

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

NIVEL DE AFECTACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS EFECTOS EN LA INFRAESTRUCTURA DEL CAMPUS UNIVERSITARIO DEBIDO A LA EMISIÓN DE PARTÍCULAS PM10 Y CO

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

DAVID ISRAEL MOREANO BOHÓRQUEZ

ANTONIO STEFANO PALMISANO PATRÓN

ASESORA: Ing. Victoria Ramirez

Lima, Septiembre del 2012

RESUMEN

Esta tesis presenta los efectos de la contaminación atmosférica debido a emisiones de compuestos ocasionados por el parque automotor. Específicamente, se refiere al impacto producido por el Monóxido de Carbono (CO) y las partículas en suspensión menores a 10 micras (PM₁₀). Para ello se escogió un área de muestra en la Pontificia Universidad Católica del Perú. El campus universitario cuenta con vida silvestre, áreas verdes, tráfico de personas y vehículos, del mismo modo la infraestructura tiene gran contraste entre edificaciones nuevas y algunas que ya tienen muchos años bajo servicio, lo cual resultó idóneo por la forma en que se representa una sociedad real con actividad constante.

La importancia de éste tema radica en que, para evaluar el grado de afectación de éstos contaminantes, se necesita utilizar estándares de calidad internacionales (EPA) como parámetro de referencia de cómo nos encontramos en la actualidad y que problemas podrían ocasionar las cifras halladas. De la misma manera se elaboraron índices de calidad de aire (ICA) para daños en la infraestructura, no existentes en éste país, que nos muestran el grado de daño que se produce o existe en los distintos materiales involucrados en el campus y que tan graves son. Como materiales, se entiende al concreto armado, el acero y la mampostería.

El estudio realizado en ésta investigación es transversal, lo que significa que se debió escoger una muestra del universo a analizar y donde lo importante es demostrar su representatividad, la que se evalúa en el desarrollo de éste documento con ayuda de herramientas estadísticas. La metodología de toma de muestras se conoce como monitoreo densiométrico pasivo de la calidad del aire.

El resultado obtenido es que la contaminación existe, más por el lado de las partículas en suspensión que por las de monóxido ya que éste resultó por debajo de los estándares permitidos, por lo que se optó por utilizar datos vigentes de otro compuesto, SO₂ y de ésta manera poder desarrollar ecuaciones que nos expliquen la presencia de ciertos fenómenos y cuantificarlos. Las soluciones presentadas son conocidas como barreras verdes, las que debido a sus características propias, funcionan como filtros naturales para corregir o disminuir el efecto de las emisiones en los materiales estudiados.

ABSTRACT

This thesis presents the effects of air pollution due to compound emissions caused by motor vehicles, referred specifically to the impact produced by the carbon monoxide (CO) and suspended particulate matter less than 10 micrometers (PM₁₀). For this, a sample area at the Pontificia Universidad Católica Del Perú was chosen. The campus has wildlife, green areas, traffic of people and vehicles, the infrastructure also shows great contrast between new buildings and some others that have many years in service, which was suitable for the way it represents a real society in constant change.

The importance of this issue is that, to assess the degree of impact of these pollutants, it's required to use international quality standards as a benchmark of the pollution status nowadays and the problems these ciphers could cause. Similarly, air quality indexes (AQI) not available in this country were prepared. They show the level of damage that occurs or exists in the different materials involved in campus and how severe they are. As materials, we refer to concrete, steel and masonry.

The study in this research is transverse, which means choosing a sample to analyze the universe, and where the important fact is to demonstrate its representativeness, which is evaluated in the development of this document using statistical tools. The sampling methodology is called densitometric passive monitoring of air quality.

The final result is that contamination exists, more on the side of the suspended particles than monoxide because it was below the allowable standards, so the use of existing data from another compound, SO₂, was required. This way equations that explain the presence of certain phenomena and quantify them can be developed. The solutions presented here are known as green barriers that due to their characteristics act as natural filters to correct or lessen the effect of emissions in the materials studied.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título: Nivel de afectación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas PM_{10} y CO

Area: Impacto Ambiental

Asesora: Victoria Ramirez

Alumnos: David Moreano

Antonio Palmisano

Código: 19989021

19987707

Fecha: 27 de Septiembre 2010

Descripción y Objetivos:

Uno de los principales tipos de contaminación, es la contaminación del aire, la cual es una amenaza aguda, acumulativa y crónica para la salud humana y el medioambiente.

En el transcurso de la vida universitaria, el campus se ha convertido en un foco de vida, es decir, es el centro de reunión, estudio, alimentación y desarrollo de sus integrantes, los que en su gran mayoría, son estudiantes que suelen pasar más del 60% de sus días en él.

Debido a ello, con el transcurso de los años se ha visto una mejora continua en cuanto a distintos aspectos académicos y desarrollo de nueva infraestructura, lo que también significa la exterminación de grandes sectores de áreas verdes. Si a esto le sumamos que el campus se encuentra al lado de una de las avenidas más grandes de Lima Metropolitana y a su gran cercanía a muchas áreas sin protección, entonces tenemos un sector perfecto para ser estudiado.

En ésta tesis se evaluarán los niveles de afectación de los contaminantes en el medio ambiente tomando distintas muestras en las áreas más afectadas, se analizará cada una para determinar la cantidad de partículas de CO y PM_{10} (Plomo) presentes y se verá el impacto de éstos en la infraestructura del campus, especialmente en aquellas construcciones hechas con concreto armado, albañilería y elementos metálicos.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título: Nivel de afectación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas PM_{10} y CO

Indice.

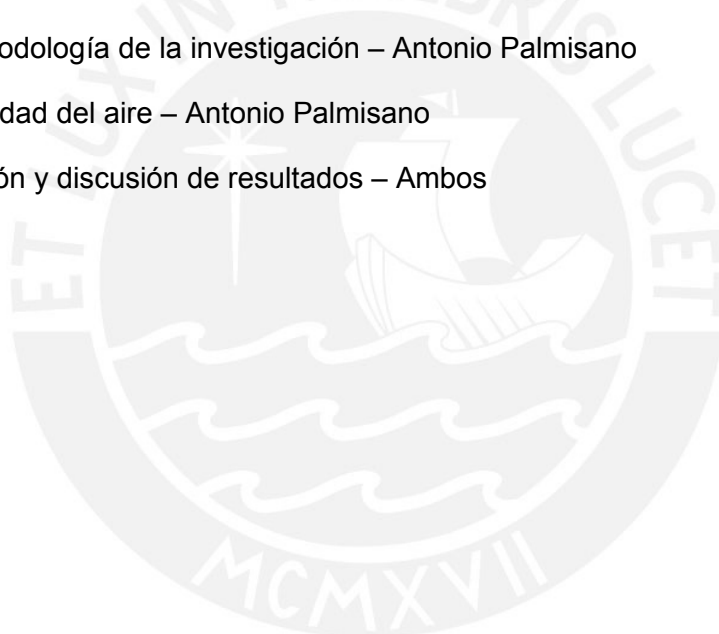
Introduccion

1. Descripción de la problemática – David Moreano
2. Panorama actual de la contaminación – David Moreano
3. Metodología de la investigación – Antonio Palmisano
4. Calidad del aire – Antonio Palmisano

Presentación y discusión de resultados – Ambos

Bibliografía

Anexos



Dedicatorias:

“A mis padres Raúl y Mary por su gran esfuerzo y sacrificio, por su apoyo incondicional durante todo ésta travesía universitaria y por su empeño por darme un futuro mejor”

David Israel Moreano Bohórquez

“A mis padres y abuelos por su apoyo incondicional durante toda la carrera y a mi compañero de tesis David ya que gracias a su perseverancia y apoyo se ha podido concluir el estudio que aquí presentamos”

Antonio Stefano Palmisano Patrón

Agradecimientos:

A nuestros familiares por el constante aliento y motivación. A “ellas”, por su paciencia y comprensión y especialmente a Vicky y Alexis que nos demostraron que lo que más importa, además del profesionalismo, es la calidad de persona que uno es.

“El secreto de la sabiduría, del poder y del conocimiento es la humildad”

Ernest Hemingway

INDICE

	INTRODUCCION	10
1.	CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	11
1.1.	Definición de aire	11
1.2.	Características del aire como fluido	11
	1.2.1 Composición del Aire	12
1.3	Principales contaminantes del aire	12
	1.3.1 Material particulado (PM)	12
	1.3.2 Dióxido de azufre (SO ₂)	13
	1.3.3 Monóxido de carbono (CO)	13
	1.3.4 Plomo (Pb)	13
	1.3.5 Dióxido de carbono (CO ₂)	13
1.4	Transporte de contaminantes	14
	1.4.1 Principios de transporte y dispersión	14
	1.4.2 Transporte de los contaminantes	14
1.5	Consecuencias de la contaminación del aire	15
	1.5.1 Afectación a la Salud	15
	1.5.2 La lluvia ácida	15
	1.5.3 Smog	16
	1.5.4 Efectos de la Contaminación del aire en las estructuras	16
	I. Los Metales	17
	a. Efectos en el ambiente	17
	b. Efectos debido al clima	17
	c. Efectos del SO ₂	17
	d. Efectos de las partículas en suspensión	18
	II. El Concreto Armado	18
	a. Química del cemento y del concreto	19
	b. Reacciones de Carbonatación	19
	c. El Dióxido de Azufre y Ácido Sulfúrico en el Concreto	21
	III. Albañilería y Morteros	21
	a. Efectos de contaminantes en los ladrillos	21
	b. Efectos de los contaminantes en el mortero	22
	c. Interacciones entre ladrillo y mortero	23
1.6	Desarrollo del Interés en estándares de la calidad del aire	24
	1.6.1 Necesidad teórica de contar con Índices de Calidad (ICA)	25
	1.6.2 Necesidad práctica de contar con Índices de Calidad	26
2.	CAPITULO II: PANORAMA ACTUAL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA INFRAESTRUCTURA	28
2.1.	Deterioro de monumentos en Europa	28
	2.1.1 Patrimonio cultural y calidad del aire en Europa	28
	2.1.2 ¿Qué agentes producen la contaminación?	29
	2.1.3 Tecnología para el control de las emisiones	29

2.2	Estudios realizados en la ciudad de Arequipa-Perú	30
2.2.1	Las Patologías analizadas en Arequipa	31
	a. Disgregación	31
	b. Eflorescencias o neo formaciones	31
	c. Salinización	31
2.2.3	Los Daños	32
	a. Perdidas de la superficie original	32
	b. Cambio en la coloración	32
	c. Acumulación irreversible de materiales nocivos en las superficies	32
2.3	Estado actual de la calidad del aire en la ciudad de Lima.	32
2.3.1	Dióxido de azufre en Lima	33
2.3.2	Partículas totales en suspensión en Lima	33
2.3.3	Partículas menores a 10 micras	34
3.	CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	35
3.1	Objetivos	35
3.2.	Hipótesis	35
3.3	Tipo de estudio, Modelo de Análisis y Muestreo	35
3.4	Limitaciones y validación del estudio	36
3.5.	Procedimiento a utilizar para la captura de contaminantes	38
3.6	Cálculos de la Divergencia	42
4.	CAPITULO IV: CALIDAD DEL AIRE EN LA PUCP	48
4.1.	Monóxido de carbono (CO)	48
4.2	Partículas mecánicas (PM10)	49
4.3	Resultados Obtenidos en la elaboración de un ICA dentro del Campus Universitario	50
5.	CAPITULO V: PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	55
5.1	Regresión del ICA y ecuación resultante	55
5.2	Contaminación y daño a la infraestructura.	59
	5.2.1 Resumen del procesamiento de los casos para SO ₂ y PM ₁₀ en conjunto.	60
5.3.	El concreto armado, la carbonatación y los depósitos de PM ₁₀ en la PUCP	64
5.4	El fenómeno de las Eflorescencias (Daños en albañilería y morteros)	66
5.5.	Efectos de los árboles en el entorno Urbano ante los contaminantes. Solución ante los problemas de depósito de partículas	67
	5.5.1 Los árboles y el clima en la PUCP	67
	5.5.2 Protección contra el viento y Control de la contaminación	68

6.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6.1	Conclusiones con respecto a los objetivos planteados	70
6.2	Recomendaciones el grado de impacto de los contaminantes en la infraestructura	73
	FUENTES BIBLIOGRAFICAS	78



INTRODUCCION

Desde hace varios años, el aumento de las emisiones de gases invernadero ha ocasionado preocupación en la sociedad, quizás por los distintos cambios climáticos que se han venido experimentando o porque ahora existen pruebas contundentes del abuso por parte del hombre en contaminar indiscriminadamente el planeta.

Según diferentes estudios que se citan en cada capítulo, uno de los principales tipos de contaminación es la contaminación del aire. La exposición a éste tipo de contaminación puede estar influido por la magnitud, alcance y duración de la misma, además del daño que ocasionaría a los seres vivos y a cualquier elemento presente como la infraestructura u obras de arte de una ciudad. Hoy en día, distintos factores como el incremento de la población, el crecimiento económico, el desarrollo del país, y la reducción de las áreas verdes son una muestra de la forma en que afectamos el medio natural.

Esta tesis consiste en estudiar el nivel de afectación de la contaminación en el campus con ayuda de índices de calidad del aire (ICAs), tomando distintas pruebas en el área de estudio para cuantificar mediante un muestreo la concentración de partículas de monóxido de Carbono (CO) y partículas suspendidas de material particulado (PM₁₀) en el ambiente, se ofrece una comparación con resultados formulados y normados, además de ver el impacto en la infraestructura del lugar, en particular, aquellos elementos construidos con concreto armado, acero y albañilería. Para ello se estudiará otro de los contaminantes involucrados, el dióxido de azufre (SO₂), cuya relación con los materiales mencionados se aprecia detalladamente en capítulos posteriores.

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se considera contaminación ambiental a la presencia en el medio ambiente de uno o más contaminantes, para poder cuantificarlos se han elaborado en muchos países estándares que nos indican los límites a los cuales dichos contaminantes pueden ser tolerados por el ser humano. Estos límites, de ser excedidos, afectarían en mayor o menor medida nuestro entorno causando desequilibrio ecológico y daños a la salud y el bienestar. A medida que aumenta el poder del hombre sobre la naturaleza y aparecen nuevas necesidades como consecuencia de la vida en sociedad, el medio ambiente que lo rodea se deteriora cada vez más. La más conocida institución reguladora de contaminantes en el mundo es la EPA o Environmental Protection Agency de los Estados Unidos, sin embargo, a pesar de conocer éstos estándares y el daño que le causan al ser humano, no existen indicadores referidos a otros temas que no sean la salud, como por ejemplo el daño en la infraestructura.

Para empezar con ésta investigación es necesario explicar primero algunas definiciones de las variables a considerar y de manera progresiva ir estudiando como elaborar éstos indicadores así como los beneficios que conllevaría aplicarlos.

1.1 DEFINICIÓN DE AIRE

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define al aire puro como *“la mezcla de gases, vapor de agua y partículas sólidas y líquidas cuyo tamaño varía desde unos cuantos nanómetros hasta 0.5 milímetros los cuales en su conjunto envuelven al globo terrestre”* (OMS, 2004).

1.2 CARACTERÍSTICAS DEL AIRE COMO FLUIDO

Según la mecánica de fluidos *“el aire es como un conjunto de moléculas distribuidas al azar que se mantienen unidas por fuerzas cohesivas débiles y por fuerzas ejercidas por las paredes de un envase”* (Insunza, 2007). También puede considerarse como “envase” a la atmósfera en general que gracias a las fuerzas de gravedad se extiende hasta un volumen determinado.

