



EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR DIÓXIDO DE AZUFRE EN EL MUNICIPIO REGLA DE LA HABANA, CUBA

Assessment of air pollution by sulfur dioxide in the Havana municipality of Regla, Cuba

Laura Cremata^{1} & Carlos Gómez²*

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, INSTEC. Departamento de Meteorología, Facultad de Medio Ambiente.

²Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, INSTEC. Departamento de Medio Ambiente, Facultad de Medio Ambiente.

*Autor correspondiente/corresponding author: Correo electrónico/E-mail: cremata@instec.cu

RESUMEN

Las refinerías de petróleo emiten material particulado, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, que contribuyen a un daño significativo del medio ambiente. A escala local la contaminación atmosférica ocurre por efecto de una o más fuentes emisoras ubicadas en el entorno de esa localidad. Esto sucede en el municipio Regla de La Habana, donde las emisiones originadas por la Refinería “Nico López”, específicamente de dióxido de azufre, sobrepasan los niveles de la Norma Cubana (1020:2014). Utilizando modelo de dispersión de contaminantes (AERMOD) se comprueba que las mayores concentraciones se encuentran sobre las zonas de viviendas y de la industria del combustible, dado por la ubicación geográfica de la Refinería, a barlovento de los vientos del este. El objetivo general de este trabajo es proponer medidas para disminuir las emisiones de dióxido de azufre de la Refinería. Se propone, la sustitución y adecuado manejo del combustible; mantenimiento preventivo de las instalaciones y efectuar cambios o mejoras tecnológicas que reduzcan las emisiones. Dentro de esta última se encuentra la utilización de técnicas de desulfuración, las cuales remueven hasta un 99% el dióxido de azufre de las emisiones. Las más efectivas son las post combustión, que generan subproductos comerciables y tienen menores costos de operación. De acuerdo con la caracterización físico-geográfica y socio-ambiental del territorio se evalúan dos técnicas: la desulfuración por agua de mar y por piedra caliza/yeso.

Palabras claves: contaminación atmosférica, desulfuración.

SUMMARY

Oil refineries emit particulate matter, sulfur dioxide, nitrogen oxide, carbon monoxide and volatile organic compounds that contribute to a significant environmental damage. A local air pollution occurs as a result of one or more emission sources located in the vicinity of the town. This happens in the Havana municipality of Regla, where emissions from the “Nico Lopez” refinery, specifically sulfur dioxide, exceed the International Standard (1020: 2014). Using pollutant dispersion model (AERMOD) it was established that the highest concentrations are found on the areas of housing and fuel industry, given the geographical location of the refinery, upwind of the winds. The overall objective of the study is to propose measures to reduce sulfur dioxide emissions from the refinery. The investigation proposes, replacement and proper handling of fuel; preventive maintenance of the facilities and changes or technological improvements to reduce emissions. Within the latter is the use of desulfurization techniques, which remove up to 99% of sulfur dioxide emissions. The most effective are the post combustion, generating marketable products and having lower operating costs. Two techniques were evaluated: desulfurization seawater and limestone/gypsum stone, according to the physical-geographic characterization and socio-environmental of the territory.

Keywords: air pollution, desulfurization.

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas han modificado el entorno natural para satisfacer las necesidades siempre crecientes de la sociedad. De esta forma, la situación y las características del medio ambiente están unidas a la evolución de la humanidad (Rodríguez 2015).

En los tiempos actuales, la protección del medio ambiente y los objetivos del desarrollo económico ya no pueden considerarse con fines mutuamente excluyentes. Cada día es más evidente la necesidad de establecer, precisar y regular la interrelación entre las grandes cuestiones que plantea la protección del medio ambiente y el conjunto de las actividades de la vida moderna.

La armonización del desarrollo económico y la protección de la población de los centros urbanos cercanos no resulta una tarea fácil. Por ello se impone la realización de un conjunto de investigaciones que permitan la búsqueda de soluciones y alternativas que minimicen los efectos nocivos hacia el medio ambiente.

La contaminación atmosférica a escala

local ocurre usualmente por efecto de una o más fuentes emisoras ubicadas en el entorno de esa localidad. En el territorio de estudio (municipio Regla de La Habana) ocurre un comportamiento similar. Las emisiones originadas por las fuentes fijas de las industrias provocan una elevada afectación a la población y el medio ambiente (Wallo et al. 2004), cuya fuente contaminante principal es la Refinería “Nico López”.

Las refinerías de petróleo emiten material particulado, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, los cuales contribuyen a un daño cada vez más acelerado del medio ambiente. En el territorio de Regla, la Refinería “Nico López” emite niveles de dióxido de azufre que sobrepasan los niveles higiénico-sanitarios de la Norma Cubana (39:1999), los cuales son un riesgo para la salud de la población.

El municipio es uno de los más densamente poblados de la provincia La Habana. En orden de disminuir los efectos de la contaminación atmosférica sobre el territorio los gestores ambientales deben estudiar con detalle

las zonas afectadas y proponer medidas para mitigar dichos problemas. Las medidas deben estar encaminadas a introducir cambios tecnológicos en el principal foco contaminante que estén de acuerdo con las características físico-geográficas y los intereses económico-ambientales del territorio. El objetivo general de este trabajo es proponer medidas para disminuir las emisiones de dióxido de azufre de la Refinería, y que en consecuencia disminuyan la afectación de este contaminante sobre el territorio.

Los objetivos específicos de este trabajo son: (a) caracterizar las condiciones físico-geográficas y socio-económicas del territorio, (b) proponer medidas que contribuyan a mejorar y mitigar los problemas ambientales existentes y (c) valorar los costos y beneficios ambientales de las medidas más significativas.

Los antecedentes respecto al tema están asociados a estudios sobre contaminación atmosférica realizados principalmente por el Centro de Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología (Cuesta et al. 2000, Wallo 2005). En los mismos el análisis se centra en la modelación de la dispersión de contaminantes y la incidencia de las enfermedades respiratorias agudas sobre el municipio Regla. En estos se plantea que una de las vías más importantes para mejorar la situación medio ambiental del territorio es disminuir las emisiones de la Refinería “Ñico López” pero no se especifican cuales medidas deben aplicarse.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El territorio de estudio se centra en el municipio de Regla (Fig. 1), está localizado en la parte nororiental de la provincia La Habana.

