAS 12 UTC DEL DÍA ACTUAL:

- Altura, temperatura, humedad, vientos observados a niveles estándar de presión (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa).
- Altura, presión, temperatura de la base y tope de la capa de inversión térmica cercana a la superficie.

- Variables derivadas de las anteriores (espesores, diferencias con el día anterior)

VARIABLES A PRONOSTICAR PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES MONITORAS:

- Concentración máxima de 24 hrs. de PM10 esperada para el día siguiente.

(Fuente: CONAMA-Cassmassi)

De este conjunto de variables se logró conseguir las correspondientes a radiosondeo de la estación Santo Domingo completas, descargadas vía Internet del sitio de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Wyoming, correspondientes al año 2002, y de material particulado completo descargado del sitio de CONAMA región metropolitana, correspondientes al año 2002.

Los datos correspondientes a radiosondas consisten en una tabla de datos que contiene las siguientes variables, a presiones atmosféricas estándar de muestreo, divididas en dos muestreos diarios:

- Altura (HGHT)(m)
- Presión atmosférica estándar (PRES) (hPa)
- Temperatura (TEMP) (C°)
- Temperatura del punto de rocío (DWPT) (C°)
- Humedad relativa (RELH) (%)
- Capa de mezcla principal (MIXR) (g/Kg)
- Dirección del viento en grados (DRCT) (deg)
- Velocidad del viento (SKNT) (nudos)
- Temperatura potencial (THTA) (K)
- Temperatura equivalente (THTE) (K)
- Temperatura virtual (THTV) (K)

Con respecto de los datos de material particulado, éstos son presentados en tres tablas que contienen muestras por hora por estación de monitoreo, que se describen a continuación:

- Hora (inicio del periodo). Siempre en horario de invierno (GMT-4).

- Concentración horaria de material particulado en suspensión. Fracción MP10 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$).
- Concentración promedio móvil de últimas 24 horas de MP10 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$).
- Índice ICAP correspondiente a la concentración promedio móvil de 24 horas de MP10 (adimensional).

Las estaciones de muestreo son:

- Providencia (B)
- Independencia (F)
- La Florida (L)
- Las Condes (M)
- Santiago (parque O'higgins) (N)
- Pudahuel (O)
- Cerrillos (P)
- El Bosque (Q)
- La Dehesa (J)
- Cerro Navia (R)

Estos datos fueron estandarizados en tablas diarias, las cuales contienen las dos muestras diarias obtenidas de radiosonda y los tres grupos de datos correspondientes al muestreo de material particulado.

4.2.- Implementación del modelo

A continuación se procedió a la elección de la plataforma para la implementación de la red neural; para esto se cuenta con variadas alternativas de programas de computación que ayudan en el diseño de la red neural. Dentro de éstos, los más comunes son los toolbox de Matlab, Excel y programas específicos de redes neuronales. En este caso se optó por estos últimos por las razones detalladas más adelante. Además se decidió por una arquitectura de red que es la multicapa de

retropopagación, lo que permite la retroalimentación del sistema y es la más citada en la bibliografía revisada (M. Cecchetti 2001).

Primero, estos programas permiten al usuario dedicarse a la correcta preparación de la data de entrenamiento, ya que el programa permite programar la red neural de acuerdo a las especificaciones que se haga.

Segundo, se tiene a disposición un software específico para redes neuronales que fue adquirido por el profesor guía. Pagadas las licencias de este programa, podemos hacer uso y publicar la procedencia del código base de la red. El programa es EasyNN Plus, y lo describimos a continuación.

EasyNN Plus es un software auxiliar para el desarrollo de redes neuronales en la plataforma Microsoft Windows. Permite generar redes neuronales de múltiples capas a partir de archivos o tablas de datos y de los criterios especificados por el usuario. Datos de tipos numérico, texto, imagen o sus combinaciones pueden ser utilizados para crear las redes neuronales. Estas pueden después ser entrenadas, validadas y consultadas. Todos los diagramas, gráficos y datos de entrada-salida producidos por las redes neuronales pueden ser exhibidos. Los gráficos, las tablas y los diagramas de la red se actualizan dinámicamente, así que se puede ver cómo todo está trabajando. Las redes neuronales producidas con EasyNN plus se pueden utilizar para el análisis de datos, la predicción, el pronóstico, la clasificación y la proyección de series de tiempo.

Con respecto a los datos se desarrolló una base de datos con los datos de radiosonda, los que se hizo concordar con el valor máximo de concentración de material particulado, obtenido del intervalo de tiempo comprendido entre la hora de muestra de radiosonda correspondiente y la muestra de radiosonda posterior.