1.2.1 Composición del Aire

Los principales gases que conforman el aire son el Nitrógeno y el Oxígeno (con un porcentaje de 78.08% y 20.95% respectivamente), destacando el Argón entre los menos comunes, con 0.93%. Todos los componentes del aire deben encontrarse en equilibrio en la atmósfera de acuerdo a los porcentajes señalados. Si se agregara alguna sustancia en cantidades mayores a las que normalmente posee, el aire se contaminaría. De la misma manera sucederá para el resto de gases (0.04%). Estos contaminantes incluyen: Ozono Troposférico (O_3), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), Monóxido de Carbono (CO), óxidos de material particulado (PM), entre otras. (Swisscontact, 2004:7)

1.3 PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE

Según Roberts Alley (2009:2) los problemas de calidad del aire están relacionados con diferentes factores: geofísicos, meteorológicos y socioeconómicos, éste último debido a la presión ejercida por el crecimiento de la economía y población. La población, el desarrollo industrial y la dependencia por los motores de combustión interna explican el incremento sostenido de las emisiones gaseosas y material particulado, los cuales han sobrecargado la capacidad natural del aire para diluirlos.

Los contaminantes más importantes derivados de los combustibles fósiles (diesel, gasolina, petróleo y gas), que son los más usados por automóviles y buses antiguos en nuestro país y América latina son: el material particulado (PM), Dióxido de Azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_2), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). Todos éstos compuestos componen lo que usualmente conocemos como humo negro vehicular. (Roberts A, 2009:5)

1.3.1 Material Particulado (PM)

De distintos estudios documentados por la Organización Mundial de la Salud, el principal problema del aumento en el parque automotor es la emisión de material particulado, el cual consiste en sustancias sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera. (2005:23)

El material particulado menor a 10 micrómetros de diámetro (PM_{10}) corresponde de uno a dos tercios de las emisiones totales de material particulado. La principal afectación a la salud que puede producir el PM_{10} es su acumulación en los pulmones y daño de los mismos (OMS, 2005:24). De la misma manera generan daño a la infraestructura debido a su acumulación y asentamiento, como se verá más adelante.

1.3.2 Dióxido de azufre (SO₂)

Según Gerard Kiely (1999:446), el dióxido de azufre es un gas denso, más pesado que el aire y muy soluble en agua, que constituye el principal contaminante derivado del azufre presente en los combustibles. Forma núcleos de condensación y por eso generan problemas de visibilidad en la atmósfera que corroen materiales y son producidos la lluvia ácida.

En el caso de las edificaciones la exposición dilatada conlleva a otros problemas que se suelen asociar a fenómenos conocidos como “típicos” en la ingeniería sin percatarse que podrían ser evitados o al menos disminuir su influencia en los daños que ocasione.

1.3.3 Monóxido de Carbono (CO)

Alrededor del 70% proviene de fuentes móviles pues prácticamente todo emana por la combustión incompleta de los vehículos a motor. La concentración de CO es un parámetro adecuado para el seguimiento de la contaminación primaria de origen vehicular, porque su determinación es comparativamente sencilla respecto a otros contaminantes atmosféricos. Además, se puede utilizar para establecer correlaciones con otros contaminantes primarios, en particular óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y material particulado. Este hecho es relevante para inferir la evolución horaria de material particulado en suspensión, cuya determinación sobre períodos cortos de tiempo es más dificultosa, y permitirá obtener indirectamente concentraciones de compuestos orgánicos volátiles, previo análisis de la composición de la flota vehicular y la distribución de vehículos por tipo de combustible. (Defensoría Del Pueblo, 2009)

1.3.4 Plomo (Pb)

En los motores de los autos que trabajan con combustible, al quemarse la gasolina con Plomo, que sigue siendo uno de los carburantes más utilizados en Lima metropolitana debido a su precio en comparación de otros que no lo contienen. Allí se producen sales de Plomo como los cloruros, bromuros y óxidos que ingresan al ambiente a través de los tubos de escape (Aguilar O, 1997) y que tienen efectos abrasivos en distintos materiales.

1.3.5 Dióxido de Carbono (CO₂)

Conocido como el principal responsable del efecto invernadero, se produce por la combustión de carburantes fósiles y en la respiración de vegetales y animales. Es parte importante en procesos como la fotosíntesis y la respiración, así como a ayudar a

mantener en la tierra una temperatura habitable siempre y cuando se establezca en cantidades determinadas. Los productos fósiles referidos son el petróleo y carbón, que en conjunto con todas las actividades humanas llegan a ser un 22% de la actual concentración de CO₂ en la atmósfera. Esto genera el gran cambio climático que se siente en el Perú y que ya es conocido como uno de los más vulnerables al cambio de clima global. ([Defensoría Del Pueblo, 2009](#))

1.4 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

1.4.1 Principios de Transporte y Dispersión

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria explica que el transporte y dispersión de contaminantes del aire están influenciados por variaciones de clima y las condiciones topográficas locales. Los principales factores del transporte y dispersión son el viento o movimiento horizontal y la estabilidad o movimiento vertical. La dispersión de contaminantes de una fuente depende de otro fenómeno conocido como turbulencia. Esta puede ser creada por el movimiento horizontal y vertical de la atmósfera.

La velocidad del viento puede afectar en gran medida la concentración de contaminantes en un área, mientras mayor sea, menor será la concentración. El viento se genera por las diferencias en la presión atmosférica. La presión es el peso de la atmósfera en un punto dado. La altura y temperatura de una columna de aire determinan el peso atmosférico. Debido a que el aire frío pesa más que el caliente, la masa de alta presión está constituida de aire frío y pesado. Por el contrario, una masa de baja presión de aire está formada por aire más caliente y liviano. Las diferencias de presión hacen que el aire se mueva de las áreas de alta presión a las de baja presión.

La estabilidad de la atmósfera también afecta el transporte y dispersión de los contaminantes del aire. Esta se origina por condiciones atmosféricas inestables. Generalmente, durante el día el aire cerca de la superficie de la tierra es más caliente y liviano que el aire en la atmósfera superior debido a la absorción de la energía solar. El aire caliente y liviano de la superficie sube y se mezcla con el aire frío y pesado de la atmósfera superior que tiende a bajar. Este movimiento constante crea condiciones inestables y dispersa el aire contaminado. Cuando hay una ligera mezcla vertical o no hay mezcla, los contaminantes permanecen en la zona baja y tienden a aparecer en concentraciones mayores. ([CEPIS, 2005:VI](#))

1.4.2 Transporte de los contaminantes.

Al considerar el ataque de contaminantes del aire, primero se debe considerar el proceso de transporte, las concentraciones y el tipo de contaminantes químicos. La longitud de tiempo que los contaminantes permanecen en la atmósfera, la distancia que recorren, y las concentraciones atmosféricas que alcancen dependerá de las condiciones meteorológicas y de los procesos de deposición.

Los procesos para el transporte en la superficie de la atmósfera generalmente se consideran en dos grandes grupos – deposición seca y deposición húmeda. A la deposición seca se le define como la recaudación directa de especies gaseosas y particuladas sobre una superficie. Los procesos involucrados son complejos y se puede considerar en términos de la “velocidad de deposición” que es una combinación de la concentración atmosférica y la resistencia de la superficie a la deposición.

Para la Deposición húmeda, se debe considerar la incorporación de contaminantes en las nubes (Rainout) que se liberan cuando hay una precipitación (Washout) o una combinación de ambos. Una vez más, este es un proceso complejo, que implica la intensidad de la lluvia, su origen y la exposición previa de la superficie. ([Brimblecombe 2003:229](#))

1.5 CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Entre algunas de las consecuencias que genera la contaminación del aire se citarán las más relevantes para éste estudio:

1.5.1 Afectación a la Salud

La exposición a contaminantes del aire puede causar efectos agudos (corto plazo) y crónicos (largo plazo) en la salud. Usualmente, los efectos agudos son inmediatos y reversibles cuando cesa la exposición al contaminante. A veces los efectos crónicos tardan en manifestarse, duran indefinidamente y tienden a ser irreversibles. ([CEPIS, 2005](#)).

1.5.2 Lluvia Ácida

Además de los efectos sobre la salud mencionados anteriormente, hay muchos otros efectos secundarios sobre la vegetación, suelo, agua, materiales hechos por el hombre, clima y visibilidad.

“La lluvia ácida se forma cuando los contaminantes del aire, tales como el dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) se transforman en ácidos en la atmósfera. Posteriormente, la precipitación resultante (lluvia, nieve o niebla) deposita los ácidos en lagos y suelos. El control de la lluvia ácida se ha convertido en una preocupación internacional, ya que a menudo la fuente de estos contaminantes se encuentra alejada del lugar donde se registran los efectos” (CEPIS, 2005)

1.5.3 Smog

En grandes ciudades como México D.F, Nueva York, Santiago de Chile y Lima, se puede observar una nube gris en el cielo que cubre generalmente toda la ciudad, a esta nube se le llama "smog" y se forma por la acumulación de agentes contaminantes en la atmósfera. Entre estos agentes contaminantes están: El Monóxido de Carbono, el Óxido de Azufre y el Carbón que en general se presentan inicialmente como polvo negro que se forma por la quema incompleta de la gasolina y otros productos derivados del petróleo. (Vizcarra, 2006)

1.5.4 Efectos de la contaminación del aire en las estructuras

Brimblecombe de la University Of East Anglia en el libro “The effects of Air Pollution on The Build Enviroment”, presenta el estudio detallado de los efectos que se producen en la infraestructura debido a los contaminantes presentes en el ambiente. En él se menciona que la degradación de los materiales de construcción debido a la naturaleza suele ser relativamente lenta, y como resultado, la vida de servicio normal de las mismas es superior al tiempo en que los daños graves se producen. Sin embargo, también menciona que la contaminación del aire, especialmente en forma de deposición ácida ha acelerado la tasa de degradación de algunos materiales de tal manera que el costo de mantenimiento se ha incrementado. Según su investigación, el enfoque en los últimos años, ha estado en las tasas de degradación cada vez mayor de las estructuras arquitectónicas y monumentos, y se atribuye a los efectos de la contaminación de dióxido de azufre, monóxido de carbono y partículas en suspensión.

En los últimos 120 años, la mayor parte de las investigaciones se ha concentrado en metales y no metales. Como no metales, se refiere específicamente a la piedra, ya que se ha dejado de lado otros materiales de construcción de gran importancia en nuestro medio como son el cemento, la mampostería y los morteros. Estos últimos son

susceptibles al ataque de la contaminación del aire, aunque la tasa y magnitud suele ser mucho más baja que para las piedras calcáreas y metales.

I. Los Metales

Los contaminantes atmosféricos que se emiten por la quema de combustibles fósiles tienen un grave impacto sobre los metales expuestos en el entorno construido provocando la pérdida de resistencia mecánica y el fracaso de los revestimientos de protección. Hay muchos parámetros en la atmósfera que pueden influir en la corrosión de los metales, el proceso de degradación es una compleja interacción entre los químicos, los parámetros físicos y biológicos. El estudio se centra en los contaminantes atmosféricos y sus efectos sobre el entorno construido, es decir, los aspectos específicos de la situación urbana. (Brimblecombe, 2003:227)

a. Efectos en el Ambiente

Los contaminantes más importantes en calidad de agentes corrosivos son el azufre y los compuestos nitrogenados. Ha quedado claramente demostrado que los contaminantes incrementan el proceso natural de corrosión de varios materiales metálicos, aun así hasta ahora ha sido difícil cuantificar la contribución directa de contaminantes individuales diferentes del dióxido de azufre (SO_2) en el proceso de meteorización.

b. Efectos Debido al Clima

Los efectos climáticos tienen efectos directos e indirectos en la corrosión de los metales. Los efectos indirectos incluyen, por ejemplo, mezcla de menos y más altos niveles de concentración de contaminantes, presentes cuando hay una inversión de temperatura. La investigación de Brimblecombe sólo describe efectos directos. (Kucera y Matson, 1987)

c. Efectos del SO_2

En el campo de la corrosión atmosférica el SO_2 es el gas simple más investigado de los contaminantes gaseosos. Es un hecho indiscutible que su efecto es perjudicial sobre los materiales en general. Sistemáticas exposiciones de laboratorio en la década de 1930 demostraron su efecto corrosivo en los metales. Se sospecha que la causa de la acidificación son los compuestos de azufre emitido a la atmósfera.

Considerado como el principal contaminante corrosivo, incluso a bajos niveles, el SO_2 es todavía uno de los principales actores en la nueva situación de múltiples contaminantes,

aunque no tan dominante como en el pasado. El SO_2 se disuelve en las capa de humedad asentadas en el material formando sulfito y, después de la oxidación forma sulfatos. Este proceso resulta en una acidificación de la capa de humedad, lo que incrementa el proceso de corrosión. La tasa de deposición del SO_2 depende de los materiales, es a menudo más alto para los materiales más sensibles, y varía entre 0,01 y 2 cm/s. (Kucera y Matson, 1987)

d. Efectos de las partículas en suspensión

Las partículas normalmente aumentan, pero en algunos casos puede disminuir la tasa de deterioro de los metales. El efecto de las partículas en la corrosión puede ser directo o indirecto. Las partículas antropogénicas se pueden dividir en primarias y secundarias. Las partículas primarias son emitidas directamente de la combustión, tienen una vida útil relativamente corta y se depositan cerca del origen. Las partículas secundarias son más pequeñas, menos de 2 μm , de larga vida, y son el resultado de reacciones químicas entre otros contaminantes, entre otras cosas SO_2 , NO_2 , compuestos orgánicos volátiles y amoníaco. Las gotas de ácido sulfúrico resultante de la oxidación del SO_2 , pueden ser neutralizadas por las partículas que forman el amoníaco de sulfato de amonio. Del mismo modo, las partículas de nitrato de amonio pueden formarse a través de la neutralización de HNO_3 , aumentando así la corrosión. Además, cuando el agua se absorbe y luego se evapora, el amoníaco gaseoso es liberado a la atmósfera, como resultado el aire genera daños debido a la acidificación de la capa acuosa que puede aumentar la tasa de corrosión.

Las partículas que contienen sal desempeñan un papel importante en la corrosión atmosférica y esto se relaciona con su capacidad para aumentar el tiempo de humedad. Ellas son higroscópicas y empiezan a absorber el agua cuando la humedad relativa supera un nivel crítico, determinado por las propiedades ideales de equilibrio de una solución saturada de sal. Sin embargo en la práctica las partículas que se depositan en la superficie son una mezcla de diferentes compuestos resultando difícil de definir una humedad relativa crítica. (Brimblecombe, 2003:234)

II. El Concreto Armado.

El concreto y sus refuerzos de acero, son bastante utilizados en la actualidad, es sabido que son susceptibles al ataque de ácidos, pero aún no se ha establecido que tan susceptibles son al ataque de los compuestos que se encuentran en la composición de la atmósfera, como el CO_2 o las partículas en suspensión.

a. Química del Cemento y del Concreto

El concreto tiene como materiales principales cemento, agregados y agua, que generan hidróxido de calcio, que es un material sumamente alcalino ($\text{pH} = 12.5 - 13.0$), produciendo pasivación en el refuerzo de acero que se encuentra embebido en el concreto. Se sabe que el metal es protegido de la corrosión por una fina capa de óxido en toda su superficie. La capacidad del concreto para actuar como una barrera física frente a la penetración de los componentes agresivos del medio ambiente es fundamental en el proceso de degradación, sobre todo cuando el refuerzo está protegido. Lamentablemente, el concreto no es una barrera perfecta, debido a su sistema de poros y continua tendencia a formar grietas superficiales, es sabido que una mayor proporción agua-cemento (w/c) lleva a una mayor porosidad y como resultado mayor permeabilidad tanto para los gases como líquidos. (Verbeck, 1958)

Debido a su alta alcalinidad, el concreto es objeto a ataques ácidos y generalmente se presentan en cuatro formas:

- (1) La disolución de los compuestos de cemento hidratado y sin hidratar.
- (2) Disolución de agregados calcáreos.
- (3) Tensiones física inducidas por la deposición de sales solubles de la reacción ácido / álcali y la subsiguiente formación de nuevas fases sólidas dentro de la estructura de los poros.
- (4) Corrosión debido a las sales inducidas en el acero de refuerzo.

b. Reacciones de Carbonatación

La carbonatación tiene que ver con el pH de un material, el pH del concreto puede cambiar por el ingreso de diversas sustancias desde el medio ambiente, entre ellas, el CO que se convierte rápidamente a CO_2 cuando entra en contacto con el oxígeno y el SO_3 . Estos compuestos se producen por la combustión de combustibles fósiles. De estos, el primero es de mayor importancia, de ahí el nombre de carbonatación.