Limita al norte con el municipio Habana del Este, al sur con San Miguel del Padrón, al este con Guanabacoa y al oeste con La Habana Vieja, ocupando un 70 % del litoral de la Bahía de La Habana. El municipio tiene una extensión territorial de 10,4 Km², el 90% está caracterizado por áreas urbanizadas, de este el 40% le corresponde al desarrollo industrial; mientras que en el 10% lo incluyen pequeñas extensiones de tierra como parcelas particulares (Fig. 1). Por otro lado, este municipio está subdividido en tres Consejos Populares, Casablanca, Guacanimar y Loma Modelo (Fig. 2). Guacanimar está más poblado y donde se ubican la mayor cantidad de industrias.

El municipio de Regla se desarrolla en una llanura baja parcialmente pantanosa del este de la Bahía de La Habana. Las zonas más alejadas de la costa se encuentran sobre una llanura ondulada, medianamente diseccionada, en Casablanca se destacan altos valores de pendiente. Por otra parte, el reparto residencial Antonio Guiteras se levanta sobre el valle del río Cojímar perteneciente a las Alturas Habana - Matanzas. El relieve es generalmente llano con discretas elevaciones. Como se puede observar en la Fig. 3, la mayor parte del territorio está circundada por altos valores de pendiente. Esta condición, unida a que la fuente contaminante principal se encuentra localizada en la llanura y el régimen de vientos es de dirección Este, da lugar a que las concentraciones de dióxido de azufre sean altas por la poca dispersión que de la pluma de contaminantes emitidos por la Refinería.

El área de estudio forma parte la Cuenca Hidrográfica que tributa a la Bahía de La Habana, la cual tiene una extensión de 68 km². La cuenca hidrográfica está formada por los ríos Luyanó, Martín Pérez, Arroyo Tadeo y zonas urbano-industriales servidas por sistemas de alcantarillado y drenaje pluvial (doce drenes pluviales) (Valdés 2010).

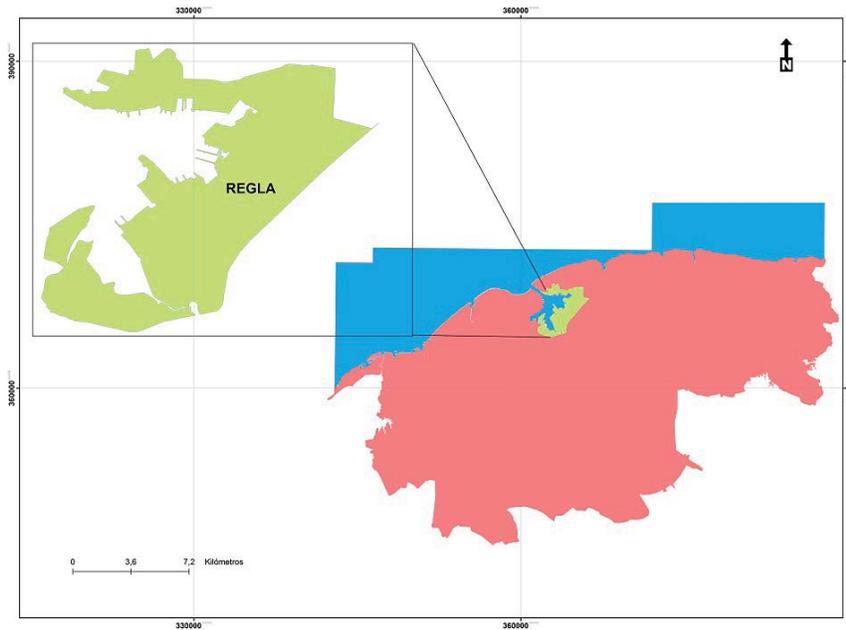


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL MUNICIPIO REGLA (COORDENADAS GEOGRÁFICAS) EN LA PROVINCIA DE, LA HABANA, CUBA.

Location of the municipality Rule.

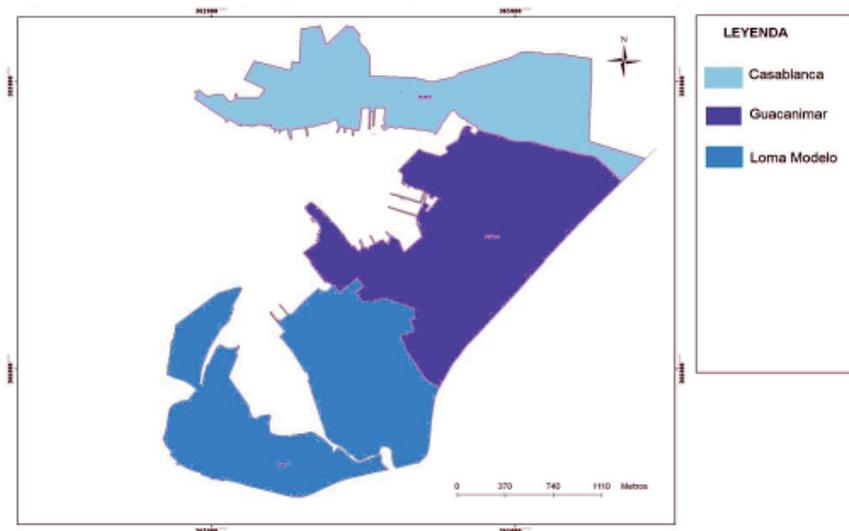


FIGURA 2. CONSEJOS POPULARES DE REGLA, LA HABANA CUBA.

Popular Councils of Regla.

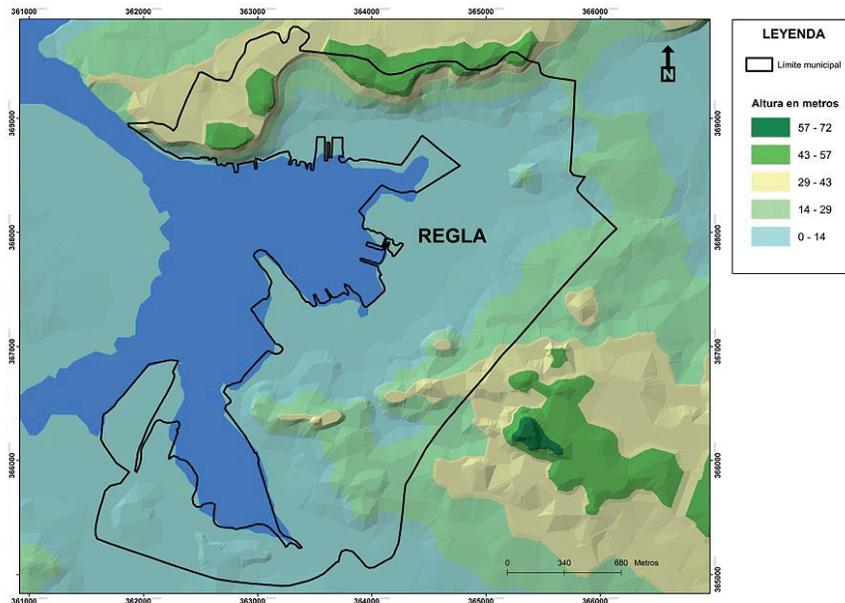


FIGURA 3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL TERRITORIO.