Por otro lado, Corral M 2000 y Reyes A 2000, indican coincidentemente que para la modelación del material particulado con la data de las estaciones de la red MACAM-2 es necesario verificar que existe una diferencia substancial en los períodos de muestreo, siendo el mas idóneo para ésto el correspondiente a la época de otoño-invierno, ya que en este periodo la data es más uniforme y se presentan episodios de contaminación críticos, los cuales son el objetivo de la modelación. En general

proponen que si se utilizara toda la data disponible, la curva generada con ella presentaría un margen de error mucho mayor; incluso en el trabajo de Reyes 2000, sólo se utilizaron datos correspondientes a una estación de monitoreo, y en el caso de Cassmassi sólo un periodo del año y para cada estación por separado, observación que se adoptó en este trabajo.

Para el ingreso de datos a la plataforma, éstos se distribuyeron en datos de entrada y de salida y separados en datos de entrenamiento y de consulta, los datos de entrada son los siguientes:

- Altura (HGHT)(m)
- Presión atmosférica estándar (PRES) (hPa)
- Temperatura (TEMP) (C°)
- Temperatura del punto de rocío (DWPT) (C°)
- Humedad relativa (RELH) (%)
- Capa de mezcla principal(MIXR) (g/Kg)
- Dirección del viento en grados (DRCT) (deg)
- Velocidad del viento (SKNT) (nudos)
- Temperatura potencial (THTA) (K)
- Temperatura equivalente (THTE) (K)
- Temperatura virtual (THTV) (K)
- Concentración horaria de material particulado en suspensión. Fracción MP10 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$).

El vector de salida representa la concentración máxima de material particulado en suspensión. Fracción MP10 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$).

En este caso se utilizó solo la data proveniente de la estación Providencia (B), ya que esta estación es la que proporcionó la data más completa. Además, cada estación posee condiciones de distribución de datos diferente, por lo tanto se hace necesario llevar a cabo el procedimiento descrito por separado para cada una de ellas.

Estos datos serán importados al programa EasyNN plus, y con esta configuración el programa generará una capa oculta que realizará la asociación de los datos de entrada y calculará la relación que existe entre estos y los datos de salida.

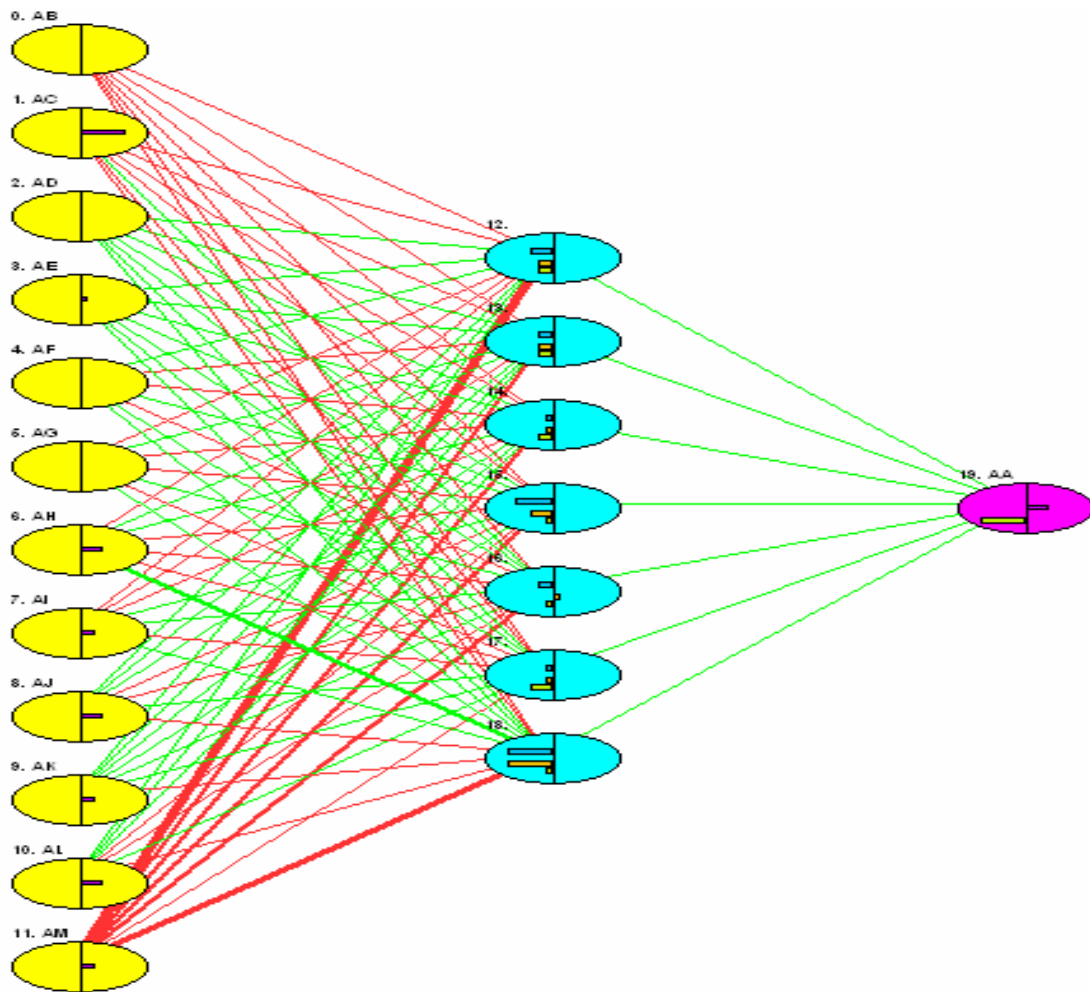
Las especificaciones dadas a la red neuronal fueron las siguientes:

- Columnas de entrada: 12
- Columnas de salida: 1
- Nodos de la capa oculta: 8
- Columnas de consulta: 1
- Tasa de aprendizaje: 0.6
- Error establecido del proceso de aprendizaje: 0.05

Por otra parte, para evaluar el desempeño de la red neuronal se realizará tres tipos de análisis. El primero de ellos es el de disminución del error normalizado del proceso de aprendizaje, el análisis de importancia de cada entrada y el análisis de sensibilidad de las entradas, el cual es una medida de cómo la salida varía en función de la asociación de las entradas. Este es un método para medir las relaciones causa-efecto entre las salidas y las entradas.

5.- Resultados

Los resultados de la modelación con los datos originales entregan una base preliminar del modelo ideal a desarrollar con redes neuronales. El procedimiento de implementación del modelo produjo una red neuronal de retropropagación; a continuación se muestra la figura que describe la red neuronal generada.



AB: Presión atmosférica; AC: Altura; AD: Temperatura; AE: Temperatura del punto de rocío; AF: Humedad relativa
AG: Capa de mezcla principal; AH: Dirección del viento; AI: Velocidad del viento; AJ: Temperatura potencial
AK: Temperatura equivalente; AL: Temperatura virtual; AM: Concentración de MP10

Figura 12.-Esquema de la red neuronal generada por el programa

En esta figura las líneas rojas corresponden a pesos negativos y las verdes a positivos, es decir el efecto que tiene una neurona en la otra, no significando esto un perjuicio contra el proceso de aprendizaje si no la forma que tiene de relacionarse con las neuronas siguientes. Del mismo modo las barras que aparecen dentro de las neuronas indican niveles de entradas (de color azul), activación (color púrpura), heterogeneidad (color café) y error (color verde).