Inicialmente el CO_2 no es capaz de penetrar profundamente dentro del concreto, debido a que reacciona de acuerdo al concreto superficial o recubrimiento, dando como resultado un cambio en el pH (de 13 a 9). Aunque la porción de mezcla externa del concreto se carbonata rápidamente, el CO_2 continúa su ingreso a mayor profundidad y cuando el pH alrededor del acero de refuerzo es cercano a 9, la capa de óxido protector pierde su estabilidad termodinámica, dando paso a la corrosión del acero. A la profundidad que el CO_2 ha penetrado y a la modificación del pH, generalmente se le llama frente de carbonatación. (Rodríguez, 2010)

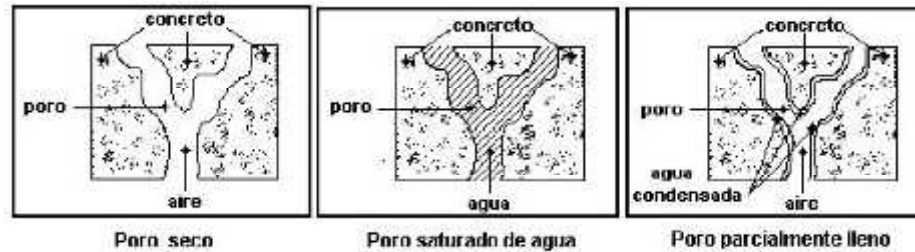


Fig. 2.1 Proceso de corrosión en el concreto por carbonatación.

Fuente: (Rodríguez J, 2010:43)

En la primera figura vemos el caso cuando el poro está seco y la carbonatación no puede ocurrir debido a la falta de agua. Este caso sólo se presenta en concreto que está sobresecado, como ocurre en climas muy secos. Si los poros están llenos de agua como en la segunda figura hay apenas alguna carbonatación debido a la poca difusión del CO_2 en agua, que es el caso de estructuras sumergidas. En el tercer gráfico se muestra que si los poros están parcialmente llenos de agua, la carbonatación puede proceder hasta un espesor donde los poros del concreto están secos. Los parámetros que determinan la velocidad de carbonatación, son: la composición y cantidad del cemento, la compactación, condiciones de curado y las condiciones ambientales de exposición del concreto.

En resumen, las reacciones de carbonatación se ven limitadas a la cantidad de humedad presente y requieren de la presencia de un poco de humedad condensada para ser significativas. Las condiciones más favorables se presentan a una humedad relativa entre el 50 y el 70% en un ambiente expuesto alternadamente entre húmedo y seco. Esta máxima se explica por la interacción de los poros del agua/ CO_2 . A humedades bajas hay agua insuficiente en los poros como para disolver el CO_2 resultantes, lo que no genera ningún grado significativo de reacción. Sin embargo, la carbonatación puede ocurrir fácilmente en condiciones de saturación pero el CO_2 tendría que difundirse a través de la capa superficial carbonatada para llegar a la zona de reacción. La difusión gaseosa será un proceso lento si los poros están saturados de agua dando como resultado una tasa máxima de carbonatación a humedades intermedias. (Brimblecombe, 2003:112)

La reacción de carbonatación se da en las paredes de los poros y se ha demostrado que ésta disminuye la permeabilidad a los gases en el concreto. Esto indica que el crecimiento de cristales de calcita en los poros aumenta, obstruyéndolos, lo que provoca una desaceleración de los procesos de transporte al frente de reacción.

c. El dióxido de azufre y ácido sulfúrico en el concreto

El SO_2 y el concreto reaccionan para producir sulfito de calcio, el cual en condiciones secas generan una reacción que se limita a la superficie, pero en la presencia de humedad dicha reacción se hace más significativa. La tasa de deterioro del hormigón se ha demostrado que aumenta con el aumento de contenido de cemento, en su relación agua /cemento o concentración ácida. También se ha demostrado que el ataque ácido es un fenómeno superficial con un deterioro que, como su nombre indica, empieza en la superficie del concreto y se propaga hacia el interior del mismo. Un estudio posterior, realizado en el Laboratorio de Investigación Abiko, que consistía en exponer muestras de concreto a "la lluvia ácida artificial" encontró que la profundidad de la erosión que sufrían las muestras estaba relacionada con el pH, y que después de 4000 mm de lluvia, oscilaron entre 0,2 mm a un pH de 5,6 y a 1,4 mm a un pH de 2,0. Esto indica que la precipitación ácida provoca la erosión de la superficie por lixiviación de los iones de calcio de la matriz de cemento de hormigón. ([Brown y Clifton, 1988](#))

III. Albañilería y Morteros

El deterioro en los muros de albañilería es un problema complejo debido a los elementos variables del ladrillo y mortero. Cada componente puede tener una gran variación en su composición y estructura que resulta en un gran número de combinaciones cuando se utilizan juntos. Ladrillo y mortero son susceptibles al ataque ácido en cierta medida, pero poco se sabe sobre los efectos de los depósitos de partículas en los ladrillos de obra.

El mortero también reacciona con los iones de sulfato y otros, resultando en la expansión, erosión y deterioro estructural. El transporte de sales en los elementos puede generar un ataque químico y agravar el problema debido a la recristalización.

La composición y la historia de la cocción de ladrillos junto con la composición e historia de producción del mortero complicarán aún más el problema. ([Brimblecombe, 2003:118](#))

a. Efectos de contaminantes en los Ladrillos

La matriz vidriosa del ladrillo es similar al ácido vítreo de silicato, y como resultado es probablemente el componente más susceptible a la disolución por soluciones ácidas, alcalinas o neutras.

En el año 1982, se estimó que la solución de H_2SO_4 que se forma por contaminantes aumento la disolución del bloque en 10 veces. Sin embargo, dado que el máximo de la

disolución del bloque suele ser de 1%, las sales resultantes, debido a su pequeña cantidad, sólo dañan la apariencia, observándose manchas y eflorescencias. En el año 1980 se encontró que un ladrillo saturado de agua y en una atmosfera que contiene SO_2 causaba un mayor deterioro aumentando la porosidad y el tamaño de los poros. A pesar de los contaminantes en la atmosfera el efecto en el ladrillo sería mucho más lento que en otros elementos vítreos. Es debido a que la composición de la matriz vidriosa, es razonablemente alta en iones Al^{3+} , mientras que los niveles de iones Na^+ y K^+ bajos. Esto llevaría a producir un vítreo de alta durabilidad y probablemente explica por qué el ataque de ladrillo debido a la deposición ácida no parece ser un problema. (Hoffman, 1976).

b. Efectos de los contaminantes en el mortero.

Aunque la naturaleza del mortero ha cambiado considerablemente con el tiempo, la albañilería moderna es por lo general una mezcla de cemento Portland, arena y cal. El efecto de la deposición ácida dependerá del mortero utilizado en particular.

Los Morteros de cal hidráulica no dependen de la exposición al aire para endurecer, la cal apagada, es decir, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacciona con el CO_2 en la atmósfera; el endurecimiento, carbonatación y secado se producirá de forma simultánea, resultando en una contracción de volumen. La reacción de fraguado encima de los resultados formara calcita, lo que implica que se comportará de manera similar a una piedra arenisca débilmente adherida. Cuando consideramos los ataques aéreos de contaminantes, la deposición del SO_2 puede resultar en la formación de yeso, que por recristalización podría inducir tensiones mecánicas en la matriz de configuración del mortero. (Hoffman, 1976).

El mortero de cemento hidráulico que contiene cemento Portland es atacado por las precipitaciones ácidas provocando ablandamiento y la desintegración de la superficie. El sulfato derivado de las reacciones que se presentan puede degradar aún más el mortero al reaccionar con aluminato de calcio (C_2A) para producir estringita o Sal de Candlot, sustancia que en exceso es dañina para el cemento.

La formación de estringita y la formación de yeso en éste proceso son reacciones expansivas y puede dar lugar a la formación de grietas en el mortero o el ladrillo dependiendo del movimiento del agua. Martínez-Ramirez (1996) utilizó una cámara de exposición para examinar el efecto de diferentes combinaciones de gases sobre el mortero de cal (1:3 de cal: Agregado). Los resultados mostraron que si tanto el agua como un oxidante se presentan, entonces la formación de sales se incrementa enormemente. Sus resultados también mostraron que, en condiciones de cámara, el SO_2

en combinación con el agua y el O_3 eran mucho más reactivos que el NO o NO_2 en condiciones similares. Existen estudios de exposición de morteros a largo plazo en las siguientes concentraciones 1:1:6 (Cemento: cal: arena) y 1:3 (cemento: arena) con un inductor de aire.

Scholl y Knofel (1991) en su trabajo en pasta de cemento, señalan una forma diferente de deterioro de los morteros. En él se describen los cambios de color en los morteros que se atribuyen a la oxidación del hierro en el cemento. Ellos la vinculan a la disolución de hidróxido de calcio en la superficie del mortero que resulta en una concentración de hierro. La carbonatación del portland se discutió antes, sin embargo agua de lluvia, acidificada con CO_2 , se filtra con $CaCO_3$ de la superficie, debilitando la estructura de cemento ligeramente. En general, se ha observado que el efecto de la carbonatación total duplica la fuerza de morteros de cemento Portland. (Martínez-Ramírez, 1996)

c. Interacciones entre el ladrillo y mortero.

El Mortero parece ser el único componente del ladrillo atacado por deposición ácida, pero el grado de susceptibilidad a los solventes químicos es bastante baja. Sin embargo, es posible que las sales producidas por los reactivos de los ataques aéreos de contaminantes puedan provocar daños en la mampostería. Otra fuente de sales son los propios ladrillos que puede contener Na_2SO_4 . Esto ocurre si el combustible utilizado durante la cocción es rico en azufre o las temperaturas de cocción no son suficientes para descomponer la sal.

Se ha demostrado que las porosidades relativas del ladrillo y el mortero son importantes, con el material más poroso la sal causa un deterioro inducido. Si el ladrillo y mortero tienen propiedades similares, la descomposición ocurrirá en la unidad de albañilería en su conjunto y tomará más tiempo. La porosidad del ladrillo también es importante cuando se considera la configuración del mortero. Si el ladrillo contiene grandes tamaños de poros (> 20 mm), el efecto de succión es bastante bajo, la investigación de Goodwin y West's (1982) indica que esto produce una fuerte relación mortero/ladrillo debido a la mejor adherencia que se da con el cemento Portland y la estringita, porque puede cristalizarse en los poros del ladrillo, sin embargo existen otras investigaciones que muestran que la pobre adherencia del mortero se debe a la succión de agua por parte del ladrillo. (Martínez-Ramírez, 1996)

1.6 DESARROLLO DEL INTERÉS EN ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AIRE.

Según Brimblecombe (2003), para poder entender la evolución en el interés de las consecuencias que producen los contaminantes en el aire, se deben detallar brevemente distintos sucesos que llevaron a desarrollar estándares de calidad de aire mundiales y que hoy sirven como base para sustentar éste estudio.

En la década del '70 el Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza fomentó una serie de programas de cooperación internacional. Entre ellos, figura el Programa Internacional de Cooperación para los Efectos de la Contaminación Atmosférica sobre los Materiales, éste dio lugar a una larga serie de estudios a petición de la Comisión Económica de Europa. En 1980 el Congreso de los EE.UU. autorizó a la Comisión Nacional de Evaluación de Programa de Precipitación Ácida (NAPAP), un grupo de trabajo interinstitucional bajo los auspicios del Consejo de Calidad Ambiental.

En la década siguiente, NAPAP había producido una serie de informes llamados "Deposición ácida: Estado de Ciencia y Tecnología". El programa fue autorizado de nuevo a través de la Enmiendas de la Ley de Aire Limpio de 1990 y examinó las tendencias de las emisiones, deposición y efectos, para evaluar los beneficios esperados de la legislación del mismo año al dar estándares que permitieran controlar los contaminantes. Se estudiaron los efectos en materiales de construcción importantes, tales como el acero y otros metales, albañilería, concreto y los materiales de importancia cultural tales como mármol, piedra caliza y bronce.

Actualmente al efecto de la contaminación del aire en los materiales de construcción se ha vinculado con la protección del patrimonio cultural, lo que ha despertado un progresivo incremento de interés público con éste tema y se debe a que los daños ya son perceptibles visualmente y no se ha tomado ninguna medida para revertirlos. Uno de los fenómenos que más llama la atención es el constante aumento de los efectos debido a la lluvia ácida, que se dio a conocer entre los años 1970 y 1980. Otra anomalía se debe a la deposición de dióxido de azufre, que ha sido acumulada durante siglos. (Brimblecombe, 2003). Cabe mencionar también que en los 70's se fundó una entidad relacionada a todos éstos temas llamada Environmental Protection Agency o EPA que hoy en día es una de las más importantes entidades de éste tipo a nivel internacional y que tiene distintos procesos y protocolos de cómo controlar nuestras emisiones y los daños que ocasionan. Del mismo modo, en las últimas décadas, se ha enfatizado en las consecuencias que pueden producir los contaminantes en otras áreas ajenas a la salud

como es el caso del daño a la infraestructura, a pesar que aún no se han elaborado indicadores, restricciones ó medidas que ayuden a mitigar éstos daños.

1.6.1 Necesidad teórica de contar con Índices de Calidad del Aire (ICA)

Según la EPA el ICA se obtiene como resultado de aplicar una función de transformación a los datos de niveles de concentración de contaminantes atmosféricos medidos en una determinada zona. Dicho índice es un valor o un número que indica posibles efectos de la contaminación atmosférica en las actividades que realiza el hombre.

Hasta el momento los ICA elaborados están referidos a los problemas que podrían ocasionar en la salud del hombre, sin embargo, conociendo sus principales características y objetivos se podrían elaborar ICA para distintos fines.

Al igual que la tabla 1.1, los ICA deben entenderse de manera sencilla y a su vez deben proporcionar información clara para cualquier persona.