Digital elevation model of the territory.

RESULTADOS

Variables atmosféricas con influencia en el territorio

Las características climáticas se presentan en el contexto del clima de Cuba, el cual es un clima tropical de sabana con un período lluvioso y otro poco lluvioso bien definidos según la clasificación de Köppen; y según el criterio de Alisov el tipo de clima es tropical oceánico, en la periferia suroccidental del Anticiclón Subtropical del Atlántico (Ramos et al. 1996). El clima posee condiciones locales relacionadas con los factores físico-geográficos. Es notable la influencia marítima. Las localidades cercanas a las costas se caracterizan por una menor oscilación diaria de la temperatura, una mayor presencia de las brisas marinas e inferiores totales de precipitación (Lecha 1994). Siendo el viento la

variable meteorológica de mayor peso en la contaminación atmosférica a nivel local, se explicará a continuación con mayor detalle.

Los vientos son originados por varias causas, en dependencia del período del año. Durante el período lluvioso predomina la influencia de los vientos alisios, asociados al Anticiclón Subtropical del Océano Atlántico. La otra causa sería la incidencia de las bajas extratropicales formadas en el golfo de México (los “sures”). Otros sistemas meteorológicos a escala sinóptica pueden influenciar el comportamiento del viento, como los ciclones tropicales y las ondas tropicales.

Conjuntamente, los sistemas de vientos locales condicionan la marcha diaria, en general, estos son las brisas y los vientos Föhn. En el territorio las brisas de mar y tierra tienen gran influencia en la configuración del viento local. Como se observa en la Fig.4, la componente principal del viento es de región

Este, sin embargo la influencia de las brisas se destaca en los rumbos Norte y Sur; ya que durante el día la brisa es del mar hacia la tierra y durante la noche ocurre lo contrario. (Fig. 4).



FIGURA 4. FRECUENCIA DE LOS RUMBOS DE VIENTO EN LA REFINERÍA (CUESTA ET AL. 2000).

Frequency of wind directions Refinery (Cuesta et al. 2000).

Características socio-económicas del territorio

La población del municipio Regla muestra las mismas tendencias que la del resto del país, es decir una disminución del ritmo de crecimiento anual, un envejecimiento de la estructura por edades y una reducción de la fecundidad y la mortalidad (ONEI 2013). La población representa el 2 % de la población de La Habana, mientras que la densidad de población es de 41.647 habitantes/km². Por grupos, se puede ver la distribución que exis-

te en el siguiente gráfico. La mayoría de la población se concentra entre 45 y 49 años, siendo mayor el sexo femenino. Por Consejos Populares, tiene la mayor población Loma-Modelo (46% de la población residente en el 2012), seguido de cerca Guacanimar (40% de la población en el 2012) y por último, Casablanca con la menor población residente (14 % en el 2012). El crecimiento demográfico en la zona de estudio fue dado principalmente por migraciones al municipio que dieron origen a la proliferación de barrios insalubres y el aumento de la densidad de la población en otras áreas. Este proceso de migración e incremento de barrios insalubres tiene, entre otras connotaciones, impactos sobre el manejo, tratamiento y eliminación de las aguas residuales domésticas en la zona.

El municipio Regla desde su origen ha sido un pueblo eminentemente industrial y por tanto obrero. Las industrias de mayores dividendos son las del sector azucarero, fábricas de envases, barriles, bocoyes y cajas, en segundo lugar los almacenes para acopiar esos azúcares de las provincias occidentales, en tercero la industria naval con sus careneros, varaderos y diques secos para la construcción y reparación de todos los buques, de madera primero y más tarde de hierro. De acuerdo con las actividades económicas y sociales que se realizan en el territorio el mismo se dividió en nueve zonas: de áreas verdes, industrial, industrial de alimentos, industrial de almacenes, industrial de combustible, industrial de energía, industrial portuario, industrial de transporte y de viviendas.

Como se puede observar en la siguiente figura, la mayor parte del territorio está cubierto por zonas industriales, que incluyen alimentos, combustibles y transporte. Es importante mencionar que la industria más importante es la Refinería “Nico López”, pero es, además la fuente contaminante más dañina del territorio y afecta directamente a los

asentamientos poblacionales por la posición geográfica que tiene respecto a las direcciones predominantes del viento.

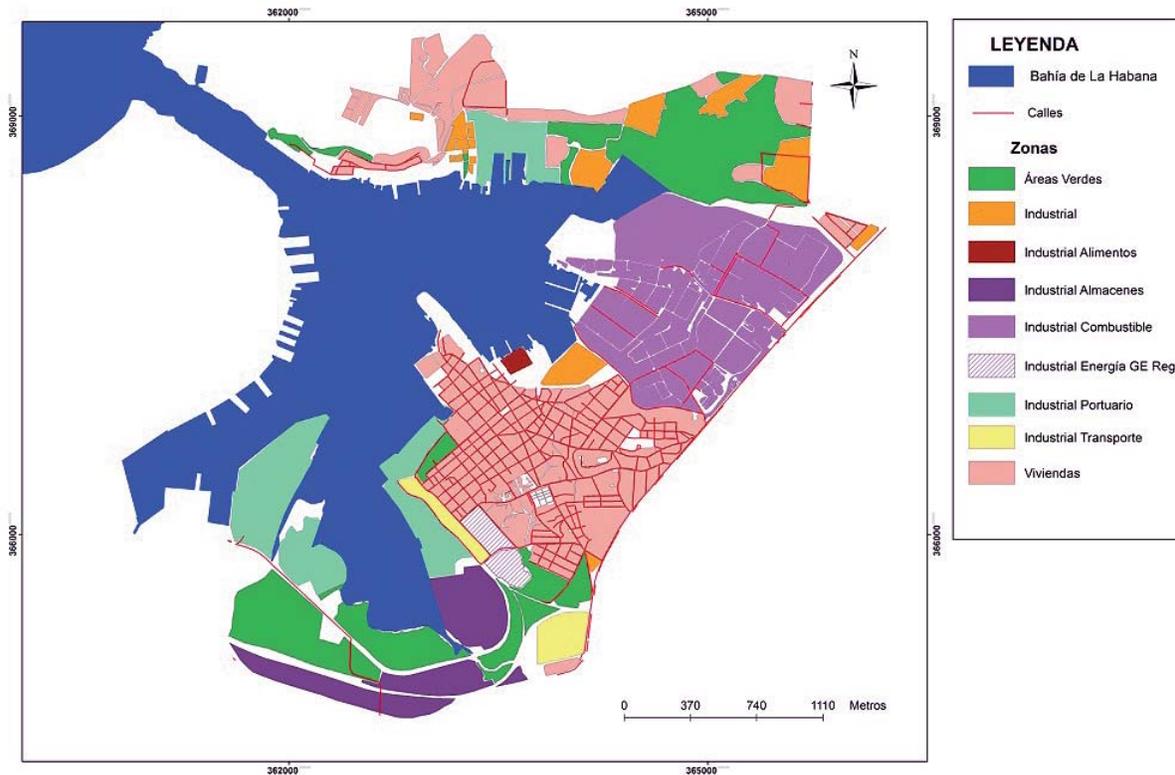


FIGURA 5. ZONIFICACIÓN SOCIO-ECONÓMICA DEL TERRITORIO.