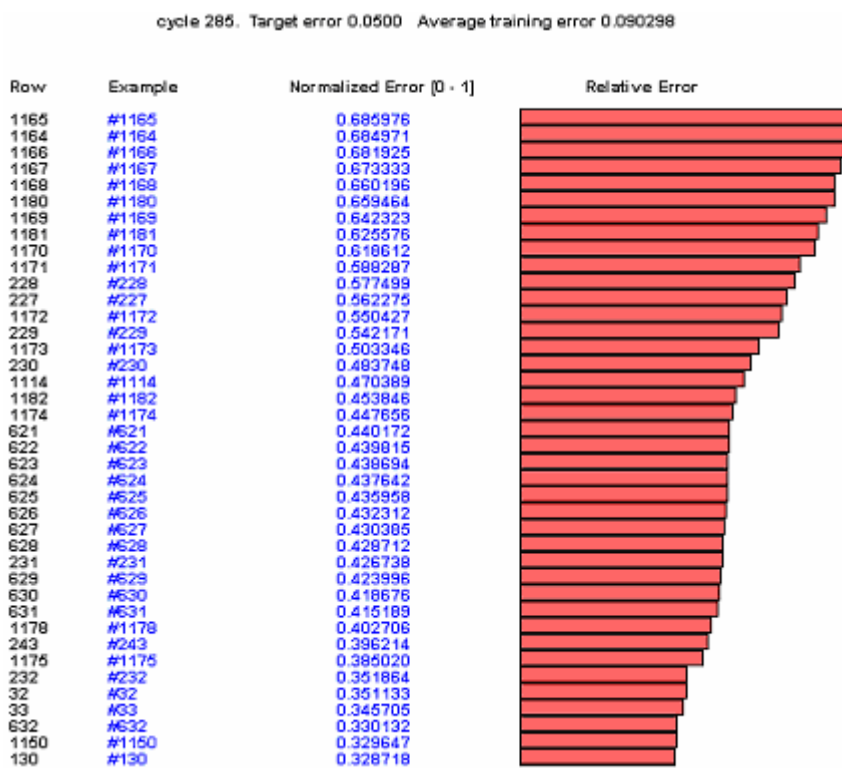


Figura 13.-Disminución del error normalizado del proceso de aprendizaje

En esta figura se puede visualizar la magnitud de la disminución del error normalizado, a medida que la información recorre la red neuronal en cada ciclo de aprendizaje. Este proceso de aprendizaje cíclico se preocupa de ir minimizando sus errores de predicción en función de su concordancia con el dato de salida.

A continuación se entrega un análisis de la importancia que tiene cada vector de entrada para predecir el valor de salida; esto se muestra en la figura que sigue.

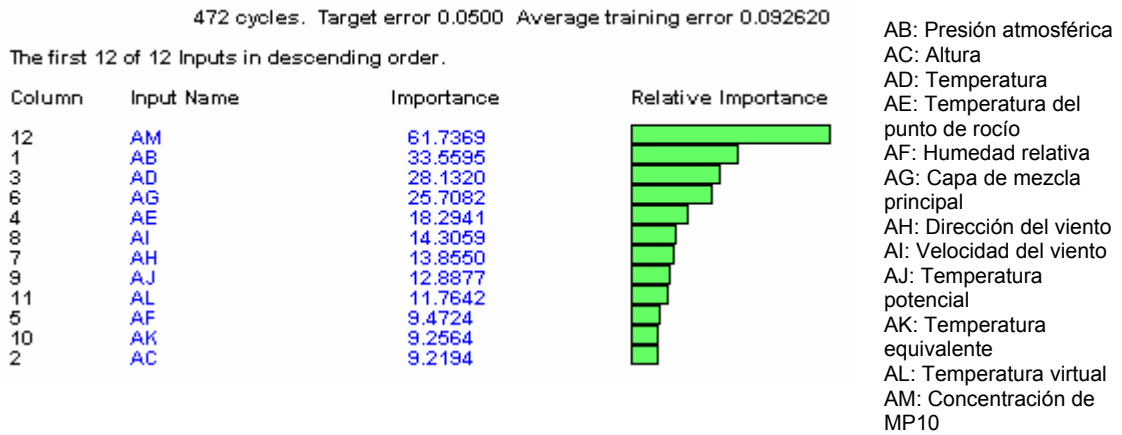


Figura 14.-Importancia relativa de las entradas

Además se efectuó un análisis de sensibilidad, resultados que se muestran en la figura siguiente.

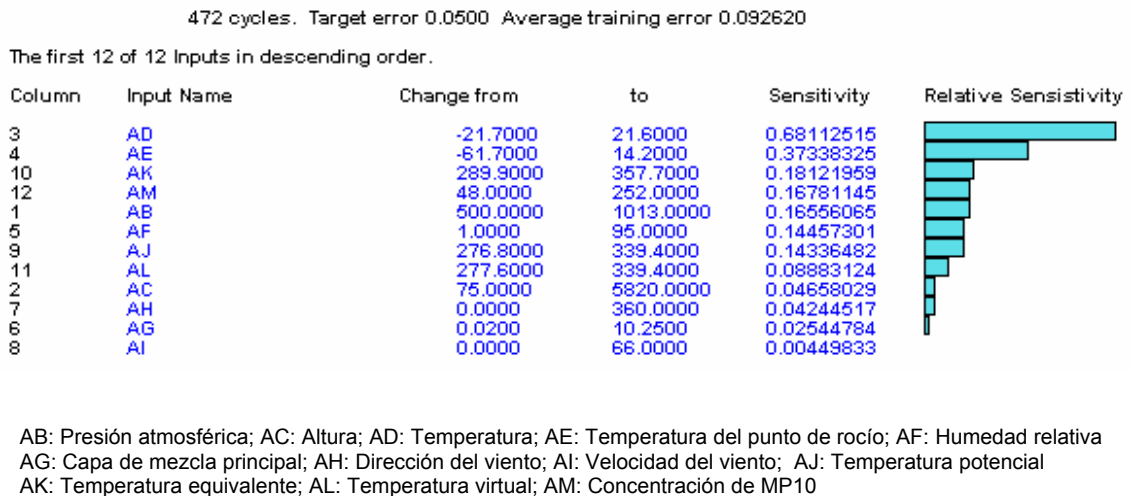


Figura 15.-Análisis de sensibilidad de las entradas con respecto de la salida

Para comprobar la capacidad de predicción se ha construido una tabla de consultas para la red, que consiste en datos tomados de forma aleatoria de los datos de muestra, para los cuales ya se tiene resultados; a continuación podemos ver la tabla que resume estos resultados.

