

EVALUACION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LIMA-CALLAO/JULIO-2004

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	2
II.	CUENCA ATMOSFERICA DE LIMA	6
III.	METODOLOGÍA	8
IV.	RESULTADOS	10
	4.1 Distribución espacial de contaminantes sólidos sedimentables durante el mes de Julio del 2004 en la Zona Metropolitana de Lima- Callao.	10
	4.2 Comportamiento del Ozono Troposférico durante enero-mayo 2004	12
	4.3 Condiciones Meteorológicas durante el mes de Julio 2004	18
V.	CONCLUSIONES	24

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Relación entre partículas y ondas electromagnéticas	4
Fig. 2	Procesos físicos entre la luz visible y las partículas	5
Fig. 3	Distribución del tamaño de partículas vs. cantidad de luz dispersada por el tamaño.	5
Fig. 4	Red de estaciones meteorológicas y de contaminantes sólidos sedimentables en la Zona Metropolitana de Lima-Callao	9
Fig. 5	Totales mensuales de contaminantes sólidos sedimentables registrados durante el mes de Julio 2004 en Lima-Callao	10
Fig. 6	Distribución espacial de la concentración de sólidos sedimentables en Lima-Callao durante el mes de Julio del 2004	11
Fig. 7	Máximo diario de Ozono en Jesús María	12
Fig. 8	Máximo 8 horas en Jesús María	13
Fig. 9	Correlaciones entre Ozono 1 h yvs 8 h (mensual)	14
Fig. 10	Rosas de concentración mensual para la estación de C.A.-SENAMHI	15
Fig. 11	Relación Ozono Troposférico vs. Radiación Total	16
Fig. 12	Relación Ozono Troposférico vs. Velocidad de viento	17
Fig. 13	Ozono Troposférico promedio y estimado	17
Fig. 14	Variación horaria de la temperatura y humedad relativa durante el mes de Julio del 2004 en el Callao y La Molina	19
Fig. 15a.	Variación diaria de la temperatura y humedad relativa durante el mes de Julio del 2004 en Comas y Jesús María	19
Fig. 15b.	Variación diaria de la temperatura y humedad relativa durante el mes de Julio del 2004 en el Santiago de Surco y Chorrillos	20
Fig. 16	Rosas de viento Diurnas	21
Fig. 17	Rosas de viento Nocturnas	22
Fig. 18	Radiosondaje mensual promedio mes de Julio	23

INDICE DE CUADROS

Cuadro N°1	Características de la Capa de Inversión Térmica en la Costa Central de Perú	23
------------	---	----

EVALUACION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LIMA-CALLAO/JULIO-2004

1. Introducción

Durante el mes de julio, el SENAMHI a través de la Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales, como institución coordinadora del Grupo de Trabajo para la Implementación de la red de monitoreo en la Zona Metropolitana de Lima-Callao; en reuniones del Grupo de Trabajo se decidió a través del Comité de Aire Limpio encargar a la empresa consultora P.A. Consulting la elaboración del Estudio sobre la Administración y Sostenibilidad de la Red de monitoreo y el Sistema de Pronóstico de la Calidad del Aire para Lima-Callao. Como parte de este estudio, la empresa en estrecha coordinación con el Grupo de Trabajo se encuentra en pleno proceso de evaluación de las capacidades y fortalezas de las instituciones como SENAMHI, DIGESA y las Municipalidades de Lima y Callao que puedan asumir tal responsabilidad.

Relacionado a los asuntos de investigación en calidad del aire, el presente Boletín muestra los resultados del monitoreo de los Contaminantes Sólidos Sedimentables (CSS) para el mes de julio 2004 y el análisis de las concentraciones de Ozono Troposférico (O_3) de la estación de calidad de Aire con Sede en el SENAMHI durante el período de enero a mayo del presente año. A continuación se desarrollará aspectos preliminares asociados a la problemática de la reducción de la visibilidad por el material particulado y el comportamiento del Ozono troposférico en las capas bajas de la atmósfera.

Se sabe que la capacidad para poder apreciar un objeto está limitada en la atmósfera libre (sin contaminar) por la dispersión de la luz de parte de moléculas que componen la atmósfera. Estas moléculas son primariamente el Nitrógeno y el Oxígeno, conjuntamente con algunos gases traza tales como el Argón y el Hidrógeno, aerosoles como gotas de agua, polvo arrastrado por el viento y aerosoles secundarios que son resultado de reacciones atmosféricas de emisiones de gases precursores.

Es por todos conocido que la contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales más severos que afecta la calidad de vida de las poblaciones y por ello está siendo objeto de innumerables estudios. Uno de los aspectos de sumo interés que ha sido observado es el concerniente a la reducción de la visibilidad. De hecho, el incremento en la cantidad de partículas finas y gases en la atmósfera está asociado con reducciones en la capacidad del ojo humano para ver a través de la atmósfera o identificar un objeto a distancia (Health Canadá, 2004- On Line).

Seinfeld (1978) define la visibilidad como “la mayor distancia a la cual es posible ver e identificar a) un objeto oscuro prominente durante el día y b) una fuente de luz difusa y de predominante intensidad durante la noche”. De acuerdo a Godish (1997), “la visibilidad implica que un objeto pueda ser visto por un observador, pero esa habilidad para distinguirlo con claridad es relativa...” y también considera que “...la visibilidad es la medida de la dispersión horizontal de la luz y la turbidez es la medida de la extinción vertical de la misma”. En la guía meteorológica del SENAMHI (On line) es definida como “la distancia horizontal máxima a la que un

observador puede distinguir claramente algunos objetos de referencia en el horizonte". La visibilidad puede ser expresada en millas o en kilómetros, y suele ser reportada hasta las 15 millas (25 km).

La percepción humana para distinguir una escena u objetos, es influenciada por los factores físicos de la atmósfera, por los incorporados como resultado de las actividades antropogénicas y por aquellos inherentes a la psicología de cada individuo. Por mencionar algunos ejemplos, se tiene que la iluminación natural de un área está mediada por la nubosidad presente, la reflexión de la superficie y la atmósfera, los procesos de reflexión, refracción y dispersión de la luz incidente por objetos blancos y el cielo, por los procesos de dispersión y absorción de luz por cuerpos blancos y fuentes contaminantes como la emisión de partículas, entre otras. Precisamente esta reducción de la visibilidad por partículas es tratada por varios autores dada la comprensión de que la presencia en la atmósfera de sustancias sólidas y líquidas contaminantes es uno de los principales responsables de la reducción de la visibilidad atmosférica.

Godish (1997) establece que la reducción de la visibilidad se da por dos causas. La natural y la antropogénica. La primera está asociada a la dispersión propia de una atmósfera libre, a la curvatura de la superficie de la tierra y también a los aerosoles naturales en suspensión. A nivel del mar una atmósfera libre de partículas ocasiona la dispersión de la luz y limita el rango de alcance visual a las 200 millas. La dispersión de la luz por las moléculas que componen el aire limpio (como son principalmente el Nitrógeno y el Oxígeno) es conocida como dispersión de Rayleigh y es directamente proporcional a la densidad atmosférica. Adicionalmente, la neblina, la niebla, la lluvia, la nieve, vientos de fuerte intensidad, entre otros también contribuyen a la reducción de la visibilidad. La antropogénica se debe principalmente a la dispersión de la luz por la presencia de partículas y en segundo término a la absorción de la luz por gases (como los NO_2) y por partículas aunque éstas últimas no son muy eficientes para este fenómeno.

De forma más específica, Seinfeld (1978) explica los dos efectos producidos por las moléculas tanto gaseosas como particuladas sobre la radiación visible: Absorción y dispersión de la luz. La absorción de determinadas radiaciones de luz visible por ambas clases de moléculas produce ciertas coloraciones en la atmósfera, por ejemplo, el NO_2 en altas concentraciones puede tener un efecto significativo ya que absorbe la franja azul-verde del espectro visible de la radiación solar dando lugar a que el cielo adquiera una coloración amarilla-parduzca-rojiza cuando se presentan concentraciones de NO_2 elevadas; sin embargo se dice que la dispersión de la luz es la principal causante de la falta de visibilidad. Por ello, la presente revisión tiene por objeto comprender la relación entre la reducción de la visibilidad y el incremento de la concentración de partículas contaminantes en la atmósfera.

El fenómeno de la dispersión consiste en la desviación de las trayectorias luminosas por la presencia en el aire de partículas en suspensión. Se establece que la causa por la cual la dispersión reduce la visibilidad es la presencia de partículas en suspensión en la visual del observador que dispersan la luz visible (Northern Arizona University's Web Server, 1999 –On Line).

Las partículas que intervienen en dicha dispersión pueden ser grandes o pequeñas, sólidas o líquidas, y de acuerdo a su tamaño ser más nocivas unas más que otras; así por ejemplo, las de diámetro menor a los 2,5 μ , llamadas también aerosoles finos, son a las que se les atribuye la responsabilidad por las afecciones respiratorias y/o circulatorias más agudas ya que éstas ingresan más fácilmente al tracto respiratorio.

De acuerdo a Seinfeld (1978), las partículas grandes dispersan la luz de tres formas 1) reflexión sobre la superficie de la partícula, 2) difracción en los bordes de la partícula y 3) refracción a su paso a través de la partícula, principalmente, considerando que la mayor parte de la luz dispersada por las partículas grandes no sufre una alteración importante de su dirección con respecto a su trayectoria original. En efecto, las partículas grandes si bien pueden alterar la visibilidad, ellas consiguen sólo la mitad o la tercera parte de la efectividad que logran las partículas finas. Las partículas cuyo tamaño está comprendido en el rango similar al de la onda de luz visible (0,4 a 0,7 μ) tienen mayor eficiencia para dispersar la luz, y las partículas más pequeñas (con tamaños menores a 0,1 μ) son capaces de dispersar la luz indistintamente hacia atrás o hacia delante y con mayor facilidad las de longitud de onda corta que las de onda larga y a ello se le atribuye el color rojizo de las puestas de sol (ya que es desviada la componente azul de la luz solar permitiendo que los componentes rojos lleguen a los ojos del observador).

A continuación se presenta una tabla que muestra la relación entre las ondas electromagnéticas y las dimensiones de las partículas.

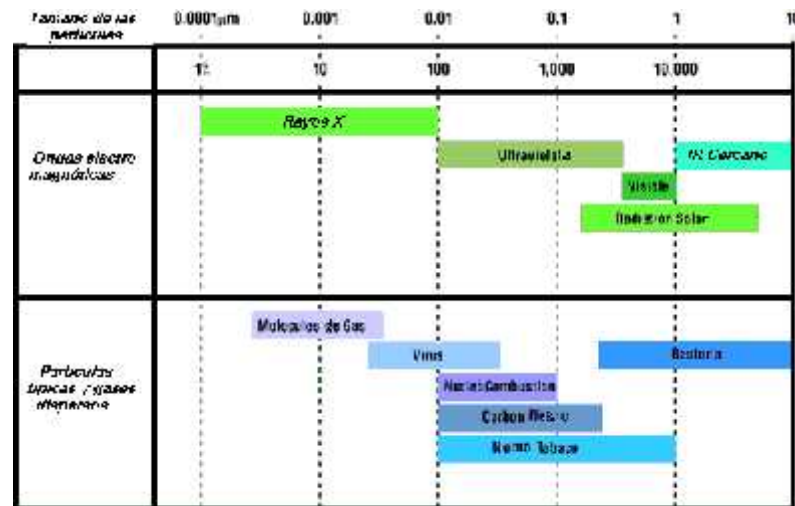


Fig. 1 Relación entre las partículas y las ondas electromagnéticas

Fuente: *Visibility and Light Scattering in the Atmosphere* - Northern Arizona University's Web Server, 1999 – On Line).