Socio-economic zonification of the territory.

Principales contaminantes que afectan al territorio

Al ser el territorio una zona mayormente urbanizada se mencionarán los principales contaminantes que afectan la calidad del aire. Estos son:

Dióxido de azufre - Quema del combustible fósil y los escapes de los vehículos.

Óxidos de nitrógeno - Quema del combustible fósil y la biomasa, los escapes de los automóviles. La producción biogenética na-

tural de los suelos.

Amoníaco - Procesos industriales, frigoríficos y fuentes naturales y desechos animales y del hombre.

Sulfuro de hidrógeno - Procesos naturales e industriales.

Material particulado - Quema incompleta del combustible fósil, el transporte automotor y canteras en las áreas de estudio, zonas agrícolas.

Monóxido de carbono - Quema del petróleo y los escapes de los automóviles.

Dióxido de Carbono - Quema del petróleo y los escapes de los automóviles.

Otras afectaciones de la calidad del aire en el territorio lo constituyen desde el punto de vista antrópico: (a) combustible doméstico; (b) aumento del contenido de polvo en suspensión y sedimentable en la atmósfera, producto de la intensa actividad constructiva; (c) aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono debido al crecimiento del transporte automotor. La principal fuente natural que agrede al medio en el territorio es la exposición a los aerosoles marinos debido a la cercanía del mar, lo cual produce una alta actividad corrosiva de la atmósfera.

Fuentes contaminantes del territorio

En el territorio se localizan 31 fuentes fijas contaminantes de las cuales 12 realizan el mayor impacto de contaminación a la atmósfera:

1. Refinería "Ñico López" (efluentes líquidos y emisiones).
2. Incinerador de "SAMARP" (efluentes líquidos y emisiones).
3. Obras Marítimas Construcciones (efluentes líquidos y emisiones).
4. Empresa de Cereales José Antonio Echevarría (efluentes líquidos y emisiones).
5. Industria Molinera S.A (efluentes líquidos y emisiones).
6. Empresa de Cereales Turcios Lima (Haricub) (efluentes líquidos y emisiones).
7. Empresa Piensos Tropicales (efluentes líquidos y emisiones).
8. Grupo Electrógeno (efluentes líquidos y emisiones).
9. Empresa para la reparación y construcción naval "ASTIGAL" (efluentes líquidos y emisiones).

10. PRODAL (efluentes líquidos y emisiones).
11. Horteca (efluentes líquidos y emisiones).
12. Cauce del arroyo Tadeo (efluentes líquidos y emisiones).

Las fuentes principales de este municipio se pueden apreciar en la Fig. 6 y se corresponden con la Refinería "Ñico López" y el GE de Regla. Ambas ubicadas en las cercanías de zonas habitadas donde su influencia provoca efectos nocivos sobre la calidad de vida de la población (Cuesta et al. 2000) y (Wallo 2005).

La Refinería como principal foco contaminante

La ubicación de los principales asentamientos poblacionales del municipio al sudeste de la zona industrial de combustible, donde se encuentra la Refinería "Ñico López" es un error que tiene repercusiones en la salud de la población. En los estudios realizados previamente sobre el impacto de las emisiones a la atmósfera de las fuentes fijas (Cuesta & Wallo 2009, 2010, Batule 2012) muestran que la ubicación de estas fuentes al este de los principales núcleos poblacionales de la ciudad provocan que las condiciones meteorológicas más frecuentes favorezcan la incidencia directa de estas emisiones sobre estos. También, condiciones de alta estabilidad atmosférica y poca dispersión en horas de la madrugada y la mañana provocan gran acumulación de contaminantes. Como es conocido el petróleo crudo y sus fracciones derivadas están formados por una mezcla de hidrocarburos además de azufre, oxígeno y nitrógeno; principalmente bajo la forma de compuestos tales como el sulfuro de hidrógeno, el mercaptano, los disulfuros y polisulfuros y los ácidos naftalíticos.

El contaminante que más se emite a la at-

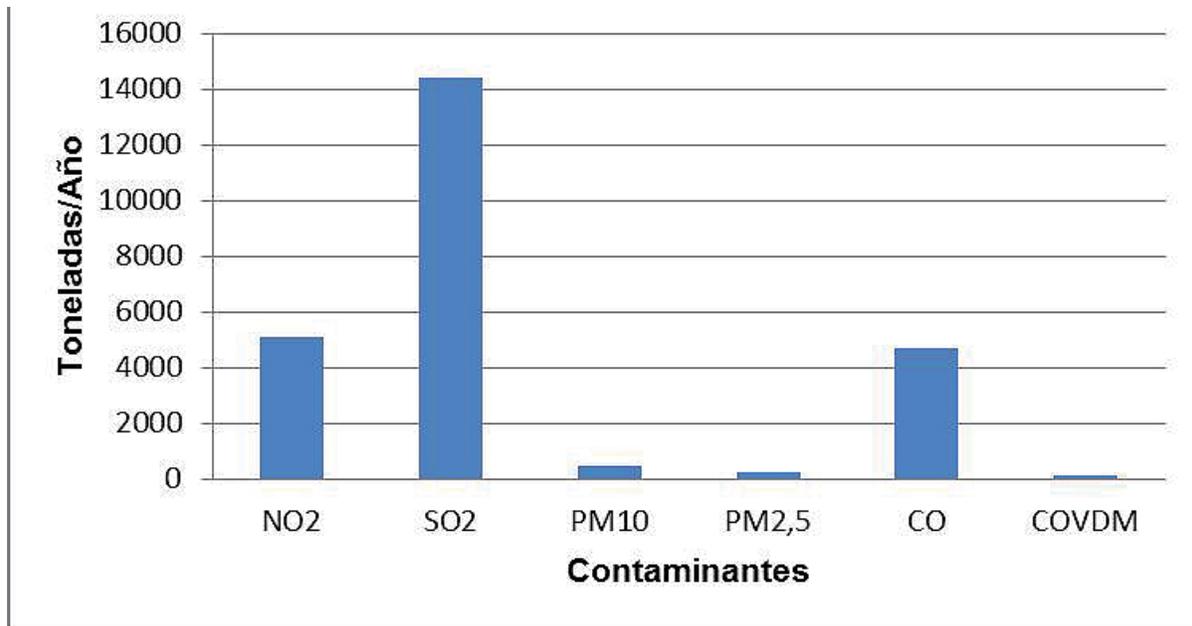


FIGURA 6. EMISIONES DE LA REFINERÍA NÍCO LÓPEZ.