Características	Objetivos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ser de fácil comprensión para el público. ▪ Debe existir un valor con el cual puede ser comparado. ▪ Tener un significado espacial claro. ▪ Incluir los contaminantes atmosféricos para los que existen normas y criterios de calidad. ▪ Tener una base científica. ▪ Permitir relacionar la calidad del aire con la toma de decisiones de emergencia en el caso de un episodio de contaminación. ▪ Mostrar las variaciones diarias de los niveles de contaminación. ▪ Ser consistente con los niveles de contaminación percibidos por el público. ▪ Aplicable a escala nacional o regional, según sea el caso. ▪ Relacionar la calidad del aire con posibles daños en el ambiente y en la salud humana, y ▪ Ser estimado a corto plazo (24h) con suficiente confiabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporcionar a la población información clara y confiable de los niveles de contaminación a que está expuesta y de los riesgos que dicha contaminación implica. ▪ Apoyar mediante un sistema sencillo de evaluación y predicción de las condiciones de contaminación de un área a la activación de planes de atención. ▪ Ser útil para que el público comprenda las estrategias de control instrumentadas por los tomadores de decisiones en caso de episodios de contaminación atmosférica.

Tabla 1.1 Características y objetivos del ICA
Fuente: Propia

En resumen los ICA se consideran indicadores globales orientativos de la calidad del aire enfocados al público en general, en un momento determinado o día y en una estación de

monitoreo concreta. Consiste en un valor adimensional calculado a partir de los valores registrados en las estaciones de medida y se estima teniendo en cuenta los valores límites establecidos y los efectos nocivos de varios contaminantes, en éste caso citamos los siguientes: a) dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión menores a 10 micras (PM_{10}).

Para cada uno de estos contaminantes se establece un índice parcial, de forma que el peor valor de los cuatro definirá el índice global y, por lo tanto, la calidad del aire (véase Tabla 1.2)

PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	SO_2 (ppb)	NO_2 (ppb)	Valores del Índice
24 horas	8 horas	24 horas	1 hora	
0 - 54	0 - 4.4	0 - 34		0 - 50
55 - 154	4.5 - 9.4	35 - 144		51 - 100
155 - 254	9.5 - 12.4	145 - 224		101 - 150
255 - 354	12.5 - 15.4	225 - 304		151 - 200
355 - 424	15.5 - 30.4	305 - 604	650 - 1240	201 - 300
425 - 504	30.5 - 40.4	605 - 804	1250 - 1640	301 - 400
505 - 604	40.5 - 50.4	805 - 1004	1650 - 2040	401 - 500

Tabla 1.2 Índice de calidad del aire de la EPA
Fuente: Environmental Protection Agency
En: www.epa.gov

El valor del índice estará comprendido entre 0 y 500, de modo que cuanto mayor sea el índice, peor será la calidad del aire. El valor del índice 0 corresponderá a una concentración nula de contaminante, y el valor 100 estará asociado al valor límite fijado, a partir del cual habría que informar a la población por protección.

1.6.2 Necesidad práctica de contar con índices de calidad.

El deterioro de la calidad del aire puede en muchos casos percibirse con facilidad, especialmente en las grandes ciudades donde viven millones de personas, al disminuir la visibilidad del paisaje o causar irritación de los ojos, garganta, etc. La calidad del aire local, afecta la vida diaria. Sin embargo, más allá de ver el aire limpio o no, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad, mediante la medición de la concentración de los contaminantes que se presentan.

El Índice de Calidad del Aire (AQI, por sus siglas en inglés) es una herramienta usada por la EPA (Environmental Protection Agency Of USA) y otras agencias para proveerle al

público información clara, directa y rápida para que puedan comprender sobre la calidad del aire y tomen las medidas para que no afecte. Cuando el ICA se representa con los colores verde y amarillo (valores del ICA menores de 99), la calidad del aire se considera satisfactoria para la mayoría de la población. Valores por encima de 100 (naranja, rojo) son considerados como perjudiciales a la salud humana, sobre todo a grupos sensibles de la población; y los colores púrpura y marrón corresponden a valores del ICA por encima de 200, los cuales producen el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población en general. En la tabla 4.4 se aprecia la escala de valor propuesta. Para la aplicación de la escala de colores se tomaron como referencia los índices utilizados por la EPA en el 2010.

Niveles de calidad del aire y su impacto en la salud	Valores del Índice	¿Qué medidas deben tomar las personas?
Bueno	0 - 50	La calidad del aire es satisfactoria, y la polución del aire es baja no riesgo.
Moderado	51 - 100	La calidad del aire es aceptable, sin embargo para un grupo sensitivo de la población, podrían verse ligeramente afectados por la contaminación.
Dañino para la salud de los grupos sensitivos	101 - 150	Grupos sensitivos: Reduzcan o pospongan actividades vigorosas al aire libre cuando se detecte la presencia de los siguientes contaminantes: Contaminación por partículas: personas con enfermedades cardiacas o pulmonares (incluyendo los diabéticos) adultos de edad avanzada y niños. Monóxido de carbono: Personas con enfermedades cardiacas y posiblemente fetos e infantes.
Dañino para la salud	151-200	Todos: Reduzcan o pospongan las actividades vigorosas al aire libre. Grupo sensitivos: Eviten todas las actividades físicas al aire libre.
Muy Dañino para la salud	201 - 300	Todos: Reduzcan considerablemente las actividades físicas al aire libre. Grupo sensitivos: Eviten todas las actividades físicas al aire libre.
Critica o Peligroso para la salud	301 a más	Condición de emergencia la salud peligrá, toda la población será afectada.

Tabla 1.3 Escala visual del ICA

Fuente: Air Quality Index

En: www.airnow.gov

CAPITULO II

PANORAMA ACTUAL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA INFRAESTRUCTURA

Para poder entender el panorama actual de la contaminación atmosférica se citarán algunos casos en donde ya desde hace algunos años se ha empezado a mostrar interés por el grado de contaminación presente. Se verá como se ha tomado el asunto en países Europeos así como en nuestro territorio, en la ciudad de Arequipa y Lima. Todos estos casos ya no están relacionados únicamente a la salud sino a la preocupación por los daños que presenta su Infraestructura producto de la contaminación presente.

2.1 DETERIORO DE MONUMENTOS EN EUROPA.

“Actualmente las edificaciones y los monumentos históricos de más de una docena de países europeos están experimentando una corrosión acelerada. Así, por ejemplo, en Grecia, el Partenón ha sufrido más en los últimos 30 años el efecto de la erosión de lo que lo hizo durante los 2.400 anteriores” (Baudran,2005)

Lo Descrito por Baudran tiene que ver con las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, que se convierten en ácidos fuertes que atacan tanto a edificios antiguos como nuevos, siendo los más afectados los objetos y estructuras de materiales fácilmente degradables, como la caliza y la piedra arenisca. En Europa en los últimos años se han venido desarrollando estudios que demuestran que el motivo del deterioro de sus monumentos está relacionado con el grado de contaminación del aire presente.

Otro caso que se conoce no muy lejano a Europa es aquel en que científicos del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA) estudian las alteraciones de los materiales empleados en monumentos históricos de Marruecos (África) en colaboración con investigadores locales. En éste caso la piedra que más se emplea en ese país para la construcción de edificios destacados es una roca arenisca conocida como calcarenitas. El objetivo del estudio fue analizar qué factores influyen en ese deterioro, entre los que está el clima y los contaminantes del aire. (SINC, 2010)

2.1.1 Patrimonio Cultural y Calidad del Aire en Europa

En el artículo *The City Of Tomorrow and Cultural Heritage* (Sabionni, 2010) se explica que durante 20 años los expertos en restauración han estudiado el daño ocasionado a los

antiguos monumentos por los agentes contaminantes del aire. Por ello, los gestores de las ciudades y los responsables de elaborar las políticas a escala nacional empiezan a considerar estos daños como una cuestión de planificación urbana, y a tomar en cuenta otros efectos a la hora de evaluar las opciones para reducir la contaminación.

Actualmente, en la industria de la construcción europea está empezando a utilizarse detallados estudios científicos del daño ocasionado a los antiguos monumentos por la reacción entre el mortero de cemento y el dióxido de azufre en la contaminación del aire. Se presta principal atención a la combustión de hidrocarburos en los motores de combustión interna ya que al emplearse desprenden CO, NOx y SO₂, lo que en combinación con el agua de la humedad ambiental o lluvia forman ácidos que al precipitarse generan deterioro en todos los materiales involucrados afectándolos según sus propias características.

2.1.2 ¿Qué agentes producen la contaminación?

La mayor fuente de mayores emisiones de contaminantes a la atmósfera es la producción de energía, seguida del transporte y otras actividades industriales. Diferentes estudios han demostrado que España es uno de los mayores emisores de contaminantes entre los países industrializados. En ellos se atribuyen las grandes cantidades de óxidos, partículas en suspensión y compuestos orgánicos volátiles a la industria energética. Si a ello se añade la contribución del transporte y refinerías la condición empeora. Sin embargo, el sector industrial ha ido reduciendo sus emisiones a causa de la disminución de la actividad y la sustitución de combustibles por nuevas alternativas de energía. (Sabionni, 2010)

2.1.3 Tecnología para el control de las emisiones

Hedin, Lars O. y Likens, Gene E. (1997) en su investigación del Polvo atmosférico y Lluvia ácida aseguran que tanto las plantas de combustión como los vehículos pueden equiparse con tecnología de control de emisiones y eliminar hasta en un 90% las de carácter acidificante pero que en el futuro será necesario sustituir el carbón y otros combustibles fósiles. Para el caso particular del SO₂, se explica que se puede actuar en tres puntos distintos del ciclo para reducir las emisiones: eliminando el azufre del combustible, durante la quema o desulfurando los gases emitidos. Sin embargo para el caso el caso de CO o PM₁₀, no se mencionan soluciones factibles, lo cual es preocupante debido a que son emisiones que van en aumento día a día.

2.2 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA CIUDAD DE AREQUIPA-PERU

El arquitecto Gonzalo Ríos Vizcarra, el arqueólogo Pablo de la Vera Cruz Chávez, el ingeniero Rivalino Guzmán Ale y la química farmacéutica Violeta Hilario Blas, realizaron un estudio en la ciudad de Arequipa para determinar los daños que causa la contaminación atmosférica en la infraestructura del lugar, explicaron los factores contaminantes y presentaron datos sobre las particularidades mineralógico - geoquímicas del proceso de degradación en el centro histórico de la ciudad. Las muestras se estudiaron mediante microscopía óptica, análisis químicos, difracción de rayos X, espectroscopia Mosbauer, Microscopía electrónica de barrido y ensayos mecánicos.

Los resultados obtenidos muestran que la composición mineralógica, las particularidades geoquímicas y los procesos de alteración de las muestras, que en ése caso en particular eran de sillar, difieren en la composición de la capa externa de la parte interna; siendo más pronunciada en monumentos de alta densidad vehicular.

Según los autores: Los agentes que contribuyen en mayor o menor medida a la alteración de los elementos componentes del material del que están hechas las edificaciones y los monumentos arquitectónicos y dan lugar a la aparición de las formas de deterioro son: el agua, los contaminantes atmosféricos, las sales solubles y los organismos vivos. El agua es el más importante agente de alteración, ya que actúa también como vehículo de transporte de otras sustancias.

De la misma manera en el mismo informe se señala que la presencia de sales solubles en las edificaciones de valor patrimonial es de consideración dado que esta se aprecia a simple vista en varias de las construcciones analizadas. Estas sales ocasionan daños físicos y químicos en el sillar cuando se cristalizan en su interior o en la superficie. Sin embargo su grado de nocividad es variable y depende no solo de las características de la sal sino también de las condiciones ambientales, como variaciones de humedad, temperatura etc. Las sales solubles mas frecuentes son los sulfatos, seguido de los cloruros, carbonatos y nitratos. El deterioro producido por las sales solubles puede llevarse a cabo a través de varios mecanismos, siendo los más generalizados la cristalización y la hidratación. En el primer caso los daños se producen cuando las tensiones locales generadas por el empuje del cristal al crecer en el interior de un poro o microfisura sobrepasan la resistencia a la tracción de la roca. En el segundo caso, el paso de la sal anhidra a la hidratada comporta asimismo presiones en las paredes de los poros, las cuales pueden provocar fenómenos disruptivos. (Vizcarra G,2006:8).

Efectos similares se suelen dar en el concreto armado, dependerá en todo caso de su

porosidad. Para ello habrá que tratar el pH del mismo y el fenómeno de carbonatación.

2.2.1 Las Patologías analizadas en Arequipa.

Si bien el estudio se realizó en la ciudad de Arequipa y el material analizado fue el sillar, vale la pena mencionar aquellas patologías que tengan relación con la investigación actual.

a. Disgregación

De acuerdo a Pablo de la Vera se llama así a la desintegración de los materiales entre sus elementos macroscópicos, que conllevan a la destrucción paulatina de todo el elemento. Su característica fundamental es presentarse de manera granular y los elementos se hacen literalmente “polvo”. ([Vizcarra, 2006:20](#))

b. Eflorescencias o neo formaciones

Se conoce así al proceso de formación de cuerpos sobre la superficie de cualquier elemento, puede darse en un punto o en toda el área. La causa se da por la transformación de los elementos solubles propios del material que como consecuencia de agentes como el agua en sus diferentes formas de actuación, dan origen a la formación de nuevos cuerpos sólidos de que se acumulan en toda la superficie.

Son fáciles de reconocer visiblemente porque parecen costras. El daño surge cuando al desprenderse arrastran parte de la superficie original de los elementos arquitectónicos como por ejemplo la mampostería. Se ha observado que esta patología tiene relación con la acumulación de sólidos producto de la contaminación vehicular en áreas donde existe mayor congestión. Las neo formaciones se suelen caracterizar por su color negruzco. Este color también es al que comúnmente se le conoce como humo negro producto de la mala combustión en los motores del parque automotor.

c. Salinización

Suele asociarse cuando se tiene contacto con sustancias salinas, los procesos son más en presencia de agua por capilaridad y humedad. La característica fundamental de la salinización es la formación de eflorescencias o cristalizaciones de sales sobre la superficie, suelen tener una coloración blanca. El daño surge cuando la cristalización de las sales se hace dentro de los elementos en su parte cercana a la superficie y sobre ella misma. La dilatación de los componentes salinos provoca la separación y ruptura de la estructura del elemento. Respecto a su relación con el monóxido de carbono, se ha

observado que la acumulación por sedimentación de éste contaminante acelera el proceso de daño. (Vizcarra, 2006:21)

2.2.2 Los Daños ocasionados en Arequipa

Las patologías mencionadas anteriormente originan daños irreversibles y muchas veces esto genera la pérdida de elementos de la estructura en general. Este aspecto exige acciones inmediatas de conservación para frenar los daños, además de requerir la implementación de políticas adecuadas para prevenirlos y/o atenuar su gravedad.

“a. Pérdida de la superficie original: La superficie original de los monumentos se deteriora como consecuencia de las patologías antes descritas. Lo mismo aplica para el caso de morteros de albañilería y decoloración de superficies de concreto. Estos procesos de degradación se hacen mas graves cuando se aplican procedimientos inadecuados de limpieza o más radicales de intervención de sus superficies. Este daño es irreversible y afecta “integralmente” a todo un monumento.

b.Cambio en la coloración: Los monumentos pierden su característica de limpieza en sus superficies, lucen grises o negros

c.Acumulación irreversible de materiales nocivos en las superficies: La contaminación del ambiente origina la acumulación de sólidos que en contacto con el agua se endurecen en la superficie de los elementos de la arquitectura originando manchas y costras que difícilmente pueden ser retiradas. Este daño es irreversible y ocasiona la pérdida de los elementos escultóricos de los monumentos, como son sus cornisas, anagramas y otros”

(Vizcarra, 2006:23)

Más adelante se verá que condiciones similares se presentan en los materiales analizados en nuestro estudio.