Tabla 4.5.-Datos consultados para el cálculo del error de la predicción

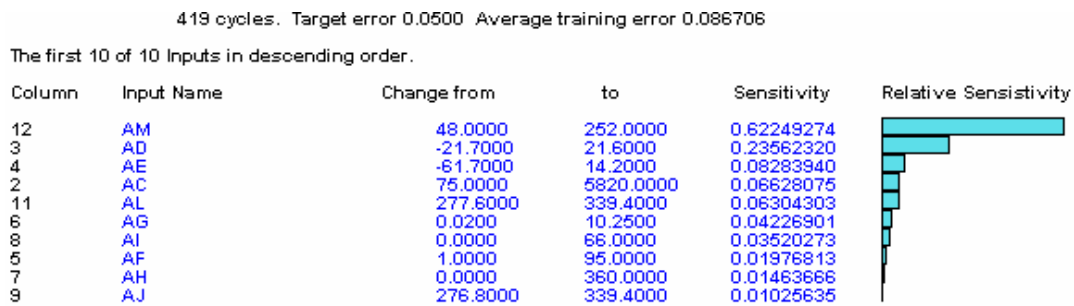
Predicción	Datos reales	Diferencia	Porcentaje de error
186,6	169	17,6	10,4
180,65	169	11,5	6,8
242,39	60	182,39	303,98
181,2	140	41,2	29,4
181,67	129	52,67	40,8
163,58	142	21,58	15,2
181,67	169	12,67	7,5
182,18	169	13,18	7,8
185,21	169	16,21	9,59
175,48	169	6,48	3,83
173,28	169	4,28	2,53
175,15	169	6,15	3,63
172,62	169	3,62	2,14
173,92	169	4,92	2,91
174,31	169	5,31	3,14
161,41	156	5,41	3,47
198	85	113	132,94
186,95	55	131,95	239,9
249,81	101	148,81	147,34
199,26	190	9,26	4,87
236,86	152	84,86	55,83
191,96	159	32,96	20,73

De este grupo de datos se puede calcular un error promedio para las predicciones efectuadas por el modelo, y este asciende a un 47,94%, de la misma forma se calcula la eficiencia del modelo en un 52,06%.

A continuación se procedió a retirar las columnas que presentaron una menor influencia en la salida y volver a entrenar la red resultante. De la misma forma anteriormente descrita, esto se traduce en excluir dos columnas que son las correspondientes a temperatura equivalente y presión atmosférica, lo que arrojó los siguientes resultados:



Figura 16.-Importancia relativa de las entradas.



AB: Presión atmosférica; AC: Altura; AD: Temperatura; AE: Temperatura del punto de rocío; AF: Humedad relativa
AG: Capa de mezcla principal; AH: Dirección del viento; AI: Velocidad del viento; AJ: Temperatura potencial
AK: Temperatura equivalente; AL: Temperatura virtual; AM: Concentración de MP10

Figura 17.-Análisis de sensibilidad de las entradas con respecto de la salida.

Para comprobar los resultados de la predicción se evaluó con la tabla de consultas anteriormente mostrada y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 4.6.-Datos consultados para el calculo del error de la predicción

Predicción	Dato real	Diferencia	Porcentaje de error
174,49	169	5,49	3,25
171,4	169	2,4	1,42
236,61	60	176,61	294,35
237,88	140	97,88	69,91
174,15	129	45,15	35
155,46	142	13,46	9,48
154,38	169	14,62	8,65
171,45	169	2,45	1,45
172,47	169	3,47	2,05
162,92	169	6,08	3,6
161,72	169	7,28	4,3
162,72	169	6,28	3,71
163,76	169	5,24	3,1
170,02	169	1,02	0,6
171,42	169	2,42	1,43
154,76	156	1,24	0,79
201,72	85	116,72	137
183,37	55	128,37	233,4
248,29	101	147,29	145,83
190,61	190	0,61	0,32
233,6	152	8,16	5,37
192,01	159	33,01	20,76