De esta manera, los problemas de reducción de la visibilidad resultan de la dispersión y la absorción de la luz por partículas atmosféricas que tienen el mismo tamaño de las longitudes de onda de la luz visible. Partículas de tamaño mayores a éstas dispersan la luz a través una combinación de tres procesos a). difracción, fenómeno por el cual la luz que incide en la partícula es curvada y cubre la sombra de la misma b). Refracción, en el cual el haz de luz que intersepta la partícula es curvado y pasa a través de la misma c). Cambio de fase, en la cual

dos haces de luz que se aproximan a una partícula experimentan un cambio en su fase de vibración; y d) Absorción, la luz también puede ser absorbida por partículas y convertida en energía molecular interna, pero el haz de luz deja de existir. **Ver Figura. 2.**

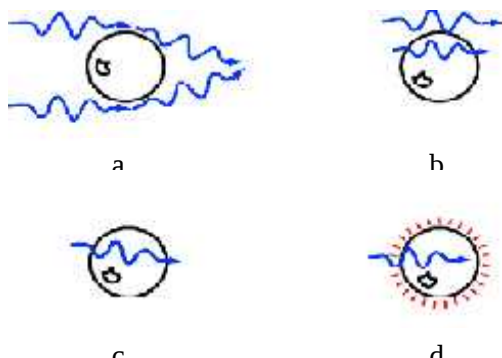


Fig. 2 Procesos físicos entre la luz visible y las partículas

Fuente: *Introducción a la Visibilidad* – William C. Malm, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIARA), 1999

De acuerdo a Malm (1999), la eficiencia con la que una partícula puede dispersar la luz y la dirección en la que será redistribuida depende de estos cuatro fenómenos. Los haces de luz visible pueden ser dispersados en todas las direcciones (dispersión isotrópica), pero en la mayoría de las veces hacia delante. Si las partículas son pequeñas, la cantidad de luz dispersada hacia delante y hacia atrás es bastante similar; pero cuando las partículas incrementan su tamaño, la luz tiende a dispersarse hacia delante.

En la **Figura 3** se puede observar la cantidad relativa de partículas pequeñas y grandes encontradas en la atmósfera. La línea superior (color verde claro) muestra la típica distribución del tamaño de las partículas y la línea inferior (color verde oscuro) muestra la cantidad de luz dispersada asociada con cada rango de tamaño. Así, las partículas más finas son las principales responsables de la dispersión de la luz.

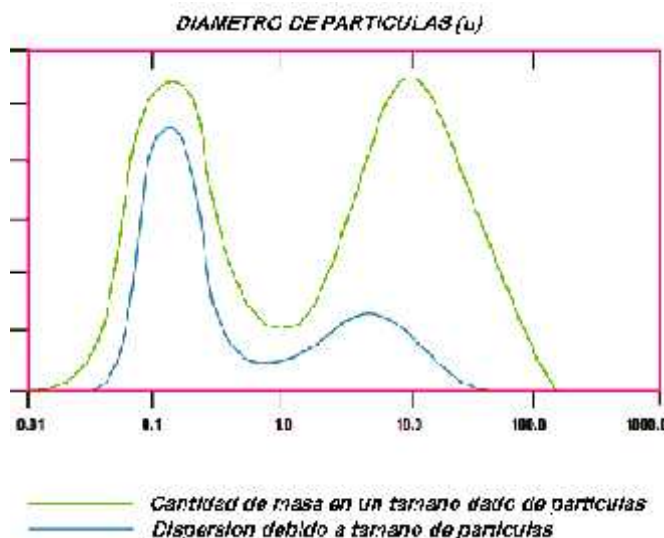


Fig. 3. Distribución del tamaño de partículas comparada con la cantidad relativa de luz dispersada por el tamaño.

Fuente: *Visibility and Light Scattering in the Atmosphere* - Northern Arizona University's Web Server, 1999 – On Line).

De esta manera, la mayor disminución del alcance visual (por dispersión de la luz) puede ser considerado como un indicador de la pobre calidad del aire y consecuentemente la calidad de vida en general podría ser impactada negativamente.

Los constantes procesos de suspensión y re-suspensión y la influencia de la alta humedad atmosférica en los estratos de la tropósfera baja de la Costa Central de Perú, someten al mismo tiempo a estas partículas a procesos físico-químicos de edafización y mineralización de las partículas mayores a 10μ , llamadas materia sedimentable, determinan su fragmentación en partículas de menor tamaño (aerosoles) que según lo descrito líneas arriba son las más comprometidas en los procesos de dispersión de la luz y por ende en la reducción de la visibilidad. Por ello, para pretender comprender la influencia de los aerosoles, es necesario profundizar aún más en el conocimiento de la naturaleza del material sedimentable.

Con respecto al contaminante gaseoso Ozono Troposférico, los procesos meteorológicos que se dan en la cuenca atmosférica de la Zona Metropolitana de Lima-Callao tales como la inversión térmica de invierno, el incremento de la radiación UV B especialmente en las zonas altas durante el verano, las calmas y vientos débiles en las zonas bajas durante las mañanas y los vientos de montaña en horas nocturnas, entre otros, juegan un papel importante en la calidad de aire; el entendimiento de estos procesos sirve al especialista para una adecuada explicación de los fenómenos que ocurren en la tropósfera baja relacionados al transporte y difusión de los contaminantes primarios y la generación de contaminantes secundarios dentro de los cuales se encuentra el ozono troposférico componente de la niebla o smog fotoquímico.

En la ciudad el Ozono fue analizado inicialmente por el Estudio de Saturación de Lima Metropolitana ejecutado por la empresa Swiss Contact en marzo del año 2000 según encargo del Ministerio de Salud, encontrándose que no sobrepasaba los $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ determinados con métodos pasivos. Posteriormente durante el período agosto-setiembre se efectuaron algunos monitoreos puntuales en algunas zonas de Lima Metropolitana con métodos activos, registrándose un máximo de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no sobrepasando los niveles anteriores.

2. Cuenca atmosférica Lima-Callao

La cuenca atmosférica es una región geográfica, delimitada por los obstáculos topográficos de origen natural (líneas costeras, formaciones montañosas etc.), divisiones políticas y uso de la tierra, de tal manera que dentro de ésta se modifica la circulación general de la atmósfera sobre la superficie (capa límite de la atmósfera), dando lugar a la formación de un campo de vientos locales, diferentes del flujo de la atmósfera libre. Este campo de vientos es el responsable de los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes del aire dentro de la cuenca.

Dentro de la implementación del Plan Nacional "A Limpiar el Aire", el SENAMHI a través de su Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales (DGIA), en cumplimiento a lo establecido en el D.S. 074-2001-PCM sobre el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, lideró y concluyó los

trabajos de delimitación de la Cuenca Atmosférica para cada una de las 13 Zonas de Atención Prioritaria a nivel nacional reconocidas por el Decreto dentro del marco de elaboración del Diagnóstico de Línea Base, el cual contempla el monitoreo de la calidad del aire, inventario de emisiones y Estudios Epidemiológicos.

La delimitación de la Cuenca Atmosférica de la Z.M. de Lima-Callao se ha realizado en base al comportamiento de los flujos de viento locales y a las configuraciones topográficas, teniendo como límites la curva de nivel de 800 msnm. y en la cuenca del Rímac la de 1000 msnm. considerando el criterio de crecimiento poblacional hasta esa altitud.

En la Zona Metropolitana de Lima-Callao se ha identificado tres cuencas hidrográficas con sus respectivas microcuencas atmosféricas (ver **Figura 4**) que son las siguientes:

CUENCA DEL RÍO CHILLON

La Cuenca del río Chillón abarca los distritos de Ancón, Santa Rosa, Ventanilla, Puente Piedra, Carabaylo, Comas, zona norte-centro de San Martín de Porres, Los Olivos, Independencia y norte del distrito del Callao. Dentro de la cuenca, se configuran las siguientes microcuencas atmosféricas:

- M. De Ancón: Distrito de Ancón
- M. De Carabaylo: Distrito de Carabaylo
- M. De Collique: Distrito de Comas

CUENCA DEL RIO RIMAC

La Cuenca del río Rímac se extiende a los distritos de San Juan de Lurigancho, Lurigancho, zona centro-sur del Callao, Carmen de la Legua Reynoso, Bellavista, La Punta, Cercado de Lima, Rímac, San Juan de Lurigancho, Lurigancho, Ate Vitarte, El Agustino, Santa Anita, Breña, Pueblo Libre, Jesús María, La Victoria, San Luis, Lince, La perla, San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, San Borja, La Molina, Miraflores, Surquillo, Santiago de Surco, Barranco, Chorrillos, San Juan de Miraflores y zona noroeste del distrito de Villa María del Triunfo. Las microcuencas atmosféricas que han sido determinadas son:

- M. de San Juan de Lurigancho: Distrito de San Juan de Lurigancho.
- M. De Huaycoloro: Distrito de Lurigancho
- M. De Huaycán: Distrito de Ate Vitarte
- M. de La Molina: Distrito de La Molina

CUENCA DEL RIO LURIN

La Cuenca del Río Lurín abarca los distritos de Cieneguilla, Pachacamac, V. María del Triunfo, Villa El Salvador, Lurín, noroeste de Punta Hermosa, considerando las microcuencas de:

M. de Manchay: Distrito de Pacahacamac
M. de Portillo Grande: Distrito de Lurín
M. por I.D.: Distrito de Pacahacamac

3. Metodología

A) Contaminantes Sólidos Sedimentables

Para la presente evaluación se ha utilizado información de la red de monitoreo de contaminantes sólidos sedimentables (CSS) compuesta inicialmente por 27 micro estaciones distribuidas en la Zona Metropolitana de Lima-Callao (**figura 4**), para lo cual se ha desarrollado el método de muestreo pasivo que se describe a continuación:

- **Fase preliminar de gabinete:** Se codifica y prepara todo el material que se lleva a campo para reemplazar las placas receptoras o de acumulación.
- **Fase de campo:** Mensualmente en cada una de las estaciones se reemplazan las placas receptoras impregnadas de contaminantes y se llevan al laboratorio para las evaluaciones respectivas.
- **Fase de laboratorio:** Por el método gravimétrico se determinan las concentraciones correspondientes a cada una de las estaciones de observación.
- **Fase de gabinete:** Involucra el procesamiento, análisis e interpretación de la información, salida de reportes preliminares, cuadros, mapas, gráficos y la elaboración del Boletín Mensual.