2.3 ESTADO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE LIMA

Pocas son las investigaciones que se han hecho en Perú con respecto a la calidad del aire, sin embargo, en el año 2009 la defensoría del Pueblo elaboró el Informe 134 que cogía como base otro informe de años atrás, Informe N°116, en el cuál se analizaba la situación de la calidad del aire en Lima en base a los datos proporcionados por el Programa de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), que desde 1999 registró las concentraciones de algunos de los contaminantes atmosféricos a través de cinco estaciones fijas de monitoreo. Los contaminantes monitoreados fueron: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas totales en suspensión y partículas menores a 2.5 micras. (Defensoría del Pueblo, 2009)

A pesar que todo éste acápite está relacionado con cuadros y datos relacionados a los estándares pertinentes a la salud, será uno de los referentes principales que se utilizará para elaborar toda nuestra investigación.

2.3.1 Dióxido de azufre en Lima

El Informe Defensorial N°116 muestra que DIGESA hasta el año 2007 ha obtenido datos en cinco estaciones de monitoreo (Callao, Lima Sur, Lima Este, Lima Norte y Lima Ciudad). En el caso de la estación Lima-Ciudad se tuvo el valor de $75.18\mu\text{g}/\text{m}^3$ aunque no se superó el valor consignado por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA), de $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ anual, se estaba muy próximo a hacerlo. Sin embargo, otro valor establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) daba otra cifra equivalente a $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ la cuál se superaba hasta en un 50%. (Defensoría del Pueblo, 2006:24).

2.3.2 Partículas totales en suspensión en Lima

En los años 2006 y 2007, los valores promedio registrados en las estaciones de monitoreo salvo la del Callao, superaban ampliamente el estándar establecido por la EPA (Environmental Protection Agency) que viene a ser de $75\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto significa que sigue manteniéndose una gran exposición de la población a este contaminante y que su aumento es progresivo. (Defensoría del Pueblo, 2006:27).

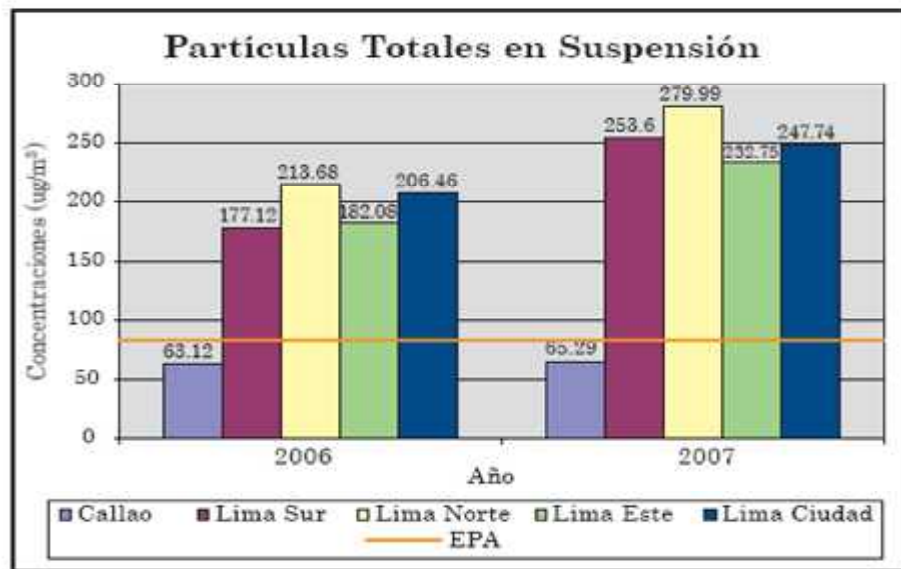


Fig. 2.3 Concentración de Partículas totales en suspensión en los diferentes conos de la capital

Fuente: DIGESA (Defensoría del Pueblo, 2006)

2.3.3 Partículas menores a 10 micras en Lima

A partir del 2007, DIGESA comenzó a monitorear el material particulado menor a 10 micras, el cual no había sido analizado antes por lo que no existe un registro sobre el mismo. De la data obtenida, se señaló que sólo en el año 2007 las estaciones ubicadas en Lima Ciudad, Lima Este y Lima Norte exceden el estándar anual, igual a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; superando además el valor consignado en la guía de la OMS (igual a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

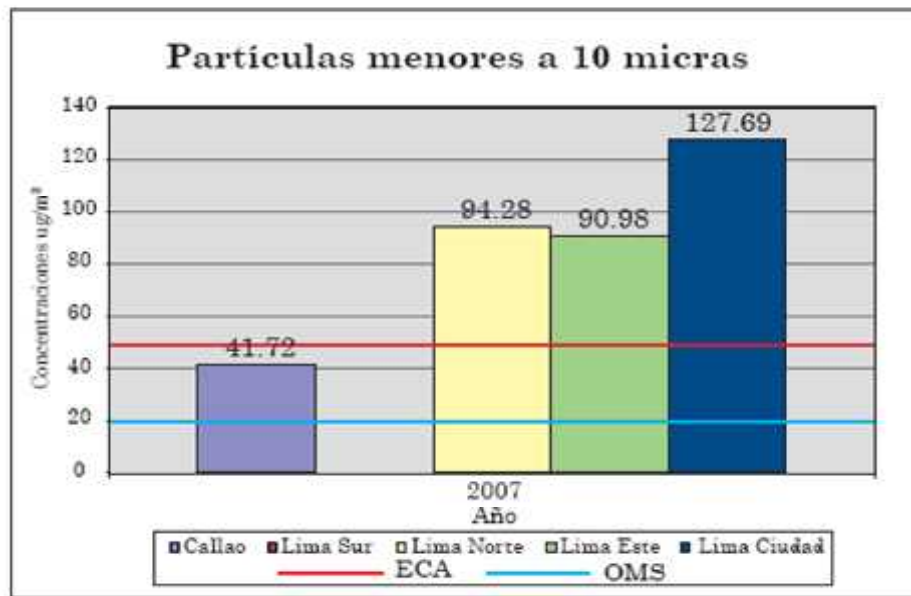


Fig. 2.4 Concentración de Partículas menores a 10 micras en los diferentes conos de la capital

Fuente: DIGESA (Defensoría del Pueblo, 2006)

Se atribuye el material particulado al incremento del parque automotor que dado a sus altos índices pueden generar serios problemas tanto para el entorno como para los ciudadanos. (Defensoría del Pueblo, 2006:29)

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 OBJETIVOS

- Describir el estado de los contaminantes del aire: partículas de CO, PM₁₀ y SO₂ en el campus universitario.
- En base a la investigación, cuantificar los daños que podrían ocasionar los contaminantes y medir su nivel de respuesta

3.2 HIPÓTESIS

1. La contaminación atmosférica del campus está explicada en función de los valores (Divergencia) ambientales del contenido de partículas de CO, PM₁₀.
2. La contaminación atmosférica provoca una afectación (daño) a los materiales expuestos, como es el caso de metales, concreto y albañilería, así como de los acabados.
3. Los daños ocasionados son posibles de remediar por medio de la aplicación de medidas ingenieriles, que prolongarían la vida útil de la infraestructura en general.

3.3 TIPO DE ESTUDIO, MODELO DE ANÁLISIS Y MUESTREO

Como se menciona en capítulos previos, el alcance del estudio es transversal y de acuerdo a la estrategia de investigación es de dos tipos: descriptiva y explicativa.

Descriptiva porque en un inicio se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, se describe el fenómeno de la contaminación ambiental y su impacto en la infraestructura y en las personas

De la misma manera se dice que es Explicativa porque va más allá de sólo describirla, se encuentran las causas de los eventos, sucesos y fenómenos físicos y sociales. Se busca la relación entre las distintas variables que conforman el fenómeno y se plantean soluciones. (Hernández, Fernández y Baptista 2007:66)

El modelo de muestreo utilizado es un modelo de caja descrito por la EPA (Wiertz, 2008). Este modelo asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas, para ello, se

considera que la mezcla es prácticamente instantánea y que los contaminantes son químicamente estables al permanecer en el aire.

El método de muestreo de campo es conocido como monitoreo densiométrico pasivo, que en nuestro caso fue por placas en torre o columna que gracias a herramientas matemáticas pueden convertirse en un volumen de aire.

Existen distintos casos del uso de éste método modificado para diferentes situaciones, a nivel internacional, Campbell y Norman (USA, 1998) brindan con detalle la utilización y propósitos del monitoreo modificándolo para sus propios propósitos. A un nivel mas local, DIGESA (Perú, 2005) brinda ciertos protocolos para muestreos de aire, sin embargo, las limitaciones de éste estudio determinarán la representatividad del análisis y los resultados que se obtuvieron.

3.4 LIMITACIONES Y VALIDACIÓN DEL ESTUDIO.

En éste estudio se da a conocer el nivel de afectación de algunos contaminantes en el entorno del campus para cuantificar el daño que éste causaría en la infraestructura. Para ello, se eligió un sector estratégico de análisis que reuniera todas las variables necesarias. Es decir, encontrar una muestra a ser estudiada que fuera parte representativa del conjunto universo para así, posteriormente, poder extrapolar nuestros resultados a otros sectores bajo condiciones similares. El campus universitario reunía éstas condiciones: vida silvestre, áreas verdes, tráfico de personas y vehículos, infraestructura de gran contraste entre edificaciones nuevas y algunas que ya tienen muchos años bajo servicio, es decir que representa perfectamente una sociedad real con actividad constante. Sin embargo, a pesar de cumplir como lugar de estudio, se presentaron distintas limitaciones

Tiempo de exposición: La cantidad de horas a las que tenían que estar en exposición las estaciones de monitoreo, sin ninguna protección, representaba un gran problema. Según indican estudios similares, el tiempo mínimo a ser evaluado debería cubrir el plazo de una semana (asumiendo que la muestra no se retira en ése lapso y que son pocas estaciones). Para el modelo de monitoreo con el que se trabajó (Pasivo), las mediciones se llevaron a cabo únicamente en tres ocasiones debido a otra limitación importante, el presupuesto. Se debía tener en consideración que los monitoreos debían hacerse durante días útiles (Lunes a Viernes), bajo el criterio de que los fines de semana la actividad disminuye considerablemente tanto dentro del campus como en el tráfico vehicular dentro y fuera de la Universidad.

Presupuesto limitado: Se optó por uno de los procedimientos más económicos existentes, aun así, el presupuesto se extendía mucho más allá de lo que en un principio se había planificado. De las 3 mediciones hechas, una se conoció como prueba beta (Monitoreo de Corrección).

Permisos de Toma de muestras: Una de las mayores limitaciones del estudio estaba relacionada a los permisos por parte del área de infraestructura y seguridad de la universidad, los permisos se extendían al plazo de una semana pero no se había determinado en ellos que las estaciones de monitoreo interrumpirían el libre acceso vehicular y peatonal.

Agentes Externos: La mayoría de muestras recopiladas en esa semana, consistía en dejar 42 estaciones durante todo el día, la magnitud geográfica que se abarcaba era cercana a 1.5 hectáreas lo que dificultaba su control y vigilancia, en más de una ocasión se perdieron varias muestras. Los agentes externos eran la fauna presente, los alumnos, los autos y el viento.

Error de diseño: La prueba beta, tuvo una pérdida del 46% de las muestras, el diseño inicial de los trípodes (estaciones) tenía varias fallas por lo que se debió corregir inmediatamente.

Datos Nulos: De las tres mediciones, Los datos tomados analizados son aquellos pertenecientes a principio y fin de semana (Lunes y Viernes) siguiendo la lógica que dichas muestras debieron haber estado colocadas durante todo ese lapso. La medición beta sirvió para reemplazar todos los datos extraviados o absurdos durante los otros monitoreos. Otra herramienta para corregir éstos vacíos fue la media aritmética de las placas pertenecientes a una misma estación.

Distancia de Estaciones: Las distancias de separación de las estaciones tuvieron que ajustarse para no interrumpir el libre tránsito de cada zona por lo que se optó por separar cada estación 20m entre horizontales (Ej.: Entre A1 y B1) y 30m entre las perpendiculares (Ej:Entre A1 y A2).

Tipo de Muestreo: Existen distintos tipos, están los muestreadores activos, los pasivos, los analizadores automáticos y los remotos (Revisar Anexo 1: apéndice 4.7).

Se escogió el muestreo pasivo ya que ofrecen un método simple y eficaz en función de los costos para realizar el sondeo de la calidad del aire en un área determinada. La tecnología que utiliza es muy simple ya que sólo necesita un material absorbente o adherente además de estar en exposición durante un determinado período (generalmente varía entre una semana y un mes). Los bajos costos por unidad permiten muestrear en varios puntos del área de interés, lo cual sirve para identificar los lugares críticos donde

hay una alta concentración de contaminantes, como las vías principales o las fuentes de emisión, y donde se deben realizar estudios más detallados. Para aprovechar al máximo esta técnica, se debe contar con un diseño cuidadoso del estudio y vigilar los procedimientos de aseguramiento y control de la calidad seguidos en el gabinete durante el análisis de las muestras.

Conociendo todas éstas limitaciones, los resultados se considerarán como válidos una vez hecha la estadística correspondiente y escogiendo el modelo que más se ajuste a la curva que arrojen nuestros resultados.

3.5 PROCEDIMIENTO A UTILIZAR PARA LA CAPTURA DE CONTAMINANTES

El procedimiento utilizado en la toma de muestras consiste en la colocación de una serie de trípodes (cada trípode sostiene 3 placas) donde se colocaron pequeñas placas de vidrio untadas con un adherente (vaselina transparente). De ésta manera se capturaban las partículas presentes en el medio en distintos puntos del campus. Cada uno de estos puntos está siguiendo un orden en una cuadrícula donde se estableció previamente su ubicación en el área a estudiar. A cada punto se le conoció como estación y se le denominó con una letra del alfabeto, dependiendo de su posición cercana o lejana a la Av. Universitaria se le adicionaba un número. Las líneas más cercanas tenían el número 1, las intermedias el 2 y las más alejadas el 3.



Fig. 3.1 Plano de la Universidad Católica donde se aprecia la cuadrícula usada para el muestreo.

Fuente: Departamento de Infraestructura PUCP.

Las muestras se dejaban expuestas durante todo un día y el proceso se repitió hasta en 3 ocasiones abarcando el territorio que delimita desde la intersección del pabellón de Ingeniería con el Centro Pre-Universitario CEPREPUC hasta el área de Oficinas Administrativas detrás del Edificio Mc. Gregor (ver Fig. 3.1)

Las placas de adherencia constaban de pequeñas láminas de vidrio de 10x10cm (2cm de un lado se insertaban en las ranuras del trípode) y 4mm de espesor. Estas placas estaban a distintas alturas, 0.10, 0.90 y 1.50m (fig. 3.2), para poder conformar un volumen de aire (modelo de caja). La distancia de los puntos estaba relacionada a los permisos y restricciones de accesos de personas y vehículos dentro del campus. Los trípodes de acero corrugado se hicieron debido a su bajo costo, era mucho más económico y sencillo de elaborar que haber utilizado elementos de madera u otro material. Se utilizó soldadura para obtener la forma adecuada y sujetadores en forma de ranura para colocar los vidrios posicionados en distintos ángulos para poder funcionar en cualquiera de las direcciones del viento.