De la misma forma anteriormente descrita se calculó la magnitud del error promedio de las predicciones, ahora sin las columnas de menor relevancia, y este asciende a un 44,81%, por lo tanto la eficiencia de las predicciones aumenta a un 55,19%

Los resultados de la modelación con los datos originales entregan una base preliminar del modelo ideal a desarrollar con redes neuronales, esto es visible desde el punto de vista del error: podemos ver que aunque su confiabilidad es en general de un 52.06 %, estos datos como sabemos son escogidos al azar, pero si los analizamos podemos ver que para los datos de material particulado sobre 120 ug/m^3 aproximadamente, el porcentaje de eficiencia es mucho mayor, ésto lo podemos ver en las tablas de consultas para la predicción 4.5 y 4.6, las cuales muestran 22 consultas de las que 3 valores son menores a 120 ug/m^3 , y muestran claramente una diferencia mucho

menor entre el valor predicho y el real. A continuación se muestra el análisis de error en la predicción excluyendo los valores menores a 120 ug/m³.

Los porcentajes de error para datos altos de material particulado, a continuación:

Tabla 4.7.-Datos consultados para el cálculo del error de la predicción

Predicción	Dato real	Diferencia	Porcentaje de error
186,6	169	17,6	10,4
180,65	169	11,5	6,8
181,2	140	41,2	29,4
181,67	129	52,67	40,8
163,58	142	21,58	15,2
181,67	169	12,67	7,5
182,18	169	13,18	7,8
185,21	169	16,21	9,59
175,48	169	6,48	3,83
173,28	169	4,28	2,53
175,15	169	6,15	3,63
172,62	169	3,62	2,14
173,92	169	4,92	2,91
174,31	169	5,31	3,14
161,41	156	5,41	3,47
199,26	190	9,26	4,87
236,86	152	84,86	55,83
191,96	159	32,96	20,73

Podemos ver que el error promedio de las consultas para valores de material particulado mayor a 120 ug/m³ = 12,81%, por consiguiente la eficiencia aumenta a un 87,19%.

En la segunda prueba de los datos, donde se excluyó del cálculo las columnas que resultaron ser de menor relevancia y que interferían con el proceso de aprendizaje, podemos ver que el comportamiento de la red se mantiene, fenómeno previsible ya que la estructura general de la red no se ha modificado, pero podemos además observar que el error en las consultas ha disminuido en forma significativa y la

confiabilidad del modelo ha subido a un 55,19 %; la diferencia es de un 3,13 % sólo con el pequeño cambio en los datos.

A continuación podemos ver cómo los datos de consulta se han acercado a los reales con este arreglo, y tomando el error sólo para los datos mayores de material particulado:

Tabla 4.8.-Datos consultados para el calculo del error de la predicción

Predicción	Dato real	Diferencia	Porcentaje de error
174,49	169	5,49	3,25
171,4	169	2,4	1,42
237,88	140	97,88	69,91
174,15	129	45,15	35
155,46	142	13,46	9,48
154,38	169	14,62	8,65
171,45	169	2,45	1,45
172,47	169	3,47	2,05
162,92	169	6,08	3,6
161,72	169	7,28	4,3
162,72	169	6,28	3,71
163,76	169	5,24	3,1
170,02	169	1,02	0,6
171,42	169	2,42	1,43
154,76	156	1,24	0,79
190,61	190	0,61	0,32
233,6	152	8,16	5,37
192,01	159	33,01	20,76

En esta prueba el error promedio de las consultas para valores de material particulado mayor a $120 \text{ ug/m}^3 = 9.73 \%$, con lo que la eficiencia aumenta a un 90,27%.

En resumen podemos ver que en las dos pruebas completas se muestra un comportamiento de la red que permite la predicción de los datos necesarios; en adición la red no sólo puede hacer predicciones de material particulado sino también de cualquiera de los otros parámetros componentes de la tabla.

6.-Discusión

Estos resultados son previsibles desde el punto de vista de la falta de datos disponibles para asociar en la red, ya que sólo se le ha proporcionado datos de las condiciones de estado de la atmósfera; como sabemos no hemos integrado datos de topografía, pues no están disponibles las fuentes de material particulado ni menos de su comportamiento para esta zona geográfica (estos datos son de alto costo de adquisición), o por cuestiones de tiempo son de difícil estandarización. Son determinantes para el análisis a nivel zonal, y respaldados en esto podemos afirmar que el modelo es muy posible de refinar.