B) Contaminantes Gaseosos

La evaluación mensual de los gases contaminantes del aire (CO, SO₂ y O₃) en la Estación de Calidad de Aire ubicada en la Sede Central (**figura 4**) se realiza de acuerdo a la siguiente metodología :

- **Fase de campo:** Calibración según método aprobado por EPA, Operación continua de analizadores automáticos de Ozono troposférico modelo API 400A, Monóxido de Carbono API 300, Dióxido de Azufre API 100A y estación meteorológica automática Davis por el período de observación establecido. Descarga de la información in situ (downloading) mediante cable RS-232 y software API COM para analizadores y software Energy. para estación meteorológica automática. Cambio de filtros cada 15 días en promedio. Inspección de fugas en la línea de ingreso de muestra.
- **Fase de gabinete:** Involucra el procesamiento, análisis e interpretación de la información, salida de reportes preliminares, cuadros, mapas, gráficos y la elaboración del Boletín Mensual.

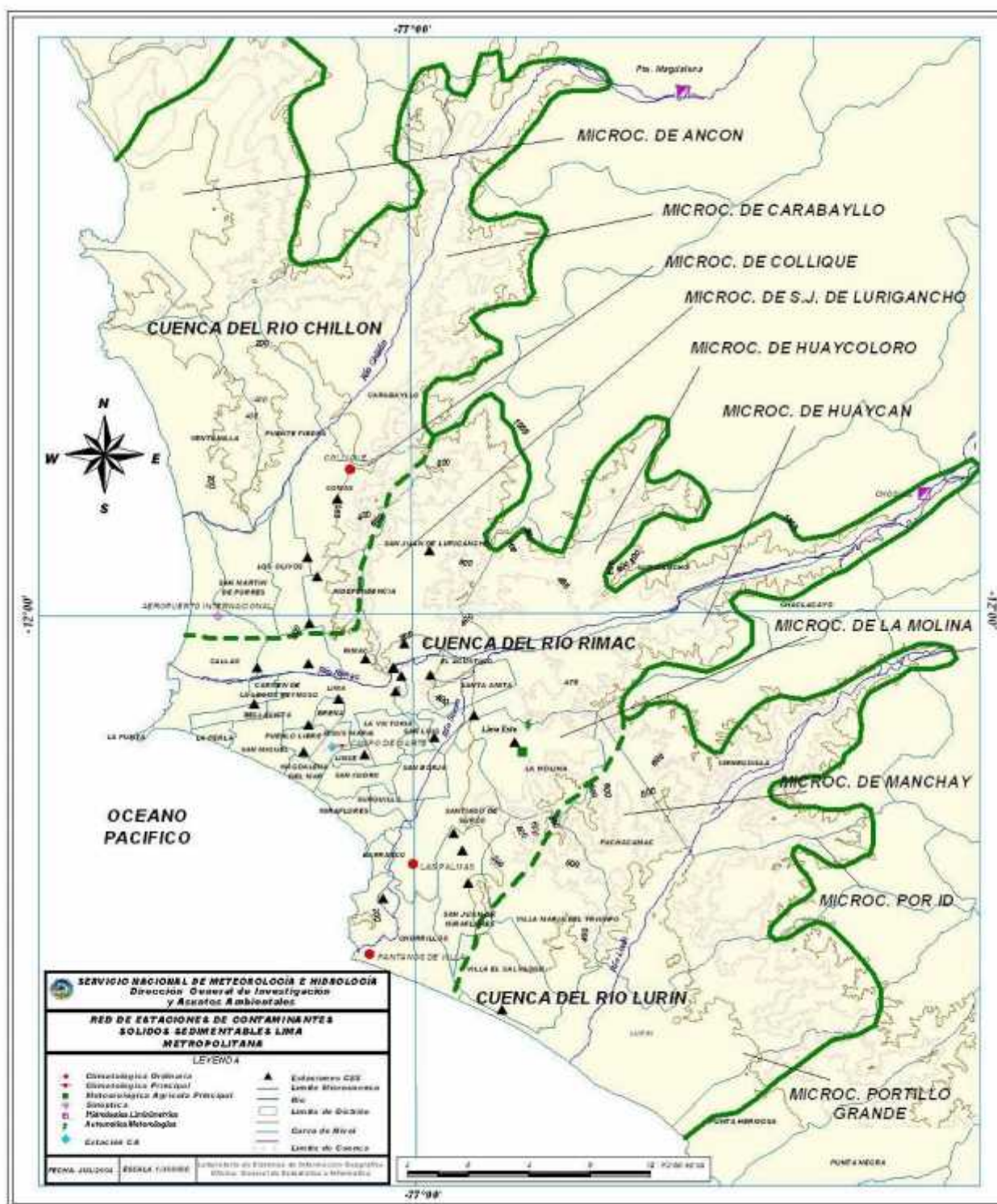


Fig. 4 - Red de estaciones meteorológicas y de contaminantes sólidos sedimentables en la Zona Metropolitana de Lima-Callao

4 Resultados del Monitoreo Ambiental

4.1 Distribución espacial de contaminantes sólidos sedimentables durante el mes de Julio del 2004 en la Zona Metropolitana de Lima- Callao.

En la **figura 4** se presenta la red de contaminantes sólidos sedimentables (CSS). Durante el mes de julio, se recopiló información de campo de 22 estaciones de muestreo, de las cuales el 64% (14 estaciones) excedieron el límite referencial permisible recomendado por la OMS equivalente a 5 t/km²/mes.

En la **figura 6** se muestra el comportamiento espacial de la concentración de CSS que se presenta en la **figura 5**. Se identifican tres centros importantes de alta concentración de contaminantes sólidos sedimentables (CSS), configurados como resultado de la generación in situ así como de los procesos de transporte por el viento desde otras zonas de la capital y se presentan de la siguiente forma: Hacia el cono norte (Cuenca del río Chillón) se observa el primero de ellos extendiéndose a lo largo de los distritos de Carabaylo, Comas, Los Olivos e Independencia, con núcleo en éste último con 20,8 t/km²/mes, valor más alto del mes, debido al importante movimiento vehicular y al desarrollo de una actividad comercial tanto formal como informal a lo largo de la Av. Túpac Amaru, a lo que se suma el mal estado de las pistas y veredas, el deteriorado material de construcción de algunas viviendas y la influencia del campo de vientos que van contribuyendo a su acumulación (**figuras 16 y 17**). El segundo centro importante de contaminación abarca el cono centro-este (Cuenca del río Rímac) y comprende los distritos de San Juan de Lurigancho, Lurigancho, Chaclacayo, Ate-Vitarte, Santa Anita, el Agustino y el Cercado de Lima (zona este), con núcleo en el distrito de El Agustino, con un valor de 16,6 t/km²/mes, también explicado por semejantes condiciones de informalidad de la actividad industrial, comercial y desorden vehicular. Mientras que el tercer centro ubicado en el cono sur, se situó cerca al límite de los distritos de Villa María del Triunfo y Villa el Salvador con valores comprendidos entre los 15 a 25 t/km²/mes, por similares causas locales y la influencia de los vientos locales ya descrita.

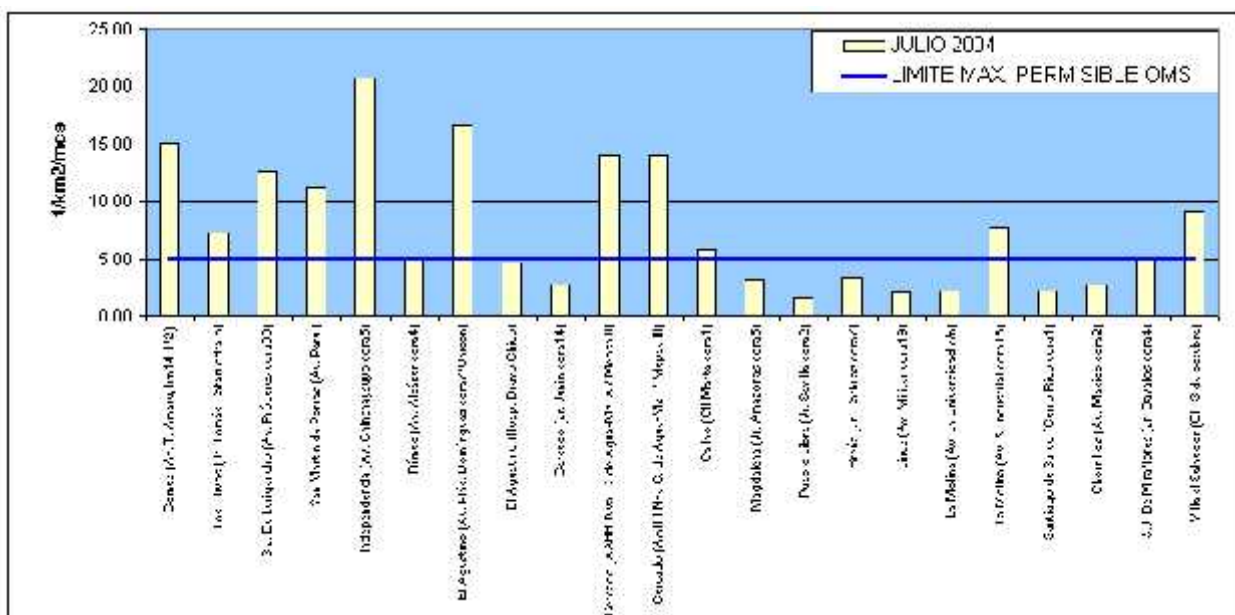


Fig. 5 - Totales mensuales de contaminantes sólidos sedimentables registrados durante el mes de Julio 2004 en Lima-Callao

A lo descrito líneas arriba, se suma el bajo índice de área verde/habitante principalmente en los conos, cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda de 8 a 9 m²/habitante. De acuerdo a informaciones procedentes de organizaciones ambientales especialistas en el tema, se dice que es probable que la ciudad de Lima haya perdido más de un tercio de sus áreas verdes a la fecha.

El sector que comprende la estrecha franja costera y parte de aquellos distritos residenciales como San Isidro, San Borja, Miraflores, parte de Santiago de Surco y Barranco, debido a su alto índice de área verde por habitante, la presencia de los vientos que circulan paralelos a la costa y las brisas marinas que fluyen hacia el este, limitan la generación de material particulado y favorecen la dispersión por lo que no exceden el valor referencial establecido por la OMS.