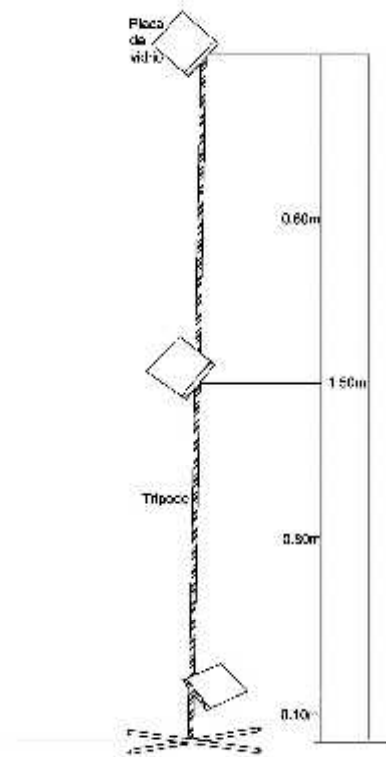


Figura 3.2 Trípode de acero corrugado donde se colocaron muestras para monitorio.

Fuente: Propia

La Temperatura promedio esos días era de $19^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$ C. El sector estudiado era el más próximo a la Av. Universitaria ya que es la Avenida que genera mayor impacto al campus debido a su alto tránsito.

La fecha del muestreo fue la semana entre los meses de Noviembre y Diciembre del año 2010 entre las 8 de la mañana hasta las 6 de la tarde, seleccionándose las horas pico y

las de menos actividad en el campus, descartando la noche debido a la poca visibilidad de las muestras. Se eligen esos meses debido a que corresponden al período de transición que se califica como inestable en cuanto a las condiciones atmosféricas ya que se encontraba entre los cambios de dos estaciones.

Todas las muestras, una vez recogidas, se envolvieron con una película de plástico transparente y se almacenaron de manera vertical propiamente codificadas.

Durante el procesamiento de la data, las muestras se escaneaban y se amplificaba para poder empezar con la cuenta de aquellas partículas que tuvieran el tamaño apropiado para ser reconocidas como partículas de PM_{10} o debido a las características como partículas de CO provenientes de humo negro por quema de combustible.

El proceso de conteo debía ser estandarizado, se hacía un eje en cada placa, en éste caso una diagonal, y se consideraban todos aquellos puntos cercanos a dicha línea. .

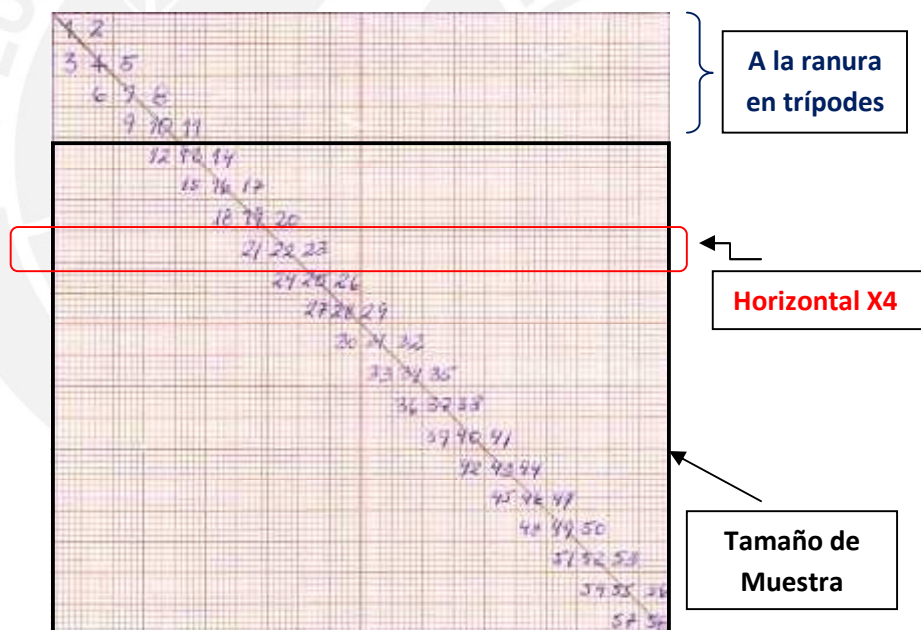


Imagen 3.1 Cuadrícula para conteo de partículas.

Fuente: Propia

Para tener mayor uniformidad en la contabilización se enumeraron los recuadros de un papel milimetrado cercanos a la diagonal y se contabilizaban en todas las muestras los mismos recuadros teniendo en cuenta el tamaño de las muestras que abarcaba 16 líneas horizontales. La idea era obtener la cantidad de cada tipo de partícula por cm^2 de placa. Este papel se utilizó como plantilla general con ayuda del Software Adobe Photoshop CS4 y de ésta manera se podía trabajar con dos capas, superponiendo las muestras con la plantilla.

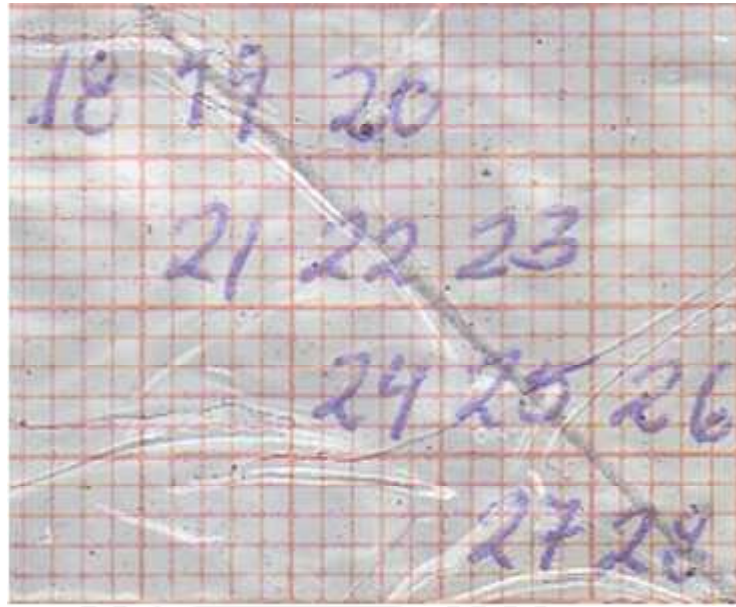


Imagen 3.2 Cuadrícula de papel milimetrado superpuesta con una muestra escaneada para el conteo de partículas
Fuente: Propia

Las partículas de PM_{10} son las que aparecen en gran número encerradas en círculos rojos, las partículas de humo negro (CO) son las encerradas en círculos negros, son brillosas y con color más definido.

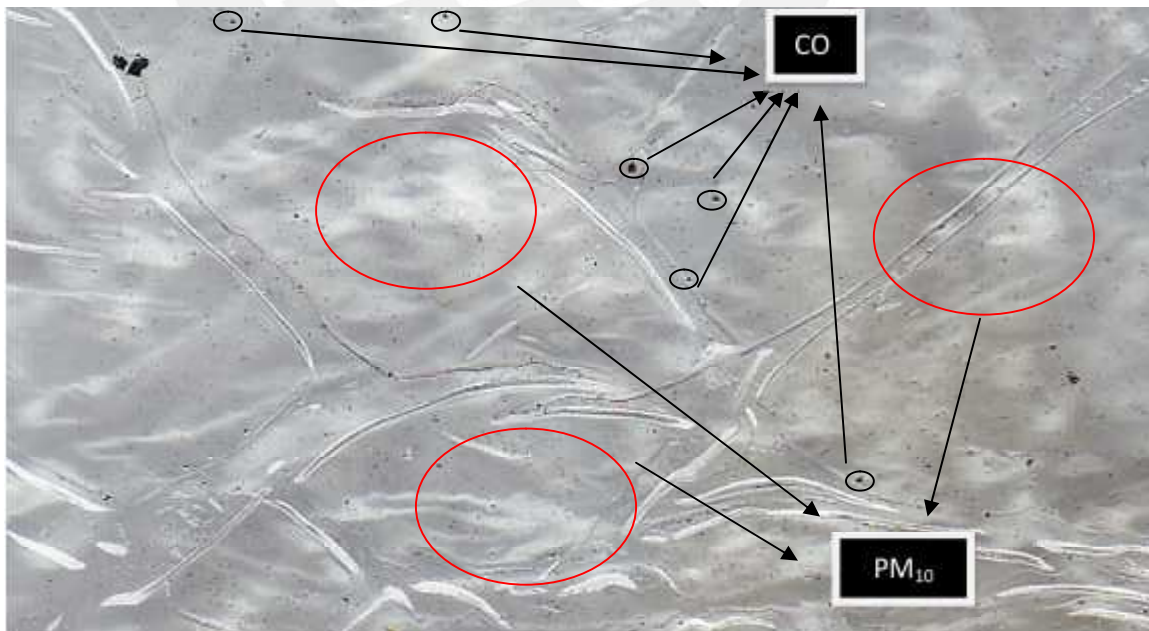


Imagen 3.3 Muestra de vidrio sellada con plástico transparente donde se aprecian partículas capturadas.
Fuente: Propia

3.6 CÁLCULOS DE LA DIVERGENCIA

La Divergencia se calcula para apreciar la diferencia existente con respecto a los estándares de calidad emitidos por la Norma Peruana D.S.N° 074-2001-PCM y la EPA, al hallarla tendremos una visión clara de cómo nos encontramos actualmente y a partir de ahí evaluar aquellos puntos más críticos.

Todos los cálculos del muestreo realizado se hicieron con ayuda de una hoja de cálculo (Excel v.2007 de Microsoft). A continuación se detalla el procedimiento para hallar la Divergencia:

1. Recoger y ordenar las placas, escanearlas y agruparlas por códigos de acuerdo a su ubicación de la cuadrícula de monitoreo.
2. Obtener un promedio de los contaminantes atrapados en cada placa, tanto de CO como de partículas PM₁₀, se tendrán 58 cuadrantes de conteo (ver Imagen 3.1) distribuidos en 20 horizontales, debemos considerar que las primero cuatro horizontales no se contabilizaban ya que era el espacio necesario en cada una de las muestras para ser colocadas en los trípodes. Se explica el caso para una muestra en particular utilizando la estación A1 de uno de los monitoreos como ejemplo:

Para este caso se cuentan los cuadrantes enumerados de cada una de las filas horizontales de la placa dividiéndolas desde X1 hasta X16 que son el área de estudio que nos interesa, siguiendo esta idea se muestran a continuación algunos datos obtenidos:

Cuadrante	Altura	Fila	CO	PM10
A-1	0,1	x1	0	3
		x2	0	3
		x3	0	2
		x4	1	1
		x5	0	2
		x6	2	4
		x7	1	4
		x8	0	2
		x9	0	3
		x10	0	1
		x11	1	3
		x12	1	2
		x13	2	1
		x14	0	3
		x15	0	3
		x16	0	1
Media			0,5	2,375

Cuadrante	Altura	Fila	CO	PM10
A-1	0,9	x1	0	2
		x2	1	2
		x3	1	0
		x4	0	2
		x5	0	3
		x6	0	2
		x7	0	3
		x8	0	2
		x9	0	4
		x10	1	0
		x11	2	4
		x12	1	3
		x13	3	1
		x14	1	4
		x15	1	3
		x16	1	6
Media			0,75	2,5625

Cuadrante	Altura	Fila	CO	PM10
A-1	1,5	x1	1	3
		x2	0	2
		x3	0	1
		x4	1	3
		x5	1	0
		x6	0	3
		x7	3	4
		x8	0	4
		x9	2	5
		x10	3	0
		x11	1	7
		x12	0	3
		x13	1	1
		x14	1	0
		x15	3	0
		x16	0	0
Media			1,0625	2,23

Tabla 3.1 Ejemplo del procedimiento para hallar el conteo de partículas de CO y PM10 en una estación de estudio.
Fuente: Propia

3. Se obtiene la media de partículas contabilizadas por cada placa de la estación para cada altura de 0.1, 0.9 y 1.5m, que será un resultado en partículas por cm². Para ello se debe sumar de X1 a X16 dividido entre el número de datos (16). Se hace lo mismo tanto para CO cómo para PM₁₀.
4. Como se analizaron distintos muestreos, se trasladaron los valores a una tabla donde se aprecia la media estandarizada para cada estación en cada muestra obtenida. Para hallar la media estandarizada en cada muestra se multiplica cada media por la altura de cada placa y se divide entre la suma de las alturas, con esto encontramos la media estandarizada para cada placa en cada muestra, y al sacar un promedio simple entre ambas muestras podemos obtener el primer valor para ésta estación.
De la misma manera se repite el procedimiento para las otras estaciones.

Muestra 1				Muestra 2				Promedio de partículas/cm2			
Estación	h	Co	Part. Susp	Estación	h	Co	Part. Susp	Estación	h	Co	Part. Susp
A1	0.1	0.50	2.38	A1	0.1	0.22	2.10	A1	0.1	0.36	2.24
	0.9	0.75	2.56		0.9	0.22	2.34		0.9	0.49	2.45
	1.5	1.06	2.25		1.5	0.41	2.02		1.5	0.74	2.13
Media Estandarizada		0.93	2.37	Media Estandarizada		0.34	2.12	Media Estandarizada		0.63	2.25
A2	0.1	1.53	4.65	A2	0.1	1.14	10.71	A2	0.1	1.33	7.68
	0.9	0.25	1.94		0.9	0.16	1.16		0.9	0.20	1.55
	1.5	0.44	1.06		1.5	0.14	0.52		1.5	0.29	0.79
Media Estandarizada		0.41	1.52	Media Estandarizada		0.18	8.69	Media Estandarizada		0.30	1.34
A3	0.1	0.56	1.63	A3	0.1	0.14	1.28	A3	0.1	0.35	1.45
	0.9	0.31	0.94		0.9	0.17	1.28		0.9	0.24	1.11
	1.5	0.13	1.44		1.5	0.09	0.90		1.5	0.11	1.17
Media Estandarizada		0.21	1.27	Media Estandarizada		0.12	1.19	Media Estandarizada		0.16	1.16

Tabla 3.2 Ejemplo del procedimiento para hallar la media estandarizada para cada estación en distintos monitoreos y promedio de ambos.

Fuente: Propia

La elaboración de los cuadros con las fórmulas explicadas anteriormente se encuentra en el Anexo 1: Apéndice 1.2.

5. Luego de tener los cálculos para cada estación y por cm², se calcula cuanto saldría para 1 placa de vidrio (10x10cm²) y a continuación para un volumen de aire en m³. A manera de ejemplo se explicará el caso de las partículas de CO cuyos valores se trasladan a µg/m³. Para PM₁₀ se deben trasladar los valores a mg/m³.

Primero se multiplica los valores obtenidos por 100cm² para poder tener la cantidad de partículas por placa. Con la cantidad de partículas por placa calculada se procede a hallar el valor de partículas por volumen de aire. Se debe considerar que cada placa de vidrio tiene apróx 4mm (0.004m) de espesor y un volumen de aire en m³ que hay en un área de 100cm² con 1.5m de altura. Si le ponemos los datos obtenidos para A1 se tendría la siguiente operación:

En el caso de CO : (63.27x364)/0.015m³ donde 364 es la cantidad de placas totales que entrarían en ése volumen. (Obs: el espesor de los vidrios no es exacto, tiene decimales).

Seguidamente el valor obtenido para 1m³ de aire debe convertirse a las unidades respectivas para expresar la concentración de cada contaminante por lo que en el caso de CO se lleva primero a ppm/m³ dividiéndolo entre 1x10⁶. Para que éste valor pueda ser comparado se transforma a mg/m³:

$$\frac{Vo/CO}{\left(\frac{VMCO}{PMCO}\right)} = \frac{1.54}{\left(\frac{22711}{2801}\right)} = 1.89 \text{ mg/m}^3$$

Vo/CO está expresado en ppm/m³

VMCO es el volumen molar expresado en L/mol

PMCO es el peso Molecular expresado en g/mol

El resultado debe ser llevado a µ/m³ multiplicando el valor hallado por 1000. (ver tabla 3.3). Para el caso de PM₁₀ los cálculos son similares y están detallados en los anexos.