Dado que esta red tiende a evaluar el potencial de la atmósfera para evitar la dispersión de los contaminantes, se hace necesario integrar variables que tengan que ver con las fuentes de material particulado para aumentar el porcentaje de eficiencia de este modelo, el cual se presume aumentará de manera significativa. Igualmente podemos ver en los distintos análisis de importancia de las entradas del sistema, efectuados en las distintas etapas, que el vector correspondiente a material particulado es el de mayor importancia, pues de esto se puede deducir que si se integrara a las entradas vectores que se refieran a las fuentes de material particulado y que permitan detallar las condiciones en las que se logran las concentraciones, se podría obtener aun mayores porcentajes de eficiencia.

Desde el punto de vista de la cantidad de datos, si se contara con una base de datos de material particulado y sus fuentes de mayor extensión temporal, beneficiaría al modelo, pues este también lograría representar las posibles variaciones interanuales del fenómeno, con lo que sería posible hacer proyecciones para medidas de mitigación y el impacto que generaría un nuevo proyecto; en resumen sería importante contar con un inventario de emisiones gaseosas de la zona a la que se limite el modelo.

El resultado de las consultas y con respecto del porcentaje de eficiencia, muestra que el comportamiento de la red neuronal es de la forma de una función discontinua dependiente del potencial de la atmósfera para contener material particulado. Además esta función tiende a evaluar de forma más certera valores de entrada de material

particulado cercanos a 130 ug/m^3 , este valor de concentración de material particulado, correspondiente al valor más probable de concentración a encontrar en el grupo de muestras. De esto podemos decir que como se ha elegido la predicción de la mayor concentración posible de material particulado la red reaccionó analizando las condiciones de la atmósfera requeridas para no permitir la dispersión de los contaminantes, pues se ve en los resultados, que los valores predichos de material particulado en los rangos bajos, es decir entre 0 y 130 ug/m^3 , son siempre superiores y son mayores mientras más bajo sea el valor de material particulado de entrada.

Este aspecto puede ser solucionado mediante la construcción de una segunda red neuronal, la cual tenga los mismos vectores de entrada de la anterior, pero en la que el vector de salida sea el valor mínimo de concentración de material particulado correspondiente al bloque horario siguiente, luego de ello desarrollar una tercera red neuronal que efectúe el análisis de las salidas de las dos redes neuronales anteriores, y que produzca un vector de salida que corresponda al dato real de concentración de material particulado encontrado para ese periodo de tiempo. Esto probablemente ayudaría a optimizar el porcentaje de eficiencia del pronóstico (Calvo 2000).

Para que este modelo deje de ser general sólo es necesario integrar variables geográfico-ambientales que representen las condiciones dinámicas de la atmósfera zonal, como por ejemplo para la ciudad de Valparaíso sería necesario contar con la relación entre el océano pacífico y el continente.

Con respecto de la capacidad de las redes neuronales de disminuir el error de sus predicciones por medio del proceso de aprendizaje, es interesante mencionar que esta capacidad puede ser integrada a un modelo clásico para disminuir su error, usando una red neuronal de retropropagación como un pos procesamiento de la da, por ejemplo se podría utilizar los resultados de un modelo como SCREEN 3 como entrada y como salida los datos entregados por estaciones de monitoreo atmosférico como sucede en el caso de la fundición Ventanas, ésto podría permitir obtener resultados con mayor eficiencia.

Uno de los problemas encontrados al utilizar redes neuronales para la predicción meteorológica y de material particulado es con respecto de la elección y estandarización de los datos de entrenamiento. El tiempo invertido en hacer esta

estandarización de la data en un formato legible por el programa es alto, aunque no corresponde aquí hacer una comparación con el tiempo requerido para otros métodos, ya que no es objeto de este trabajo.

7.- Conclusiones

- Se ha comprobado que una red neuronal es capaz de predecir la contaminación con un buen nivel de confiabilidad (55,19%) y para datos de entrada superiores a 120 ug/m^3 de un 90,27% y anticipación (medio día). Cabe recordar que la confiabilidad del primer predictor de CONAMA era del 59%, mientras que la del segundo (elaborado por el experto estadounidense Joseph Cassmassi) es del 78%, y aunque nuestros porcentajes, en el primer caso, sean más bajos del punto de vista de la eficiencia y de cobertura en el segundo caso, ésto es compensado por la magnitud de la inversión en tiempo y dinero hecho en el proceso de elaboración y las posibilidades de mejora que tiene el modelo.
- De acuerdo a lo visto en bibliografía, y lo analizado en forma práctica, las redes neuronales son muy factibles de ser incorporadas a las ciencias ambientales como herramienta de predicción, principalmente por la configuración de multicapa de retropropagación.
- Las redes neuronales cuentan con características que las hacen más idóneas que los métodos clásicos de modelación, desde el punto de vista técnico, para el proceso de predicción de contaminación: bajo costo, interfaces de usuario muy amigables y ductilidad para la incorporación y exclusión de variables de distinto tipo.
- Una red neuronal es capaz de deducir el estado meteorológico aproximado a partir de la serie de datos. De no ser así, los valores habrían sido inaceptables, lo que nos estaría indicando que los parámetros de entrada eran insuficientes o incorrectos para modelar el fenómeno.
- Se propone continuar con las pruebas de este modelo en lo posible agregando las variables faltantes detectadas, pues tiene altas probabilidades de ser mejorado con estas observaciones. La condición fundamental es poder contar con datos suficientes respecto a las diferentes variables que afectan al proceso, y que sean en lo posibles completos y correctos.