Emissions from Nico Lopez refinery.

mósfera es el SO₂, seguido del NO₂, mientras que el CO ocupa el tercer lugar entre las emisiones. Por lo tanto, los compuestos gaseosos derivados de la quema de los combustibles fósiles son los principales contaminantes emitidos. Esto se puede observar en la Fig. 6. El grupo electrógeno es la otra fuente principal en el territorio, sin embargo sus emisiones no se comparan con las de la Refinería, ni tampoco su ubicación geográfica favorece un alto impacto sobre la zona de viviendas.

Principales problemas ambientales observados en el territorio. Zonas de mayor contaminación

Las grandes aglomeraciones urbanas, en crecimiento progresivo y el incremento del número de fuentes de contaminación, que entre las más comunes y sus contaminantes se puede señalar la Refinería “Níco López”, el gru-

po electrógeno, y el transporte, contribuyen a un daño cada vez más acelerado del medio ambiente. La ubicación de la Refinería dentro del municipio Regla, incide de manera directa sobre los pobladores por lo que el territorio se encuentra sometido a un fuerte estrés ambiental, provocando una alta incidencia de enfermedades pulmonares, y lo convierte en uno de los de mayor incidencia de esas patologías en el país.

Debido a estos argumentos, se modeló la dispersión de los contaminantes con el modelo AERMOD y se ubicó en la zonificación socio-económica el valor promedio de la concentración de SO₂ en cada zona. Se corroboró con el modelo de la Norma Cubana (1012:2014). La concentración máxima admisible es 0,25 mg/m³ en 1 hora y 0,045 mg/m³ en 24 horas.

Se definieron tres zonas: (a) Zona de concentración máxima: 1,51-2,00 mg/m³; (b) zona de concentración media: 1,01-1,05 mg/

m³; (c) zona de concentración baja: 0,01-1,00 mg/m³.

No obstante esta zonificación, todo el territorio excede la concentración máxima admisible establecidas por la Norma Cubana (10:2014). De modo que, si se establece una zona de protección sanitaria debido a las emisiones de la Refinería abarcaría un área que

sobrepasa los límites del municipio. Esta distribución concuerda con los valores de la rosa de los vientos y demuestra que el SO₂ afecta gravemente a la zona industrial de combustible, a la zona de viviendas, a una parte de la zona industrial, industrial de alimentos y de áreas verdes.

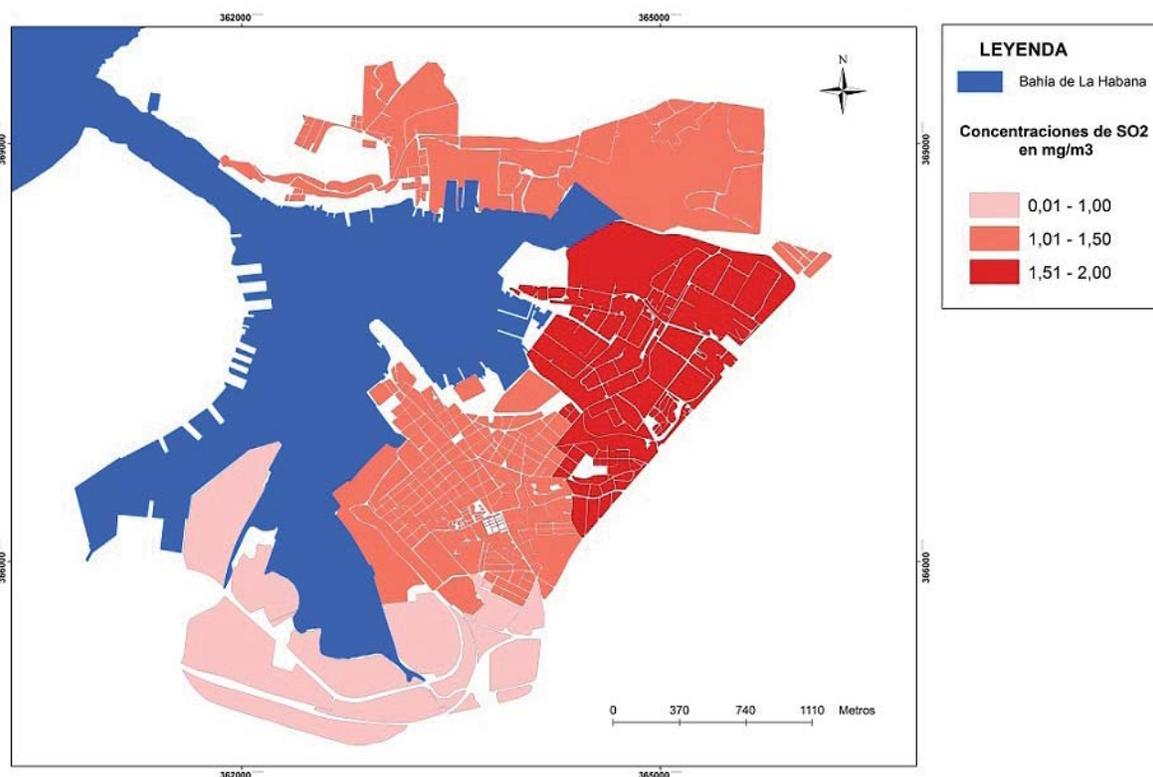


FIGURA 7. ZONIFICACIÓN POR LAS CONCENTRACIONES DE SO₂.

Zonification by concentrations of SO₂.

El dióxido de azufre como compuesto químico contaminante

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro, no inflamable y de olor sofocante. Conden-

sa (líquido incoloro) a -10°C y solidifica a -72°C. Es soluble en agua (85% a 25°C) y en los solventes orgánicos. Este contaminante es el resultado de la combustión del azufre contenido en los combustibles fósiles (petróleos combustibles, gasolina, petróleo diesel y car-

bón), de la fundición de minerales que contienen azufre y de otros procesos industriales.