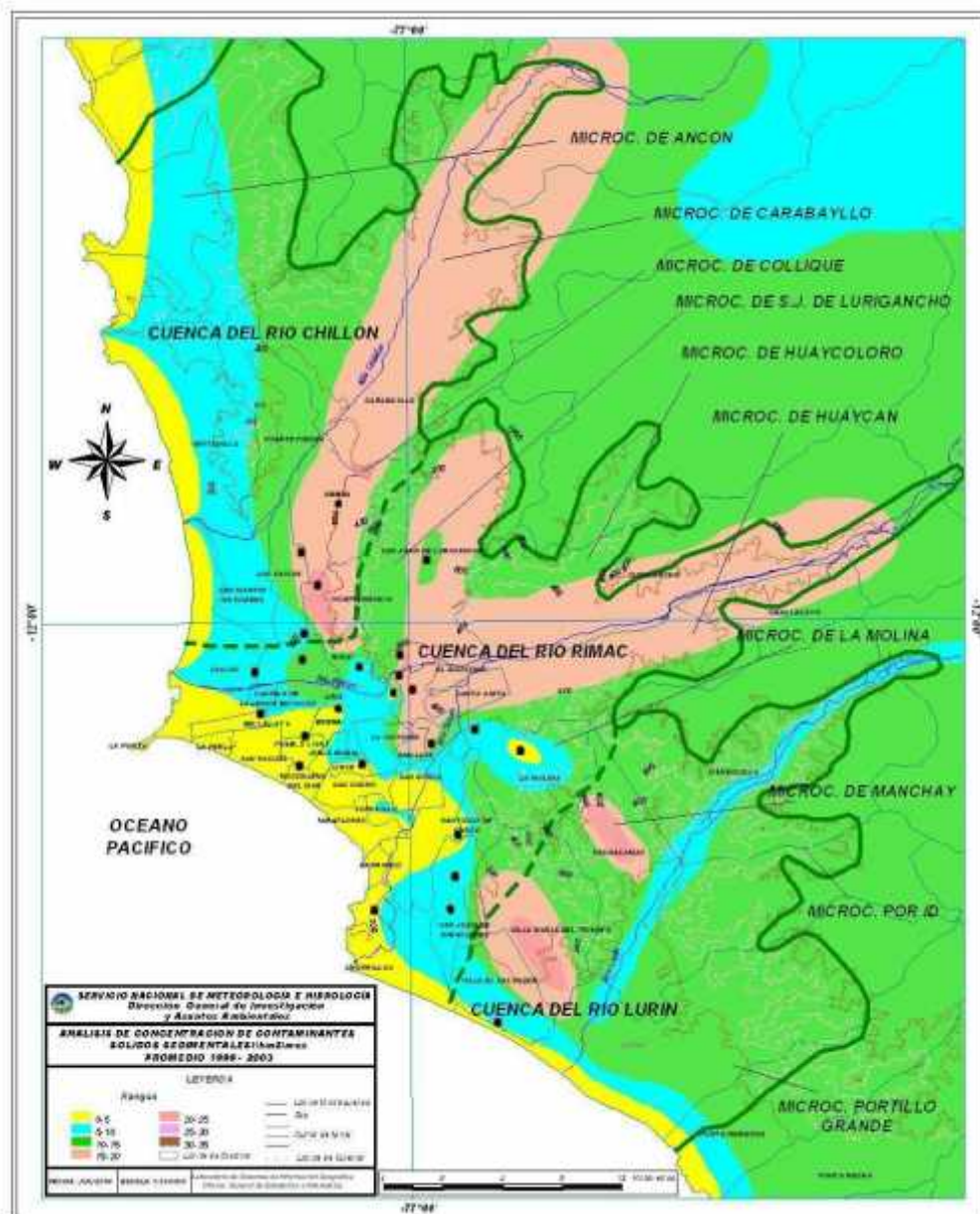


Fig.6 - Distribución espacial de la concentración de sólidos sedimentables en Lima-Callao durante el mes de Julio del 2004

4.2 COMPORTAMIENTO DEL OZONO TROPOSFERICO DURANTE ENERO-MAYO 2004

El análisis realizado corresponde a la información recopilada por la estación de calidad de Aire con Sede en el SENAMHI durante el período de enero a mayo 2004. La información meteorológica correlacionada pertenece a la estación Volante Jesús María que proporcionó para el presente estudio información horaria de vientos y radiación solar total.

La **figura 7** muestra los datos registrados durante el período enero-mayo 2004, la cual muestra que en ningún caso sobrepasó los 50 ppb, valor mucho menor que la norma más exigente: Estado de California 90 ppb horario.

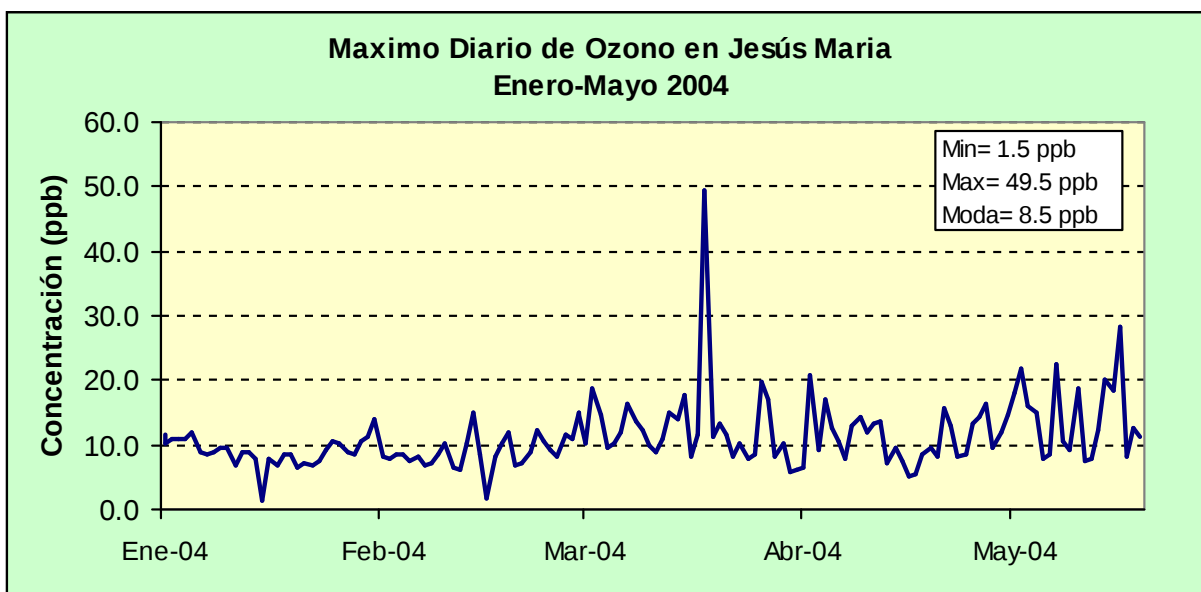


Figura 7. Máximo Diario de Ozono en Jesús María

Comparando la norma nacional de 60,1 ppb (120 ug/m^3) para 8 horas durante el período mencionado, se observa que éste se aleja aún más del límite alcanzando como máximo 19,3 ppb. El máximo de 8 horas es determinado mediante la maximización del promedio móvil de cada día; la **figura 8** muestra el comportamiento de los máximos los cuales muestran una cierta tendencia a ubicarse entre los 5 y 10 ppb.

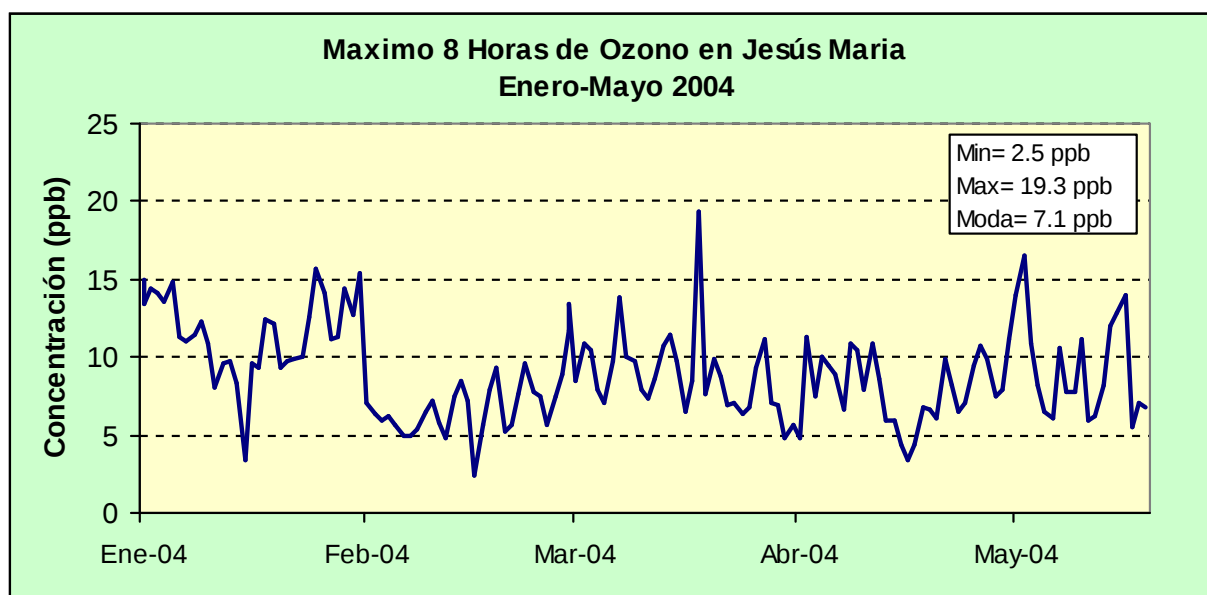


Figura 8. Máximo 8 horas en Jesús Maria

Varios investigadores mostraron (Hyde and Barnett, 1998; Dye et al., 1998; Conroy, 1998) que las concentraciones picos de ozono diario para 1 hora y 8 horas presentan una alta correlación; esto significa que es posible convertir predicciones de ozono de concentraciones de una hora mediante métodos probados a predicciones de 8 horas. Utilizando datos y software estadístico para determinar la correlación encontraron que los rangos de correlación varían entre 0,75 y 0,98 para los mayores puntos de monitoreo en E.U.A.

Nuestras investigaciones han desarrollado ecuaciones de regresión lineal para determinar la relación de estas concentraciones pico, las cuales para efectos de diferenciar los períodos estacionales hemos establecido de manera mensual

En la **figura 9** se puede observar las diferentes relaciones que establecen los valores máximos de Ozono Troposférico alcanzados durante el período con sus ecuaciones de regresión adjuntas cuyos coeficientes de correlación se encuentran entre 0,78 a 0,85.