	Cantidad por cm ²		Cantidad por Placa		Volumen para 1 m ³		Volumen para 1 m ³ en ppm		Volumen para 1 m ³ en mg/m ³		Volumen para 1 m ³ en microgramos/m ³	
	Co	PM10	Co	PM10	Co	PM10	Co (ppm/m ³)	PM10 (mg/m ³)	Co (mg/m ³)	PM10 (mg/m ³)	Co (microgramos/m ³)	PM10 (mg/m ³)
A1	0,63	2,25	63,27	225,31	1535717	5468593	1,54	437,487446	1,89	437,49	1894,03	437,49
A2	0,30	1,34	29,85	133,77	725532,9	3246832	0,73	259,744186	0,89	259,74	894,73	259,74
A3	0,15	1,16	16,47	115,65	395648,5	2807374	0,40	224,585890	0,49	224,59	492,89	224,59

Tabla 3.3 Ejemplo de tabla de cálculos de conversiones para 3 estaciones A.
Fuente: Propia

6. Se utiliza el reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire, decreto supremo 074-2001-PCM Anexo 1 para comparar los valores obtenidos con los de tabla para cada estación y se establece que solo había que analizar el caso pertinente a PM_{10} ya que el CO estaba por debajo del máximo permisible.
7. Con la data obtenida para PM_{10} se halla la divergencia realizando el siguiente procedimiento:

Se toman los valores indicados en el ICA como máximo permisible para los seres humanos que es de 150 mg/m^3 siendo este "Y", le restamos el valor obtenido para cada estación y se obtiene un delta Z.

Se divide Z/Y y se halla el Na que es la divergencia sin normalizar, luego de normalizarse se prepara el siguiente cuadro donde se subdivide en proporciones iguales los niveles de importancia de cada valor normalizado.

Niveles de afectación	Na= Z/Y	0.1 - 0.25	Baja Importancia	1
		0.26 - 0.5	Mediana importancia	2
		0.51 - 0.75	Regular Importancia	3
		0.76 - 1	Alta importancia	4

Tabla 3.4 Cuantificación del nivel de afectación

Fuente: Propia

8. Con los valores de la divergencia normalizada se grafican los niveles de concentración de cada una de las curvas de muestreo. Habrán curvas para todas las estaciones 1, una para todas las estaciones 2 y otra para todas las estaciones 3, que se caracterizan por la distancia que las separa del foco de contaminación, que viene a ser la Av. Universitaria. Las estaciones 1 (Ej.: A1) son los más cercanos, las 2 son las intermedias y las 3 las más alejadas, como se muestra en la cuadrícula del principio de capítulo (Fig. 3.1).
9. Finalmente se realizaron gráficas de barras en donde se pudiera apreciar todas las estaciones separándolas por curvas de muestreo y así ver la similitud en cuanto a los puntos con mayor contaminación y los menos afectados con respecto a los límites establecidos por la norma.

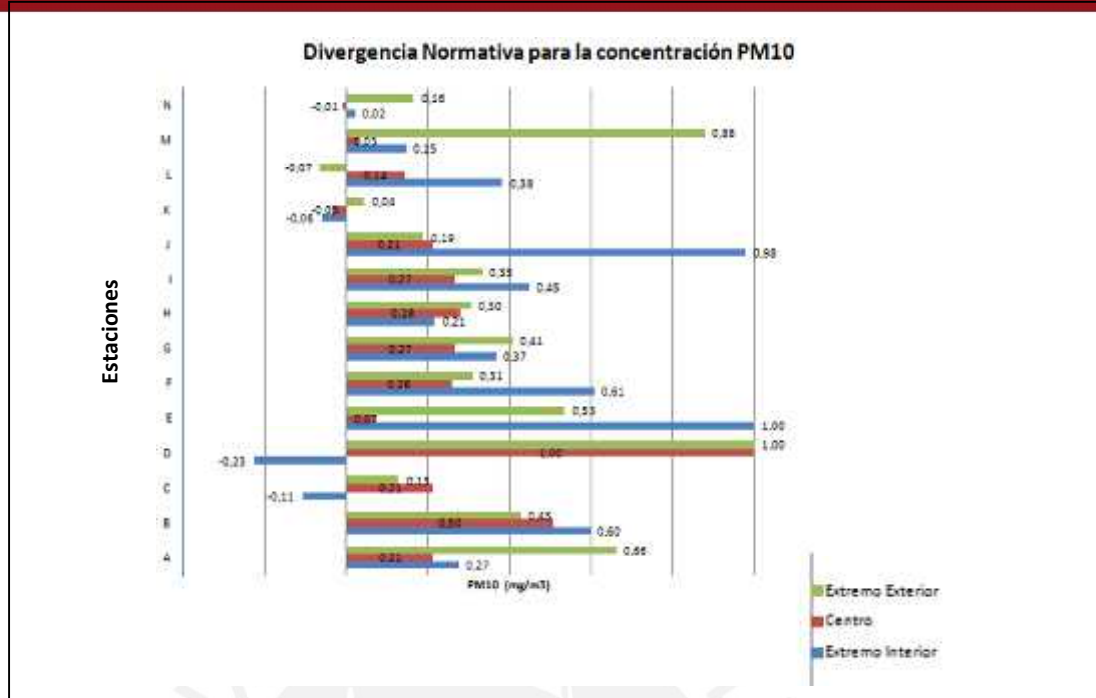


Fig. 3.3 Divergencia normativa para la concentración de PM10.

Fuente: Propia

En la Fig. 3.3 podemos ver claramente como la divergencia es muy similar en la curva central ya que la mayoría de vehículos de esa zona se encuentra en los estacionamientos donde en algunos momentos se da bastante actividad vehicular. Lo que no ocurre en las otras en que se ve gran divergencia en las curvas exterior e interior debido a que colindan con las vías de tránsito vehicular interno de la Universidad así como con vía de tránsito externo que viene a ser la Av. Universitaria. Aquellos valores que figuran como negativos deben obviarse, el significado de que sean negativos quiere decir que no representan problema alguno ya que no superan los límites establecidos en la norma.

- De la misma manera se grafican los niveles de afectación de todo el área en estudio de acuerdo a la normalización realizada para en la tabla 3.4. Como era de esperarse, en la zona de paraderos cercanos a las estaciones en D y M tienen valores altos, ya que son focos de mayor concentración de contaminantes debido a que la mayoría de transporte público sobrepasa en esos puntos sin apagar sus motores por largos períodos de tiempo.

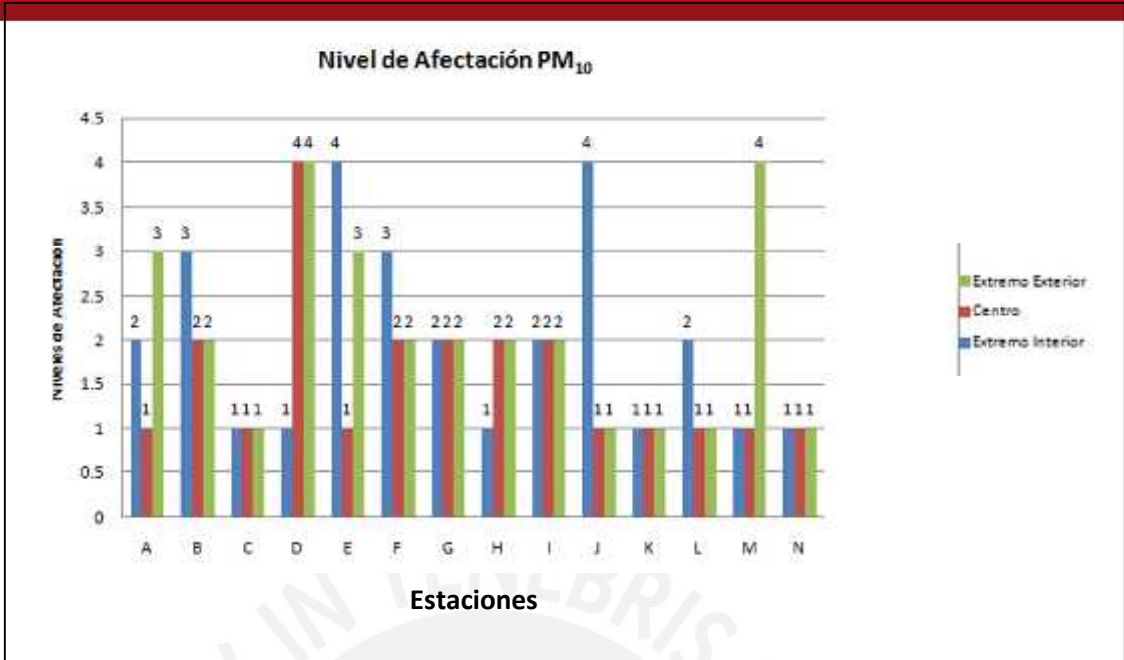


Fig. 3.3 Nivel de afectación PM₁₀.

Fuente: Propia

11. Otra gráfica que se pudo realizar fue la de las 3 curvas de muestreo superpuestas para propósitos de comparabilidad. Gracias a ello se puede ver la similitud en la tendencia en cuanto a los puntos de mayor y menor concentración de contaminantes.

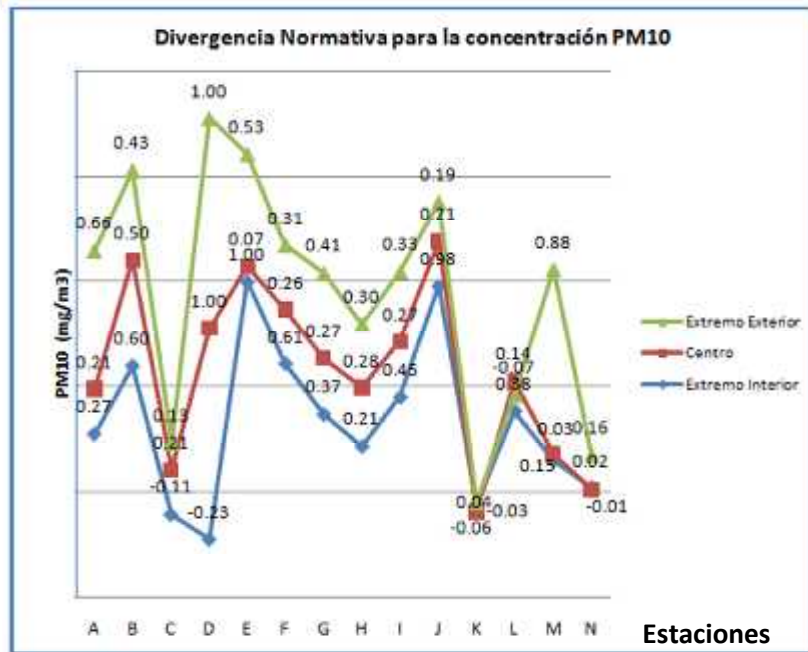


Fig. 3.2 Divergencia normativa para la concentración de PM₁₀.

Fuente: Propia

CAPITULO IV

CALIDAD DEL AIRE EN LA PUCP

Diversos autores señalan que la calidad del aire es un parámetro de difícil medición, dada la incidencia de diversas variables, además de los complejos procesos de transporte de contaminantes que ocurren en la atmósfera. Frecuentemente, se ilustra la calidad del aire a partir del análisis del comportamiento de determinados contaminantes, entre ellos el Monóxido de Carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y azufre (SO_x), las partículas mecánicas inferiores a 10 micras (PM₁₀), entre otros. A continuación, se ilustra los resultados obtenidos en la medición de la calidad del aire en el campus universitario de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Los contaminantes analizados son el CO₂ y el PM₁₀.

4.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El CO es un contaminante frecuente en las ciudades y además es uno de los responsables del proceso de cambio climático, como lo anota el Panel Intergubernamental de las Naciones Unidas. En la Fig. 4.1 se aprecia que la presencia de CO, es diferenciada tanto longitudinal como transversalmente. En efecto, al adentrarse en el campus de la PUCP, se observa que el borde externo registra concentraciones menores a los bordes centrales e internos, lo que resulta paradójico porque exteriormente hay mucho mayor tránsito. Al centro del campus se ve mayores concentraciones que en los exteriores lo que podría significar que los contaminantes externos se transportan al interior del campus con excepción de aquellos puntos tomados en los paraderos donde se incrementan significativamente en las tres curvas de monitoreo.

Además, en la curva media o central los valores son coherentes porque es donde se da el mayor tránsito de vehículos y su ingreso a los estacionamientos, sin descartar que al no contarse con una barrera adecuada, los contaminantes externos se suman a los presentes. Los puntos más resaltantes en éste caso son los más cercanos a estudios generales ciencias que es donde hay una mayor concentración de personas y la entrada vehicular de la puerta principal por donde ingresan todos los autos del campus universitario, esto se ve también reflejado en la gráfica de los puntos internos donde hay dos grandes picos en esas zonas.

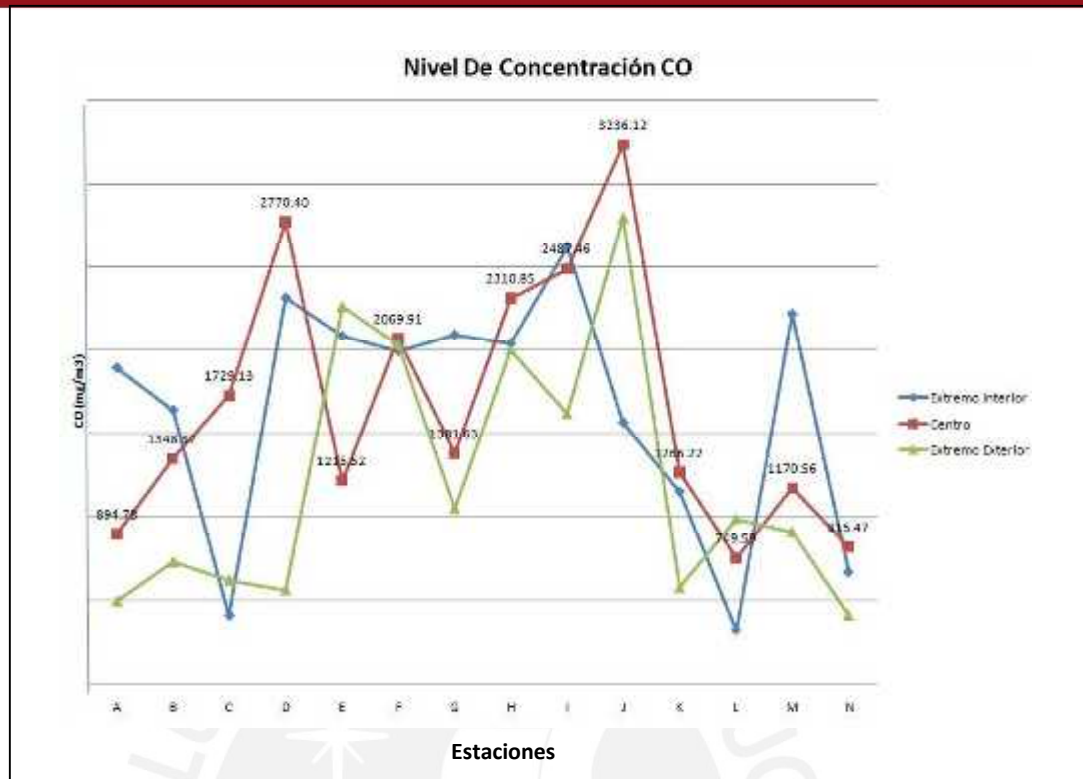


Fig. 4.1 Nivel de concentración de CO.