Efectos en la salud

El SO_2 es higroscópico, es decir, cuando está en la atmósfera reacciona con la humedad y forma aerosoles de ácido sulfúrico y sulfuroso que luego forman parte de la llamada lluvia ácida. La intensidad de formación de aerosoles y el período de permanencia de ellos en la atmósfera depende de las condiciones meteorológicas reinantes y de la cantidad de impurezas catalíticas (sustancias que aceleran los procesos) presentes en el aire. En general, el tiempo medio de permanencia en la atmósfera asciende a unos 3-5 días, de modo que puede ser transportado hasta grandes distancias.

Sobre la base de las evidencias de la exposición a corto plazo de dióxido de azufre, la Organización Mundial de la Salud recomienda que no se deban exceder valores de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por períodos promedios de diez minutos. Los estudios de exposición a largo plazo de dióxido de azufre en la población (Cuesta, y otros, 2000), muestran que el número de visitas diarias al médico aumentaron en un 10 % para un promedio de aumento diario de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo las visitas por enfermedades respiratorias las que aumentan más rápidamente. Muchos estudios muestran efectos consistentes en la mortalidad y las admisiones de emergencias en los cuerpos de guardia de los hospitales a niveles diarios de exposición sin exceder los $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y niveles promedio anuales bajo los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los principales grupos de riesgo están constituidos por las personas de edades extremas (niños y ancianos) y por los que padecen afecciones respiratorias y cardiovasculares, en particular cardiopatía isquémica. Concentraciones particularmente riesgosas pueden

ocurrir en el interior de túneles, en locales cerrados y en viviendas, en dependencia de las fuentes internas sin ventilación adecuada

La contaminación del aire por SO_2 causa los siguientes efectos: queratitis, dificultad para respirar, inflamación de las vías respiratorias, irritación ocular por formación de ácido sulfuroso sobre las mucosas húmedas, alteraciones psíquicas, edema pulmonar, paro cardíaco y colapso circulatorio. El SO_2 también se ha asociado a problemas de asma y bronquitis crónica, aumentando la morbilidad y mortalidad en personas mayores y niños. (Ministerio del Medio Ambiente Chile 2014).

El azufre es un veneno altamente nocivo para la salud de las personas, aunque podemos ser más resistentes que otros seres vivos que cohabitan con nosotros en esta región. Por ejemplo, el nivel de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire es un valor que implica potencial riesgo para la salud humana, pero para los árboles, un valor de $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ya es muy grave. Por lo mismo, tanto los óxidos de azufre (SO_x) como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) están relacionados con el daño y la destrucción de la vegetación, deterioro de los suelos, materiales de construcción y cursos de agua. La exposición crónica al SO_2 y a partículas de sulfatos se ha relacionado con un mayor número de muertes prematuras asociadas a enfermedades pulmonares y cardiovasculares. El efecto irritativo continuado puede causar una disminución de las funciones respiratorias y el desarrollo de enfermedades como la bronquitis (Ecologistas En Acción 2010).

Problemas ambientales del territorio

Los principales problemas ambientales identificados en el territorio de estudio están estrechamente vinculados con el deterioro del saneamiento y las condiciones ambientales en los asentamientos humanos; incidiendo

sobre la calidad de vida y la salud de la población; así como los problemas de la deforestación afecta en gran medida la erosión de los suelos, en especial en áreas de las cuencas hidrográficas y la calidad de los ecosistemas costeros. Se proponen las siguientes medidas para la contaminación atmosférica: (a) control de la disciplina tecnológica, (b) sustitución y manejo adecuado de combustible, (c) incorporar técnicas de depuración de las emisiones, (d) mantenimiento preventivo a las calderas, (e) efectuar cambios o mejoras de tecnologías que reduzcan las emisiones y (f) elevación de la altura de la chimenea.

La medida más significativa en la reducción de emisiones de SO_2 ha sido la mejora progresiva en la calidad de los combustibles para uso industrial y transporte. También, se han implantado sistemas de desulfuración, que eliminan hasta el 98% del dióxido de azufre que se emite por la chimenea (Martiatu 2011).

En cuanto a la contaminación por dióxido de azufre las propias personas pueden contribuir en cierta medida a la disminución de sus emisiones, por ejemplo: mantener en buen estado el motor de su vehículo, usar combustible que cumpla con las normas de calidad y evitar mantener el motor encendido cuando no sea necesario. Los industriales deberán respetar las medidas decretadas en el Plan de Descontaminación, utilizando combustible que cumpla con las normas de calidad, manteniendo en buen estado sus máquinas y cumpliendo con las normas de emisiones impuestas por la autoridad. Finalmente respetar las medidas decretadas en caso de episodios críticos de contaminación.

Análisis económico de las medidas de mitigación

Un análisis económico de las medidas de mi-

titigación debe tener en cuenta los beneficios ambientales, de esta forma se garantiza una correcta selección de la medida que se va a implementar. Según (Gómez 2013) el análisis de los costos-beneficios se basa en comparar ventajas e inconvenientes asociados a cierta decisión. Se debe decidir bien cuál es el objetivo y las condiciones en que se enmarca, identificar todas las alternativas, cuantificarlas y seleccionar criterios de comparación que permitan escoger la medida con un mejor balance de costo-beneficio.

De manera general y dependiendo del punto de aplicación en el proceso de combustión de combustibles fósiles, las tecnologías de desulfuración pueden agruparse en tres grupos según Rodas et al. (2003): (a) antes de la combustión (pre-combustión), (b) durante la combustión y (c) después de la combustión (poscombustión). Las tecnologías de desulfuración de pre-combustión se refieren al tratamiento químico del combustible antes de ser inyectado a la caldera u horno, siendo la más popular la denominada tecnología de hidrotratamiento (HDT) o hidrodesulfuración (HDS), que consiste en someter al combustible líquido con hidrógeno a cierta presión y temperatura, en presencia de un catalizador sólido bimetálico, de manera que los compuestos orgánicos sulfurados contenidos en dicho combustible son transformados a sulfuro de hidrógeno (H_2S), que es eliminado del proceso para su posterior purificación y comercialización. La desventaja de la tecnología HDS es el límite de eliminación de azufre del combustible, siendo este umbral de alrededor del 95%. Los costos de operación serían de 190 USD/ton métrica removida. (Quiminet 2014).