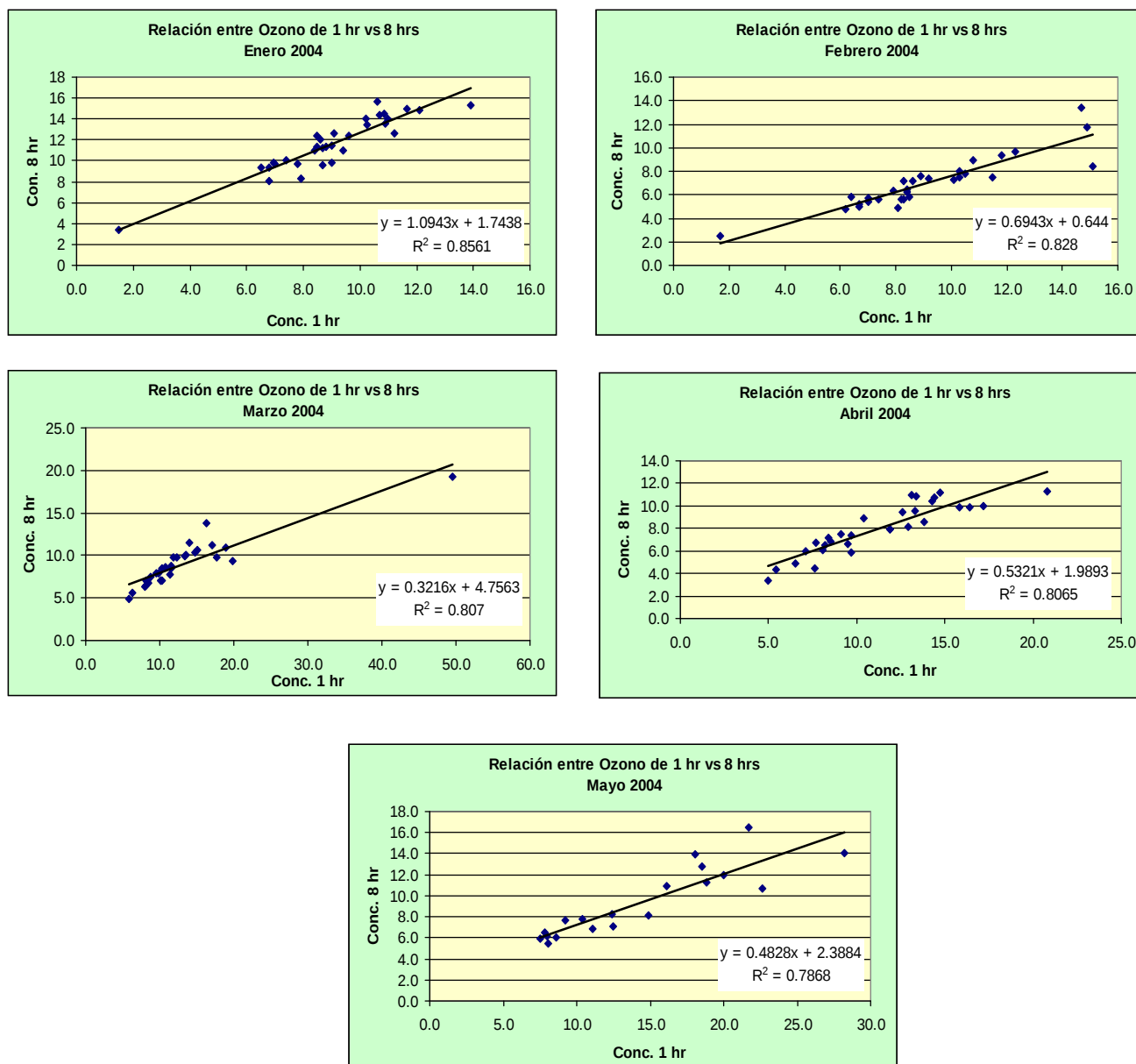


Figura 9. Correlaciones entre Ozono 1h vs 8 h (mensual)

En la **figura 10** se observan rosas de viento que muestran el porcentaje de ocurrencia de ozono con concentraciones para cada dirección de viento medidas en la estación del SENAMHI. Para la elaboración de las gráficas únicamente se consideraron datos de aquellas horas donde se reportaron tanto registros de viento como de concentración de ozono y se eliminaron del análisis aquellos datos que reportaban vientos en calma.

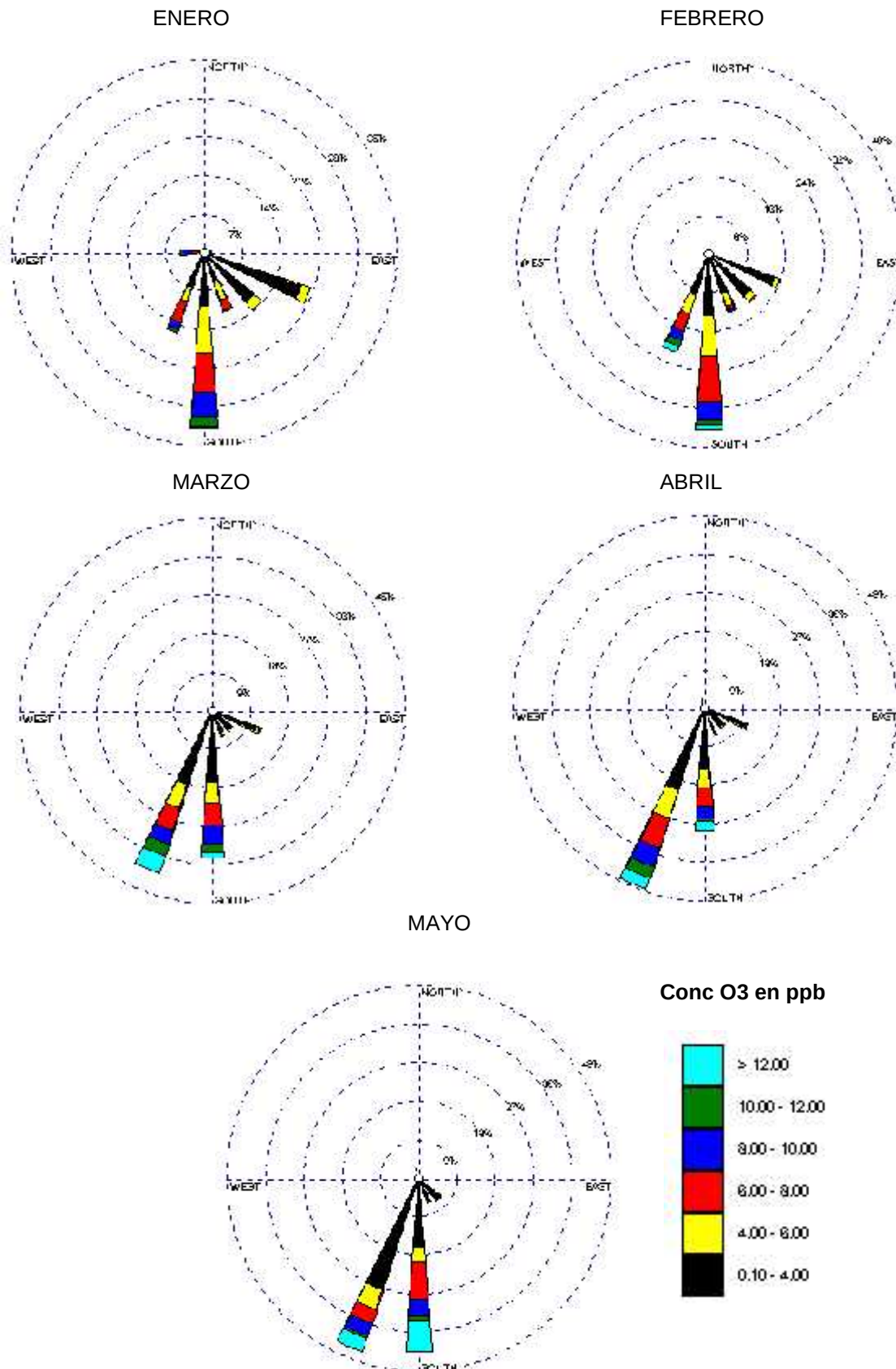


Figura10. Rosas de Concentración Mensual para la Estación de Calidad de Aire SENAMHI

La rosa de vientos de la Estación con Sede en Jesús María muestra que cuando las concentraciones fueron valores mayores a 6 ppb, el viento predominante era de dirección Suroeste y Sur, mientras que valores menores a 6 ppb muestran una predominancia Sur Este en los dos primeros meses del año y en los tres meses siguientes predominan Suroeste y Sur.

La correlación entre Radiación Total (incluyendo la radiación UV) y la formación del Ozono troposférico que se muestra en la **figura 11**, demuestra que de 00:00 a 07:00 am cuando la radiación solar es nula, existe una concentración de ozono que se mantiene entre 1 y 3 ppb en promedio. Después de las 7:00 am comienza a incrementarse el Ozono troposférico alcanzando valores máximos entre las 12:00 a 14:00 pm iniciando el descenso pero con una tasa mucho menor que la tasas de descenso de la radiación total hasta ubicarse nuevamente a las 19:00 hrs en un valor estable. De 1 a 2 ppb coincidiendo con un registro nulo de radiación. Estos valores, cuando la radiación es cero, podemos asumirlos como concentraciones de fondo para la estación.

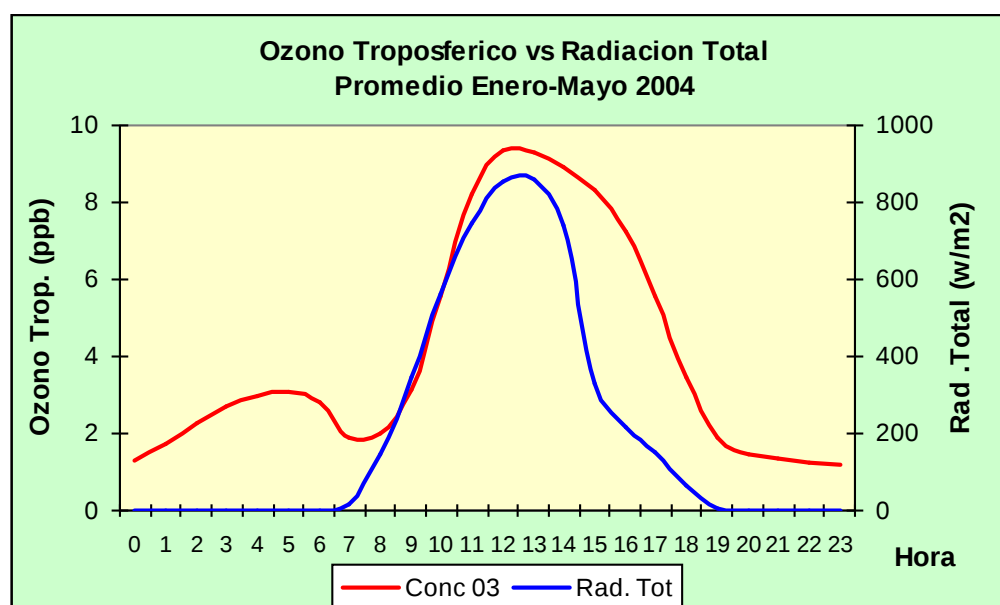


Figura 11. Relación OzonoTroposférico vs. Radiación Total

La correlación entre velocidad de viento y el transporte del Ozono troposférico que se muestra en la **figura 12** demuestra que a bajas intensidades de viento que se presentan en horas de la madrugada 00:00 a 07:00, el transporte de ozono es nulo; mientras que desde las 8:00 am hasta las 16:00 pm cuando la intensidad del viento incrementa hasta aproximadamente 5,5 m/s, el transporte de ozono debido al viento resulta en un importante factor para evitar el descenso abrupto de la curva, lo que si ocurre con el comportamiento de la radiación solar.