8.- Referencias bibliográficas

- 1) Acosta M, Zuluaga C (2000) "Tutorial sobre redes neuronales aplicadas en ingeniería eléctrica y su implementación en un sitio Web". Universidad tecnológica de Pereira, Colombia.
- 2) Calvo, R.A., H.D. Navone, and H.A. Ceccatto, (2000), "Neural network analysis of time series: Applications to climatic data, in Southern Hemisphere paleo and neoclimates", P.P. Smolka and W. Volkheimer, Editors. Springer: New York. p. 7-16.
- 3) Centro nacional del medio ambiente, (2001), "Análisis comparativo de condiciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación atmosférica, en Santiago, durante los periodos de otoño e invierno 1997, 1998, 1999 y 2000", programa de meteorología y calidad del aire
- 4) Corral M (2004) "Estado la contaminación atmosférica en la región metropolitana de Chile y aplicación del modelo Cassmassi, de predicción de episodios críticos de contaminación", exposición oral, Universidad de Valparaíso.
- 5) Decreto supremo N° 131 declaración de zona saturada y latente a la región metropolitana Republica de Chile, 1996.
- 6) Dorling, S.R., Foxall, R.J., Mandic, D.P. and Cawley, G.C. (2003), "Maximum-likelihood cost functions for neural network models of air quality data". Atmospheric Environment 37, 3435-3443.
- 7) Environmental Protection agency, USA, "Guideline on Air Quality Models", EPA 2000.
- 8) Gardner, M.W. & Dorling, S.R. (1999), "Neural network modelling and prediction of hourly NO_x and NO₂ concentrations in urban air in London" Atmospheric Environment 33(5), 709-719.

- 9) M. Cecchetti, G. Corani , G. Guariso (2001), "Artificial neural networks prediction of PM10 in the Milan área" departamento de informática del instituto politécnico de Milán.
- 10) Nunnari, G., Dorling, S., Schlink, U., Cawley, G., Foxall, R. and Chatterton, T. (2004) Modelling SO₂ Concentration at a Point with Statistical Approaches. Environmental Modelling and Software 19, pp887-905.
- 11) Lokman Hakan Tecer (2004), "Predicción de SO₂ y PM en el área costera minera de Zonguldak, Turquía", Universidad de Karaelmas, departamento de ingeniería ambiental, Turquía
- 12) Ley 19.300 de bases generales del medio ambiente Republica de Chile, 9 de marzo de 1994.
- 13) Plan de prevención y descontaminación de la región metropolitana Republica de Chile, comisión nacional del medio ambiente, 1997.
- 14) Vladimir M. Krasnopolsky, Helmut Schiller (2002), "Some Neural Network Applications in Environmental Sciences Forward and Inverse Problems in Geophysical Remote Measurements", science applications international corporation at national centers for environmental prediction, NWS/NOAA, USA.

Visitas Internet, jueves 14 de abril de 2005

- 1) Comisión nacional del medio ambiente de Chile CONAMA, www.conama.cl
- 2) Historia de las redes neuronales artificiales,
<http://ingenieria.udea.edu.co/investigacion/mecatronica/mectronics/redes.htm>

- 3) Introducción al tutorial de redes neuronales, www.gc.ssr.upm.es/inves/neural/ann2/anntutor.htm
- 4) Mario Gómez Martínez, 1999,
www.iiia.csic.es/~mario/rna/tutorial/RNA_intro.html
- 5) Redes Neuronales Artificiales: Introducción y recursos, <http://www.redes-neuronales.tk/>
- 6) Servicio de salud metropolitano del ambiente SESMA, www.sesma.cl
- 7) Tutorial sobre Redes Neuronales artificiales,
http://www.answermath.com/redes_neuronales_o_neurales.htm
- 8) Tutorial Redes Neuronales, <http://ohm.utp.edu.co/neuronales/main.htm>