Las tecnologías de desulfuración que se aplican durante la combustión, están basadas en la inyección de compuestos químicos absorbentes en el interior de la llama y participan en el proceso de combustión. Dichos

compuestos están constituidos principalmente por soluciones acuosas alcalinas de caliza, de manera que el dióxido de azufre formado en la zona de oxidación de la llama se neutraliza y es absorbido por esta solución con la subsiguiente formación de sulfatos. La desventaja principal de estas tecnologías es la disminución de la temperatura de la llama, ocasionando un incremento de partículas no quemadas en los gases de combustión, además de la formación de depósitos de sulfato de calcio en las tuberías de transporte de los gases de combustión.

Las tecnologías de desulfuración de poscombustión, conocidas también como tecnologías de desulfuración de gases de combustión o FGD (Fuel Gas Desulfurization, por sus siglas en inglés), constituyen el grupo más numeroso de las dos anteriores. Estas se refieren a que el material absorbente de SO_2 puede ser recuperado al final del proceso, y puede llevarse a cabo en un medio acuoso (húmedo) o seco. Cuando no ocurre la regeneración, el material absorbente se combina químicamente con el SO_2 , obteniendo subproductos que normalmente son comerciables.

Las tecnologías secas de poscombustión son más costosas que las húmedas, sin embargo, son más efectivas en la eliminación del SO_2 de los gases de combustión, alcanzando remociones de hasta el 99.99% (Perry & Green 1997). Comparando el costo de capital de la tecnología HDS con los costos de las demás tecnologías FGD, se puede observar que es relativamente económica, pero su costo de operación es relativamente alto, por el uso de hidrógeno durante el proceso. Otras de estas tecnologías son (Bill & Strommen 2005):

Spray-dryer: Los gases de combustión pasan a contra flujo en condiciones turbulentas, en un cono donde se atomiza una solución acuosa alcalina, formando una sal del absorbente correspondiente, generalmente basa-

do en calcio. Requiere poco espacio para su implementación y sus costos de capital son relativamente bajos. Sin embargo, esta tecnología no elimina a los óxidos de nitrógeno (óxido nítrico y bióxido de nitrógeno), ni el bióxido de carbono.

Hidrodesulfuración (HDS): El combustible fósil líquido es sometido a alta presión y temperatura, inyectando hidrógeno y en presencia de un catalizador, para reducir los compuestos orgánicos sulfurados presentes en dicho combustible a sulfuro de hidrógeno. El diseño de nuevos catalizadores adsorbentes reducirá aún más el costo de operación.

Desulfuración semi-seca: Es un proceso semi seco, basado en la reacción entre el SO_2 y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en condiciones húmedas. El sistema combina una operación simple con bajo costo y excelente desempeño. La tecnología es capaz de alcanzar 90-95% de remoción de SO_2 en un amplio rango de niveles de contenido de azufre. La utilización de Filtros de Manga en combinación con el sistema es en muchos casos ventajosa. La combinación con un precipitado electrostático es también una posibilidad. El sistema es de manutención muy simple y tiene requerimientos mínimos de espacio, además tiene un bajo costo de instalación. Los reactivos cuestan alrededor de 115USD/150 ton de SO_2 removido.

Biodesulfuración: Proceso en el cual se emplean microorganismos para remover sulfuros del medio. Se basa en la capacidad de ciertos microorganismos para oxidar compuestos reducidos de azufre transformados en compuestos de fácil eliminación. Este proceso posee una serie de ventajas como: bajos costos de inversión y de operación ya que utiliza equipos sencillos y de bajo consumo de reactivo, menor consumo energético al poderse trabajar a temperatura ambiente, así como, la posibilidad de eliminar tanto el azufre pirítico como parte del orgánico. Sin embargo, el procedimiento es lento, siendo ne-

cesario buscar nuevos microorganismos que reduzcan los tiempos de residencia y hagan más competitivo el proceso a nivel industrial. (Pérez & Villa 2012).

Las inversiones para instalar plantas de desulfuración pueden llegar a los 60 millones de dólares. Sin embargo, los costos varían en dependencia de las condiciones físico-geográficas en donde se va a instalar el sistema, de qué tipo va a ser y el contenido de azufre en el combustible. En la Refinería “Ñico López” habría que estudiar detalladamente sus condiciones para sugerir un sistema en específico. Como una primera aproximación, se seleccionaron dos técnicas más apropiadas que se adaptan a las características del territorio y las particularidades que tiene el combustible empleado en la Refinería: la desulfuración con agua de mar sería una opción válida, por su ubicación geográfica y la desulfuración utilizando piedra caliza o yeso, por la disponibilidad de estos materiales. La misma tendría un costo ligeramente menor que utilizar la piedra caliza / yeso, no necesita reactivos ni genera sub-productos; sin embargo, la necesidad de una planta de tratamiento de agua antes de verterla al mar generaría costos adicionales a la Refinería.

Desulfuración por agua de mar

Utiliza las propiedades inherentes al agua marina para absorber y neutralizar el dióxido de azufre. La absorción del SO_2 ocurre en una torre empacada, donde parte del agua de enfriamiento utilizada y el gas, en contracorriente, se ponen en contacto. No se necesita agregar ningún tipo de químico ni reactivo adicional. El agua de mar es alcalina por naturaleza, y tiene una gran capacidad de neutralización de los ácidos formados por la absorción del SO_2 .

Los sulfatos son ingredientes naturales del

agua de mar y solo hay un pequeño aumento de concentración de los sulfatos en el agua de mar que se descarga en el océano. Este aumento está dentro de las variaciones naturales del agua de mar y a corta distancia del punto de descarga esta diferencia ya es indetectable. Debido a que en este proceso el agua de mar pasa una sola vez por el sistema, el gas se enfriará aún más cuando pasa por el absolvedor. Generalmente, es necesario volver a calentar el gas antes de ser descargado a la atmósfera, para lo que se instala un intercambiador de calor. También se pueden utilizar chimeneas húmedas. Tiene bajos costos de operación y no se obtiene subproducto, aunque necesita espacio para instalar un sistema de tratamiento del agua antes de devolverla al mar. Resaltan como ventajas, la alta eficacia de desulfuración (se pueden obtener rendimientos mayores del 95 %) y la disponibilidad de agua de mar.

Desulfuración húmeda piedra caliza/yeso

Utiliza piedra caliza como reactivo para reaccionar con el SO_2 del gas, produciendo yeso (sulfato de calcio bihidratado) como subproducto. La piedra caliza se encuentra fácilmente disponible en grandes cantidades y el yeso es ampliamente utilizado en la industria de la construcción en la forma de paneles de yeso (construcción seca) y en mezclas de cemento. En caso de que el yeso producido no pueda ser reutilizado o vendido en una locación en particular, el material se puede disponer en forma segura en un relleno sanitario.