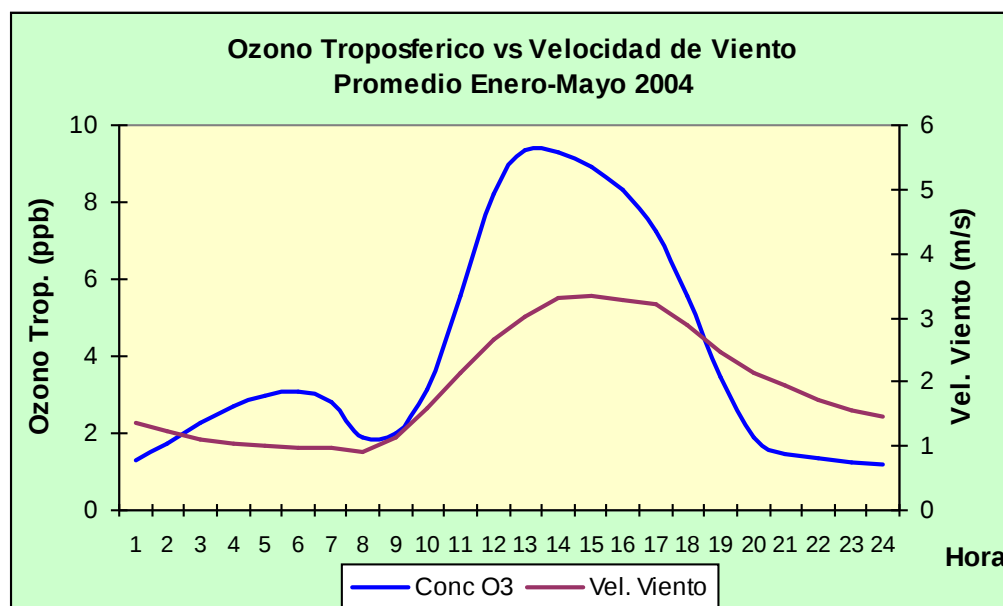


Figura 12. Relación Ozono Troposférico vs. Velocidad de Viento

Se ha efectuado una regresión lineal en primera fase para correlacionar los datos de radiación total y velocidad de viento (**figura 13**) con las concentraciones de Ozono, estableciendo que la representatividad de dichas variables se dan entre las 8:00 am hasta las 18:00 pm. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\text{Conc O3} = 2.4047 * \text{Vientos (m/s)} + 0.0042 * \text{Radiación Total (w/m}^2\text{)} - 1.8265$$

$$(R^2=0.96)$$

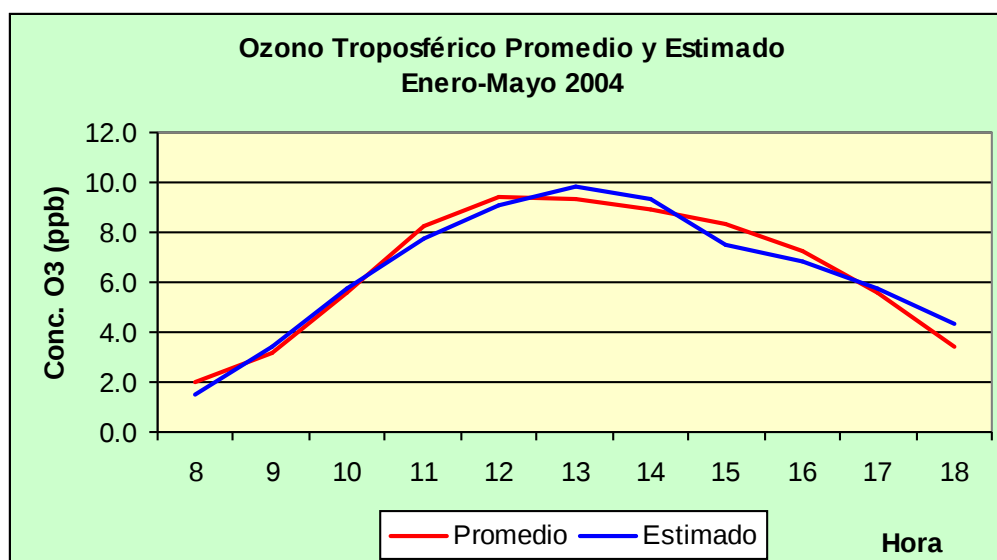


Figura 13. Ozono Troposférico Promedio y Estimado

4.3 Condiciones meteorológicas durante el mes de Julio del 2004

Para el presente mes, el análisis de las condiciones meteorológicas horarias y diarias para la Zona Metropolitana de Lima-Callao se ha basado en la información de 6 estaciones meteorológicas, convencionales y automáticas, ordenadas de norte a sur que se mencionan a continuación: Estación climatológica Collique (Comas), Estación sinóptica y radiosondaje del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Callao), estación climatológica Campo de Marte (Jesús María), estación meteorológica automática Lima Este (La Molina), estación climatológica Las Palmas (Santiago de Surco) y estación climatológica Pantanos de Villa (Chorrillos). Estas estaciones forman parte de la red meteorológica presentada en la **figura 4**.

A. Análisis de Temperatura y Humedad Relativa

- Del análisis puntual de variación temporal diaria de la temperatura (°C) y humedad relativa (%) extremas se observa lo siguiente: Los valores de la temperatura máxima fluctuaron de 13,1°C (La Molina) a 23,0°C (Comas) y la mínima de 12,2°C a 17°C en los distritos de La Molina y Comas, respectivamente; con respecto a las humedades relativas, la máxima fluctuó entre 82% (Callao) a 100% (Comas, La Molina y Surco), mientras que la mínima osciló entre 66% (Surco) a 93% en Jesús María (ver **figuras 14 y 15a,b**). Durante el mes, los días se presentaron nublados parciales a ligeramente despejados con brillo solar hacia el mediodía y con precipitaciones tipo llovizna que fueron disminuyendo hacia fines de mes.
- Con respecto al análisis horario de la información, los valores mínimos de la temperatura del aire se registraron de manera predominante entre las 5:00 y 6:00 am mientras que las máximas se presentaron alrededor de las 13:00 hrs. Con respecto a las humedades relativas, la máxima se registró en forma muy variable pero predominantemente en los rangos de 4:00 a 6:00 am; similar comportamiento se presentó en las mínimas con registros entre las 12:00 y 15:00 pm.
- El análisis de las temperaturas mínimas de 6 estaciones meteorológicas, permitieron establecer que los días más fríos del mes en la Zona Metropolitana de Lima-Callao correspondieron al 11,16 y 25 de julio con un valor promedio de 14,1°C. Asimismo, de los 31 días del mes, la humedad relativa promedio indicó que en 9 de ellos la atmósfera de Lima-Callao estuvo saturada de humedad con valores iguales o mayores a 98%, con predominio de garúas en toda la capital.

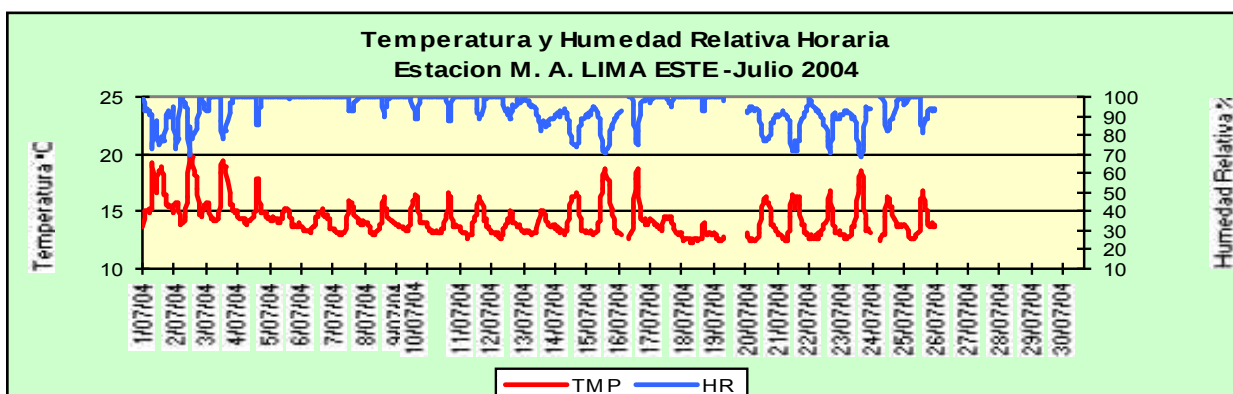
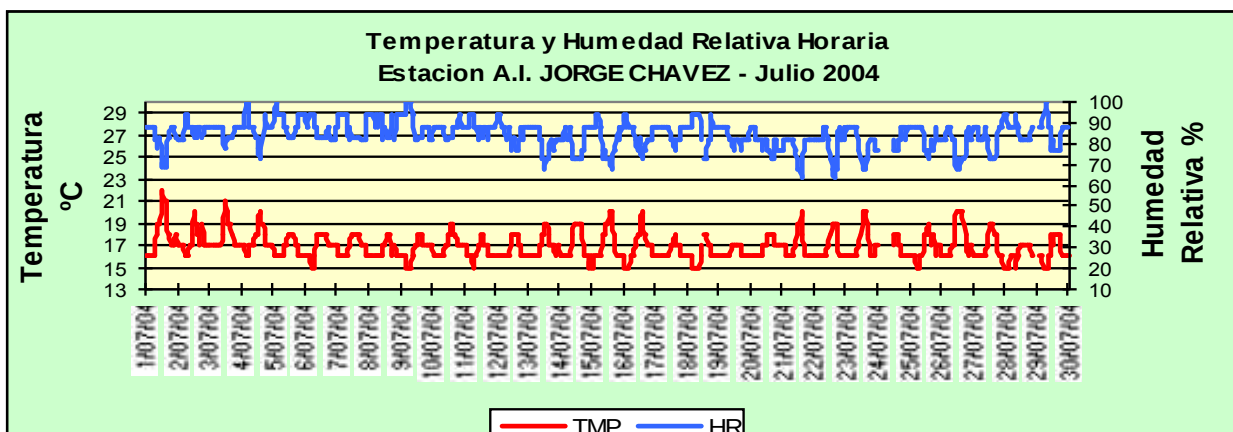


Fig.14 .- Variación horaria de la temperatura y humedad relativa durante el mes de Julio del 2004 en el Callao y La Molina

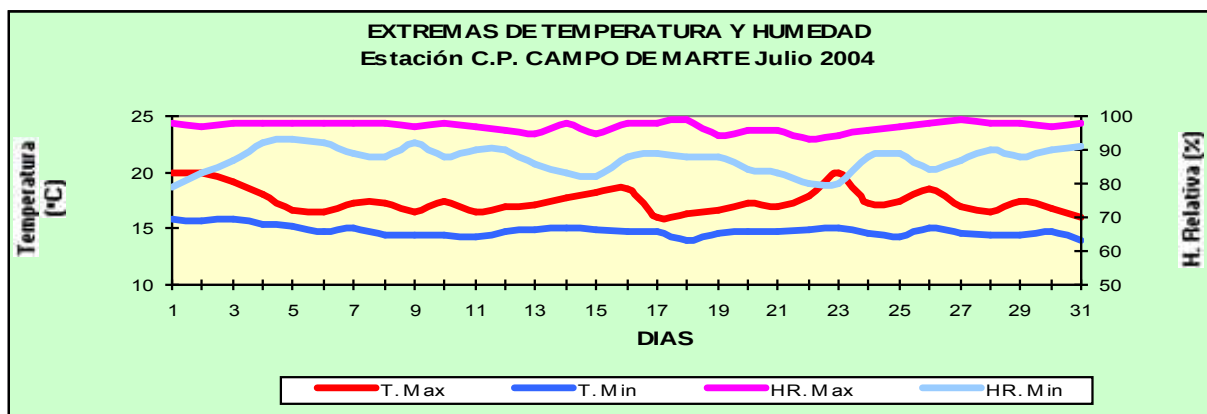
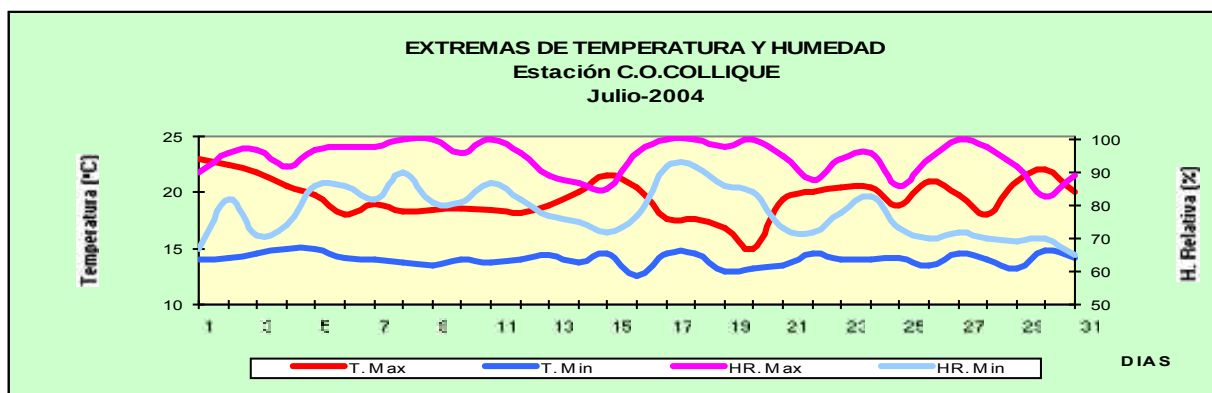


Fig.15a .- Variación diaria de la temperatura y humedad relativa durante el mes de Julio del 2004 en Comas y Jesús María

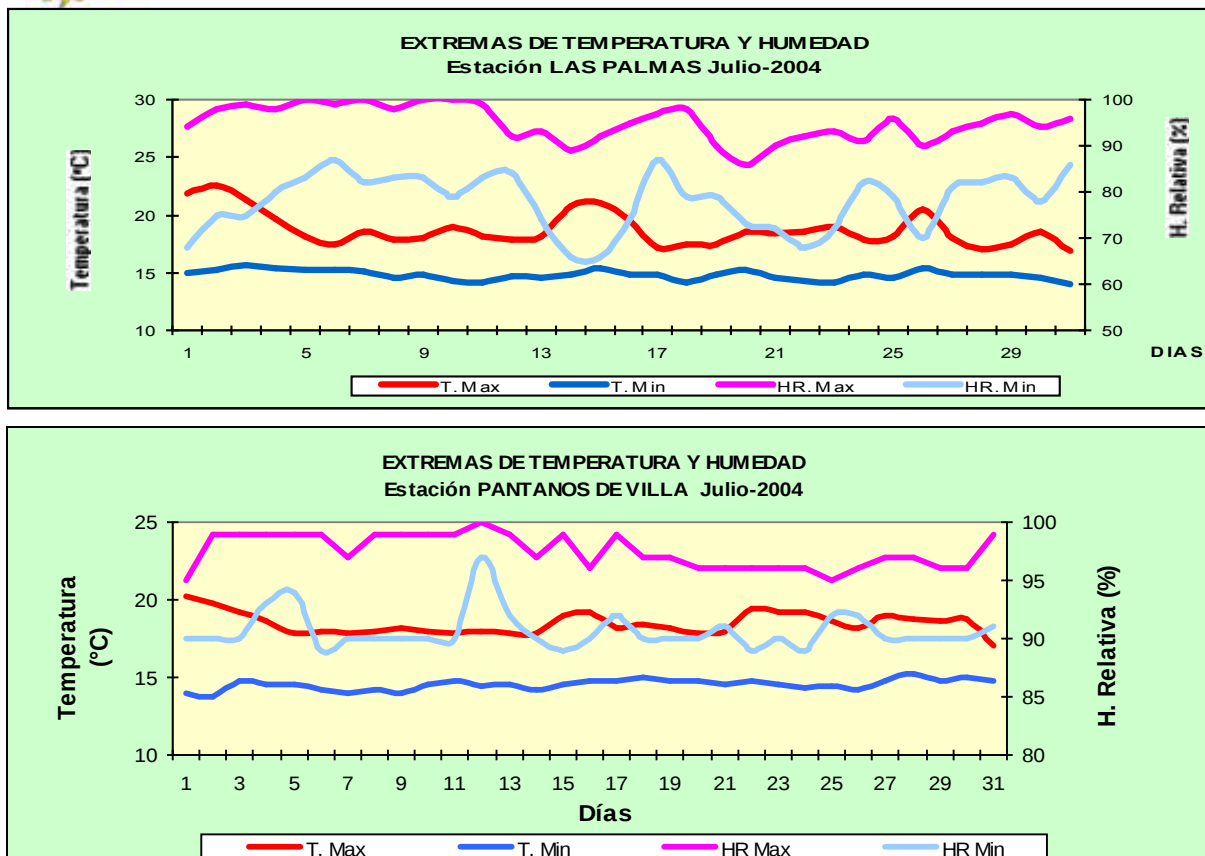


Fig.15b .- Variación diaria de la temperatura y humedad relativa extremas durante el mes de Julio del 2004 en Santiago de Surco y Chorrillos

B. Análisis del viento superficial en la Zona Metropolitana de Lima-Callao durante el mes de Julio del 2004.

El análisis de la información horaria de viento superficial (velocidad, dirección y frecuencia) correspondiente al mes en estudio presentado en las **figuras 16 y 17** para el día (07:00 – 18:00) y la noche (19:00 – 06:00) es el siguiente:

- Durante el día (7:00 a 18:00 horas), los vientos se presentaron débiles (<2,2m/s) a moderados (2,2-6m/s); Hacia el norte (Comas) y centro de la ciudad (Jesús María) predominaron vientos débiles con dirección SSW (24%) y SW (13%) y del SW (58%), respectivamente. Se registraron calmas de 61 y 29% en ambos distritos. Hacia el litoral costero (Callao), este (La Molina) y sur (Surco y Chorrillos) de la ciudad los vientos se presentaron de intensidad moderada con direcciones provenientes del S (49%) y SSW (21%), W (47%) y WNW (26%), del S (24%) y SSE (12%) y del S (52%) y SW (38%), respectivamente.
- Durante la noche (19:00 a 6:00 horas) se registraron vientos con intensidades débiles (<2,2m/s) en los distritos de Comas y Jesús María con direcciones SSW (75%) y del SW (44%), respectivamente; intensidades moderadas en el Callao, la Molina y Surco con direcciones S (44%) y SSE (40%), W (25%) y E (24%) y del SSE (29%), e intensidades fuertes en el distrito de Chorrillos con vientos provenientes del SW (95%).

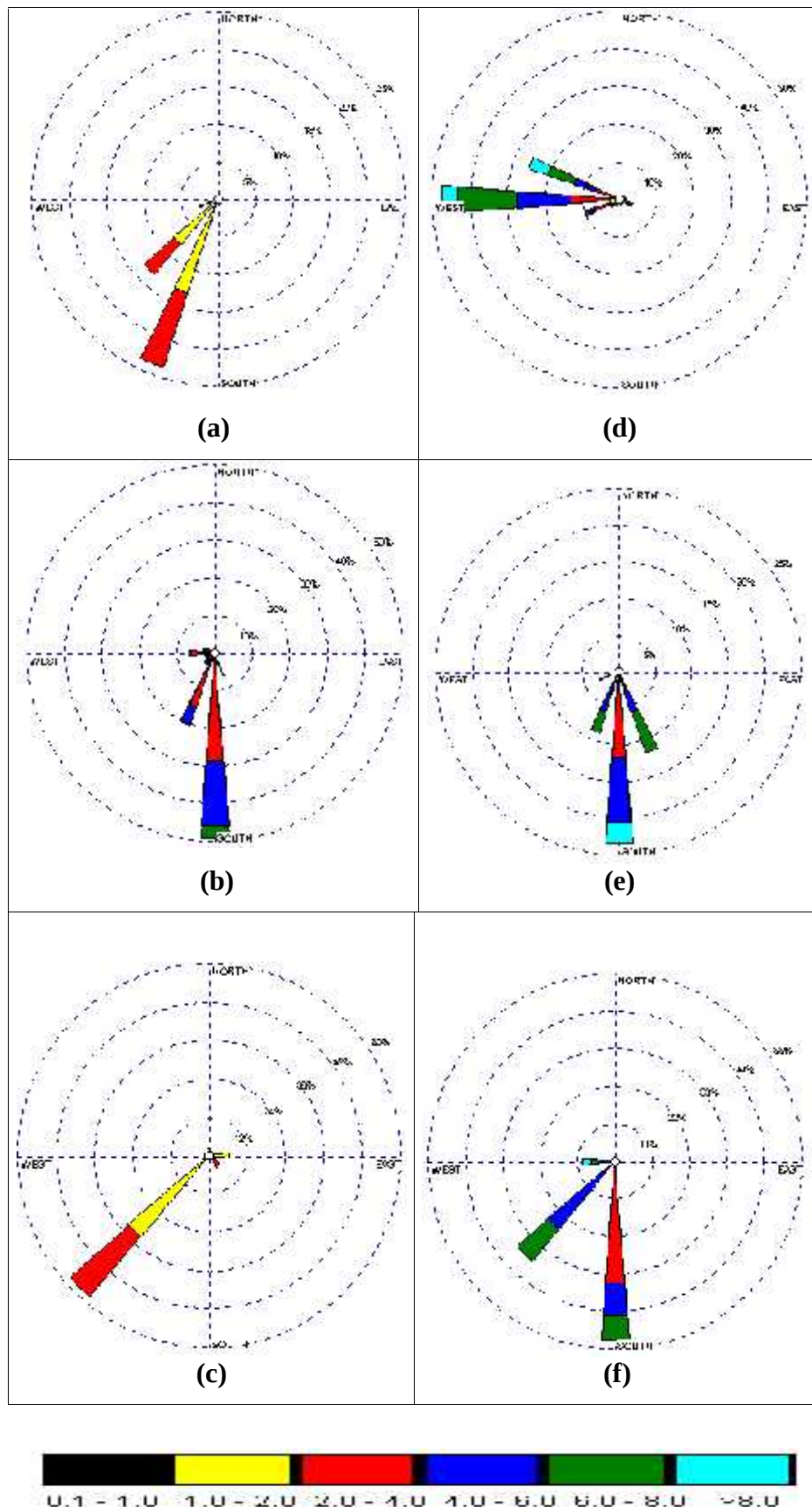


Fig.16 – Rosas de viento (m/s) diurnas de las estaciones de (a) Comas, (b) Callao, (c) Jesús María, (d) La Molina, (e) Santiago de Surco y (f) Chorrillos

(c)