Las torres de atomización han demostrado ser la configuración óptima de absorbedor disponible para sistemas de desulfuración piedra caliza/yeso, debido a su confiabilidad, bajo potencial de formar depósitos de material, baja caída de presión y relación costo - beneficio. El gas ingresa en el absolvedor,

donde se dirige hacia arriba, a través de varios niveles de atomización en contra corriente. El SO_2 y otros gases ácidos (por ejemplo HCl, HF) se absorben por el barro reactivo, que cae en la parte inferior del tanque, conocida como tanque de reacción. Es aquí donde las partículas pequeñas de piedra caliza se agregan para neutralizar y regenerar el barro. Se inyecta también oxígeno en forma de aire comprimido para completar la reacción y formar el yeso. El barro de yeso se descarga del tanque de reacción hacia equipamiento de secado primario y secundario, donde el contenido de humedad se reduce al 8-10%. El yeso libre, como subproducto, puede entonces ser transportado a su destino final.

Los reactivos tienen un bajo costo (45 USD/65 ton de SO_2 removido), además de que su operación no requiere de grandes recursos económicos. En caso de que el yeso producido no pueda ser reutilizado o vendido (a un precio de 7 USD/1 ton de SO_2 removido) el material se puede disponer en forma segura en un relleno sanitario (a un costo de 13-33 USD/1 ton de SO_2 removido). Son capaces de lograr importantes eficiencias de colección (mayor que el 98%) y producir yeso con alto grado de calidad en una manera económica.

Los sistemas de desulfurización piedra caliza/yeso son capaces de lograr importantes eficiencias de colección y producir yeso con alto grado de calidad en una manera económica. El sistema de desulfurización por agua de mar es, químicamente, bastante similar al sistema de piedra caliza/ yeso, con la excepción de que no utiliza ningún reactivo sólido y no es necesario realizar la colección o precipitación de sólidos.

CONCLUSIONES

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales más notables en el

municipio Regla, debido a la alta incidencia que tiene en la salud de los habitantes. Se ha demostrado en diversos estudios que las emisiones de dióxido de azufre de la Refinería “Nico López” afectan a los consejos populares del municipio Regla, principalmente a Guacanamar. Consiguientemente, se han propuesto medidas para mitigar estas emisiones. En este trabajo las medidas presentadas van encaminadas a remover el contenido de azufre al final del proceso de combustión para evitar su emisión a la atmósfera mediante un sistema de desulfuración. De acuerdo con la caracterización físico-geográfica y socio-ambiental del territorio de estudio se propusieron dos técnicas de desulfuración postcombustión: la desulfuración por agua de mar y por piedra caliza/yeso.

LITERATURA CITADA

- BILL A & SO STROMMEN (2005) Tecnologías de Desulfurización de ALSTOM: Reduciendo emisiones de óxidos de azufre en plantas de generación de energía. Conferencia Exploring Power Plant Emissions Reduction-Technologies & Strategies: 1-10. Londres.
- CUESTA O, A COLLAZO, Y GONZÁLEZ, E CARRILLO, C SOSA, R MANRIQUE et al. (2012) Inventario de emisiones de las fuentes fijas industriales de La Habana. Programa Ramal Científico Técnico. La Habana.
- CUESTA O, A WALLO, A COLLAZO, C LÓPEZ, A CAMPOS et al. (2000) Caracterización del medio ambiente atmosférico en la ribera este de la Bahía de La Habana. Programa Ramal Científico Técnico. La Habana.
- ECOLOGISTAS EN ACCIÓN (2010) Retrieved Julio 28, 2014, from sitio web de: <http://www.ecologistasenaccion.org>
- FUNDACIÓN CRANA (2003) CRANA: Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra. Retrieved Julio 28, 2014, from sitio web del Gobierno de Navarra y Gestión Ambiental de Navarra S.A: <http://www.crana.org/es/>

- GÓMEZ C (2013) Economía Ambiental. Conceptos y Aplicaciones Prácticas. CITMATEL. La Habana.
- IPCC (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volumes I, II, III, IV, V. Japón: IPCC, NGGIP.
- LECHA L, LR PAZ & B LAPINEL (1994) El Clima de Cuba. Academia. La Habana
- MARTIATU L (2011). Impacto de emisiones estacionarias de refinerías de petróleo cubanas y posibles soluciones. La Habana: Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en Ingeniería en Saneamiento Ambiental.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. GOBIERNO DE CHILE (2014). Registro de Emisiones y transferencias de contaminantes. Retrieved Julio 28, 2014, from sitio web del Ministerio del Medio Ambiente: <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43789.html>
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2014) Norma Cubana. Calidad del aire contaminantes-concentraciones máximas admisibles y valores. Guías en zonas habitables. ICS: 13.040.
- ONEI (2013) ONEI. Retrieved mayo 14, 2014, from ONEI: <http://www.onei.cu>
- PÉREZ H & P VILLA (2012) Desulfuración biológica: una alternativa para el Tratamiento de Emisiones de Gases a la Atmósfera. Agua Latam 17-20.
- PERRY R & D GREEN (1997) Chemical Engineer's Handbook. In R. Perry, & D. Green, Chemical Engineer's Handbook (pp. 25-30). McGraw-Hill International Editions.
- QUIMINET (2014) Retrieved Julio 31, 2014, from <http://www.quiminet.com/productos/hidrodesulfuracion-guardas-de-azufre-3082253474/precios.htm>
- RAMOS LE, MT LLANES, A CAYMARES et al. (1996). Elementos de Meteorología y climatología. Editorial Academia. La Habana.
- RODAS, A., BLASS, G., & PANAMÁ, L. A. (2003). Tecnologías de desulfuración: pasado, presente y futuro. Boletín IIE , 3-8.
- RODRÍGUEZ LA (2015) Un caso histórico de contaminación de las aguas terrestres: de cómo el agua limpia ya regresó al río Managüimba. Voluntad Hidráulica 114: 12-17.
- VALDÉS A (2010) Repercusiones de la Gestión Ambiental Municipal de las Aguas Residuales Domésticas y Comerciales en las emisiones de Metano a la Atmósfera. La Habana: Tesis presentada en opción al grado de Máster en Gestión Ambiental.
- WALLO A, O CUESTA, A COLLAZO, P SÁNCHEZ (2004) Uso de los sistemas de información geográfica para el estudio de la calidad del aire en la bahía de La Habana. Revista Cubana de Meteorología 11: 26-36.
- WALLO A (2005) Evaluación del medio ambiente atmosférico y su influencia en la salud humana mediante el uso de SIG. La Habana: Tesis presentada en opción al grado Doctor en Ciencias Meteorológicas.

Recibido 24/7/2015; aceptado 28/12/2016