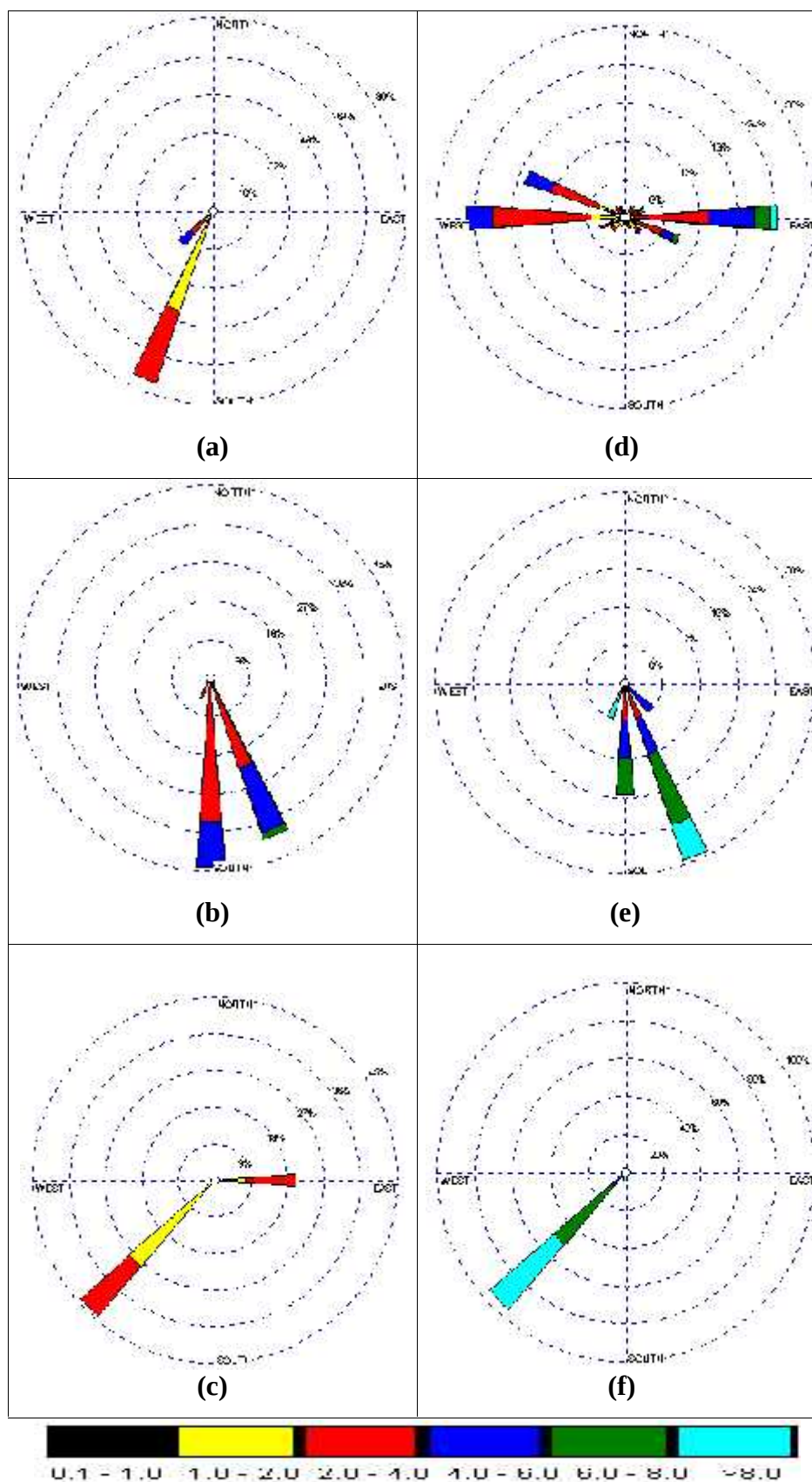


Fig. 17 – Rosas de viento (m/s) nocturnas de las estaciones de (a) Comas, (b) Callao, (c) Jesús María, (d) La Molina, (e) Santiago de Surco y (f) Chorrillos

C. Análisis de la temperatura y vientos en el perfil de la tropósfera de la costa central del Perú durante el mes de Julio del 2004

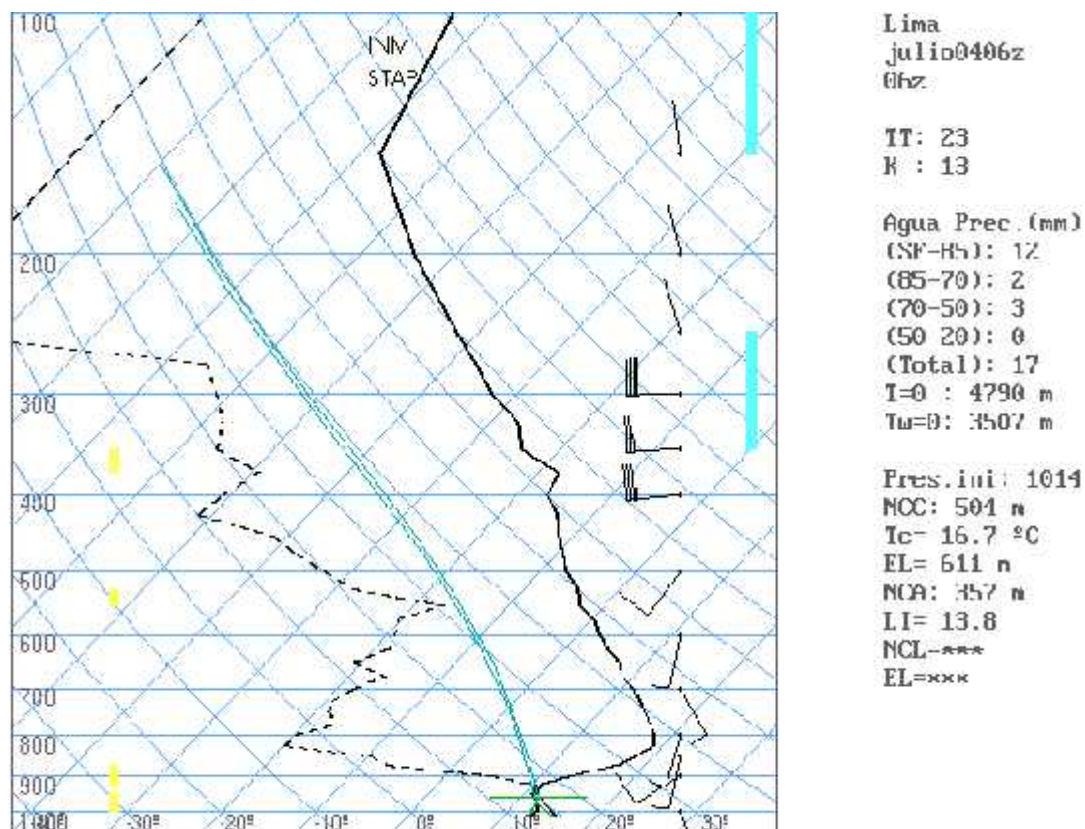


Fig. 18. - Radiosondaje mensual promedio durante el mes de Julio del 2004 (Aeropuerto Internacional Jorge Chávez)

En la **figura 18** se muestra el sondaje meteorológico promedio para el mes de julio. Al analizar la información recopilada durante cada sondaje, se observó que la capa de inversión térmica en la costa central de Perú estuvo presente durante los 22 días en que se realizaron un total de 24 observaciones, con características descritas en el **Cuadro N° 1**.

Cuadro N° 1: Características de la Capa de Inversión Térmica en la Costa Central de Perú

PARÁMETRO	UNIDAD	MÁXIMO		MÍNIMO		PROMEDIO
Espesor	metros	1085	día 16	244	día 21	618
Altura Base	metros	1448	día 7	679	día 11	863
Altura Tope	metros	2001	día 7	1124	día 21	1480
T Base	° C	7,8	día 22	12,6	día 19	10,1
T Tope	° C	22,8	día 21	16,4	día 9	19,7
Gradiente	°C / metros	5,9	día 21	0,5	día 9	1,9
H.R. Base	%	99	día 13	94	día 24	96
H.R. Tope	%	52	día 26	2	días 20 y 25	14

Los vientos entre superficie y 500 hPa fluctuaron entre SE a SW con intensidades de 2,5 a 5 m/s. Desde los 400 hPa hacia arriba, los vientos fueron del W con intensidades de 12,5 a 25 m/s.

Las características de altura de la Base de la Inversión (863 m), intensidad (1,9 °C/ 100m) y la alta humedad atmosférica (9 días con atmósfera saturada sobre la Zona Metropolitana), constituyeron en conjunto y en una forma muy relativa, buenas condiciones de calidad del aire.

5. Conclusiones

Para el mes de julio, el análisis de la variación espacial de los Contaminantes Sólidos Sedimentables (CSS) en la Zona Metropolitana de Lima – Callao muestra la configuración de tres centros de importantes niveles de este contaminante: El primero de ellos está ubicado al norte de la ciudad con un valor de 20,8 t/km²/mes; el segundo, ubicado hacia la zona centro-este, con un valor de 16,6 t/km²/mes y el tercero, hacia el cono sur presenta valores comprendidos entre 15-25 t/km²/mes. Sólo en la estrecha franja paralela a la costa y en parte de algunos distritos residenciales se respeta la norma establecida por la OMS. De acuerdo al análisis realizado, el 64% de las estaciones superaron dichos niveles referenciales.

El valor máximo horario de concentración de ozono troposférico registrado de 49,5 ppb representa un 55% del máximo planteado por el Estado de California E.U.A. (ya que el país no cuenta con estándar horario). El valor máximo de las 8 horas registrado de 19,3 ppb representa un 32% del máximo promedio de 8 horas del estándar nacional (60,1 ppb ó 120 ug/m³). Existe una buena correlación estadística entre el máximo de 1 h y 8 h de este contaminante dentro de cada mes; por ello, es posible poder predecir la concentración máxima de 8 h correlacionando con los picos horarios. La correlación entre radiación total y vientos en el rango de las 8:00 a 16:00 horas es alta con un coeficiente de R² de 0,96. Esto ha permitido establecer una curva de comportamiento de Ozono en función a dichos parámetros.

El análisis de la información meteorológica de los vientos de superficie, permite resaltar la presencia de vientos de débil intensidad hacia el norte (Comas) y centro (Jesús María) de la ciudad con direcciones predominantes del SSW (24%) y del SW (58%) y moderados en los distritos cercanos al litoral (Callao) con dirección S (49%), este (La Molina) provenientes del W (47%) y al sur (Surco y Chorrillos) con dirección S (24% y 52%, respectivamente). En horas de la noche, se reportaron vientos de intensidad débil en Comas y Jesús María con direcciones SSW (75%) y SW (44%), respectivamente, hasta de fuerte intensidad en el distrito de Chorrillos con vientos provenientes del SW (95%)

Las características de altura de la Base de la Inversión (863 m), intensidad (1,9°C/ 100m) y la alta humedad atmosférica (9 días con atmósfera saturada sobre la Zona Metropolitana), constituyeron en conjunto y en una forma muy relativa, buenas condiciones de calidad del aire.