Fuente: Propia

En resumen, las estaciones en que se encuentran los mayores picos corresponden a la zonas ubicadas en los paraderos como la estación D y la estación M, También resaltan las zona de mayor aglomeración de personas como el intervalo D a H (Estudios Generales y Pabellón de Artes).

4.2 PARTÍCULAS MECÁNICAS (PM₁₀)

Otro parámetro de importancia es la concentración de partículas en suspensión o PM₁₀, las cuales tienen una incidencia importante en la salud de las personas y en los daños a la infraestructura. Sobre el particular se observa en la Fig. 4.2, que las mayores concentraciones ocurren, de manera similar al análisis de partículas de CO, en los puntos ubicados en los paraderos y donde no existen barreras que obstruyan el paso de los contaminantes. (Estaciones D y M). En el caso de la estación M, hay una gran concentración externa debido a que el transporte público se mantiene congestionado por su interés en recoger un mayor número de personas.

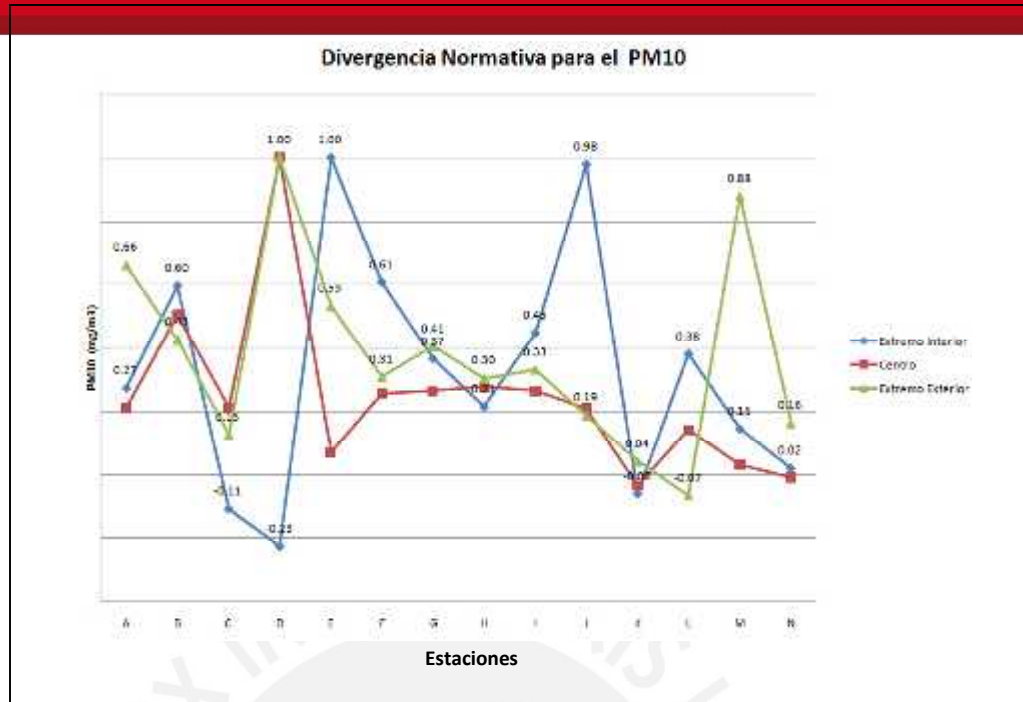


Fig. 4.2 Divergencia normativa para el PM10.

Fuente: Propia

Al igual que el caso anterior, se aprecia un patrón diferenciado tanto longitudinal como transversal. De forma tal que transversalmente hablando, el extremo exterior presenta mayores concentraciones que la curva central, a excepción de algunas estaciones. La curva interna supera en algunas estaciones las otras curvas debido a que dentro de la Universidad también existen emisiones fuertes como se mencionó anteriormente.

Entonces, se tiene que en las estaciones D y M, los niveles de afectación de al menos uno de los ejes de análisis son altos, en tanto que para las estaciones de F hasta I tienen niveles de afectación de regular importancia.

Nótese que la zona de análisis comprende dos paraderos principales, ubicados entre los segmentos D-E y M-N, como se indicó anteriormente, eso explica los altos niveles de afectación de las estaciones exteriores. En el caso del punto J, en la curva interna, el pico se explica por ser la zona principal de ingreso vehicular del campus, al no contarse con barreras los contaminantes ingresan gracias a las corrientes de aire que se generan.

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ELABORACIÓN DE UN ICA DENTRO DEL CAMPUS UNIVERSITARIO

La idea central de los resultados que se exponen es la construcción de un índice abreviado, con solo dos variables, PM10 y CO, con los cuales se pueden identificar la calidad, en cuanto a categoría, del aire de la zona circundante a la PUCP. Como se sabe,

la Pontificia Universidad Católica es una comunidad universitaria donde diariamente se desenvuelven profesores, alumnos y público en general. Por ende es importante poder saber cómo se encuentra el aire que estas personas respiran a diario y cómo es que los contaminantes hallados podrían afectar el entorno.

Con este afán de velar por el nivel de contaminación presente en el campus y los posibles daños que podrían ocasionar, tanto en materia viva como edificaciones, es que se optó por tomar una serie de medidas en la zona explicada y detallada en el capítulo III.

Con la data obtenida, se obtuvo que los contaminantes con mayores concentraciones son las partículas respirables PM_{10} en comparación con las de Dióxido de carbono CO , por lo tanto puede haber otros contaminantes que afecten la salud humana o las estructuras pero que no serán objeto de estudio en este ICA. Para sustentar el cambio del indicador se revisó el Decreto Supremo N°074-2001-PCM presente en el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire y el seguimiento que ha hecho DIGESA en los últimos años, para así poder ver los cambios en la concentración de los contaminantes y poder compararlos con la data obtenida en este estudio.

En las pruebas analizadas se obtuvo una serie de valores para el CO . Estos valores se muestran en la parte inferior, utilizando el índice de calidad del aire que se observa en la tabla 4.5

CO (ppm)	Valores del Índice	Subíndice
8 horas		
0 - 4.4	0 - 50	1
4.5 - 9.4	51 - 100	2
9.5 - 12.4	101 - 150	3
12.5 - 15.4	151 - 200	4
15.5 - 30.4	201 - 300	5
30.5 - 50.4	301 - 500	6

Tabla 4.5 Índice de calidad del aire para CO basada en la EPA

Fuente: Environmental Protection Agency

En: www.epa.gob

A continuación se muestra la concentración de CO de la data que se obtuvo al tomar las respectivas muestras para cada punto de la cuadrícula indicada en el capítulo III y combinándola con los índices de calidad de la EPA, se tiene:

PUNTO	Co (μ/m^3)	ICA	PUNTO	Co (μ/m^3)	ICA	PUNTO	Co (μ/m^3)	ICA
A1	1.54	1.00	A2	0.73	1.00	A3	0.40	1.00
B1	1.33	1.00	B2	1.09	1.00	B3	0.59	1.00
C1	0.33	1.00	C2	1.40	1.00	C3	0.50	1.00
D1	1.88	1.00	D2	2.25	1.00	D3	0.45	1.00
E1	1.69	1.00	E2	0.99	1.00	E3	1.83	1.00
F1	1.62	1.00	F2	1.68	1.00	F3	1.65	1.00
G1	1.70	1.00	G2	1.12	1.00	G3	0.85	1.00
H1	1.66	1.00	H2	1.87	1.00	H3	1.62	1.00
I1	2.12	1.00	I2	2.02	1.00	I3	1.32	1.00
J1	1.27	1.00	J2	2.62	1.00	J3	2.27	1.00
K1	0.93	1.00	K2	1.03	1.00	K3	0.47	1.00
L1	0.26	1.00	L2	0.61	1.00	L3	0.80	1.00
M1	0.54	1.00	M2	0.33	1.00	M3	0.66	1.00
N1	1.80	1.00	N2	0.95	1.00	N3	0.74	1.00

Tabla 4.6 Concentración de CO y su respectivo ICA
 Fuente: Propia

Estos valores como se puede apreciar en la tabla están en un estándar satisfactorio, y la polución del aire es baja por lo que no se corre peligro con la contaminación de CO que se encuentra en la zona de estudio de la Universidad.

Al realizar el mismo análisis para el caso del PM_{10} se obtuvieron resultados muy diferentes, viendo que sí se tiene un problema con las partículas en suspensión, a continuación se detalla el cuadro facilitado por el EPA y la data obtenida.

PM10 ($\mu g/m^3$)	Valores del Índice	Subíndice
24 horas		
0 - 54	0 - 50	1
55 - 154	51 - 100	2
155 - 254	101 - 150	3
255 - 354	151 - 200	4
355 - 424	201 - 300	5
425 - 604	301 - 500	6

Tabla 4.7 Índice de calidad del aire para PM_{10} basada en la EPA
 Fuente: Environmental Protection Agency
 En: www.epa.gov

Con el cuadro anterior tomado de la EPA podemos calcular el siguiente ICA:

PUNTO	Pm ₁₀ (μ/m ³)	ICA	PUNTO	Pm ₁₀ (μ/m ³)	ICA	PUNTO	Pm ₁₀ (μ/m ³)	ICA
A1	437.49	6.00	A2	259.74	4.00	A3	224.59	3.00
B1	335.74	4.00	B2	411.82	5.00	B3	312.47	4.00
C1	205.49	3.00	C2	260.12	4.00	C3	120.58	2.00
D1	584.58	6.00	D2	669.09	6.00	D3	88.46	2.00
E1	381.88	5.00	E2	186.76	3.00	E3	422.29	6.00
F1	284.32	4.00	F2	283.52	4.00	F3	315.46	4.00
G1	327.01	4.00	G2	287.71	4.00	G3	249.81	3.00
H1	282.53	4.00	H2	294.30	4.00	H3	208.50	3.00
I1	294.40	4.00	I2	287.72	4.00	I3	272.09	4.00
J1	232.01	3.00	J2	259.58	4.00	J3	416.40	5.00
K1	168.60	3.00	K2	131.94	2.00	K3	133.61	2.00
L1	121.48	2.00	L2	224.15	3.00	L3	253.96	3.00
N1	531.98	6.00	N2	166.60	3.00	N3	189.85	3.00
M1	221.46	3.00	M2	145.03	2.00	M3	155.55	3.00

Tabla 4.8 Estimación de PM10 para la PUCP

Fuente: Propia

Se aprecia claramente que se tiene una dispersión de valores del ICA según la zona donde se tomó la muestra. Ya se ha comentado que todo valor mayor a 2 es dañino en alguna medida para los seres humanos y también tiene un impacto en la infraestructura como también se advirtió.

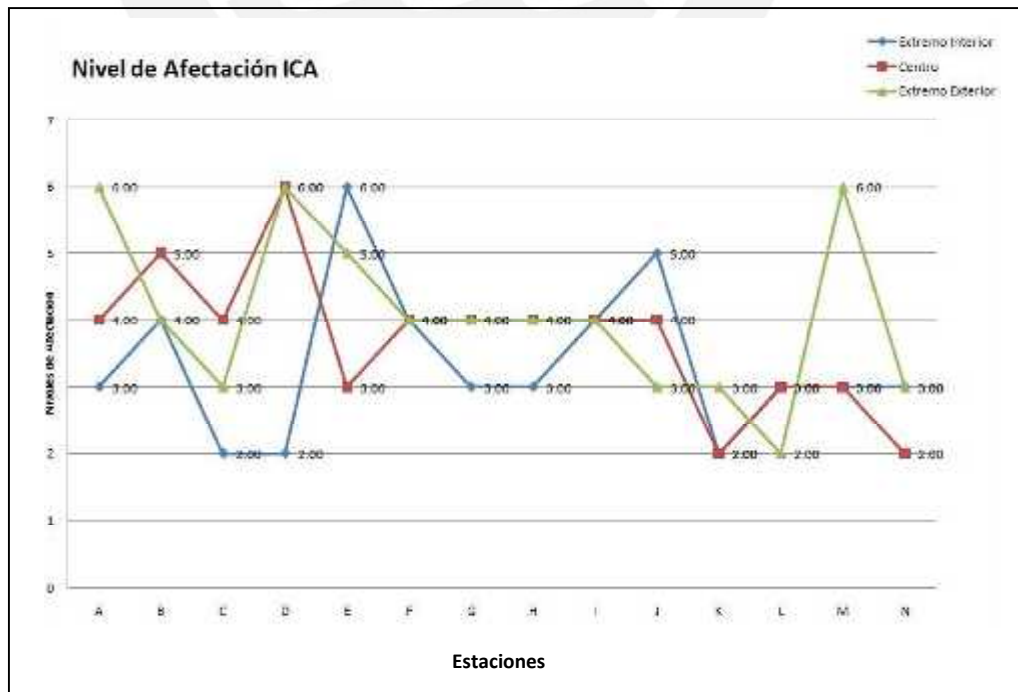


Fig. 4.3 Nivel de afectación del ICA.

Fuente: Propia

El ICA graficado tiene valores que van desde moderado hasta crítico, en diferentes sectores de los parqueos aledaños a la Av. Universitaria. Aquí nuevamente se observa que los valores críticos, se encuentran en las zonas donde hay paraderos de vehículos de transporte urbano, a medida que se alejan de esta zona se puede apreciar cómo se reducen los niveles de PM_{10} , y por ende el daño que se genera se va reduciendo, lo cual se ve reflejado también en los efectos en las edificaciones que se analiza en el siguiente capítulo.



CAPITULO V

PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**5.1 REGRESIÓN DEL ICA Y ECUACIÓN RESULTANTE.**

Los valores de las concentraciones halladas en la tabla 3.3 se relacionaron y estandarizaron para que sumados nos dieran un ICA que implicara ambos contaminantes. (Revisar Anexo 1: Apéndice: 4.1)

Una vez hecho esto, ya se tienen los valores necesarios para correr una regresión en donde las variables serán los valores de PM_{10} , CO e ICA como se presentan en la tabla 5.1

	Co (mg/m ³)	Pm ₁₀ (mg/m ³)	ICA
A1	1894.03	437.49	1874.80
B1	1641.52	335.74	1560.32
C1	405.67	205.49	428.15
D1	2313.76	584.58	2421.03
E1	2085.71	381.88	1908.31
F1	1993.75	284.32	1736.21
G1	2092.36	327.01	1841.75
H1	2041.42	282.53	1763.86
I1	2618.24	294.40	2093.61
J1	1567.34	232.01	1408.59
K1	1149.66	168.60	1057.90
L1	315.99	121.48	308.02
N1	2216.80	531.98	2249.27
M1	663.15	221.46	675.79
A2	894.78	259.74	906.89
B2	1348.37	411.82	1452.73
C2	1729.13	260.12	1542.72
D2	2770.40	669.09	2867.44
E2	1215.52	186.76	1118.41
F2	2069.91	283.52	1782.13
G2	1381.63	287.71	1320.76
H2	2310.85	294.30	1932.55
I2	2487.46	287.72	2020.87
J2	3236.12	259.58	2325.75
K2	1266.22	131.94	1136.49
L2	749.59	224.15	754.27
M2	1170.56	166.60	1073.63
N2	815.47	145.03	771.75
A3	492.89	224.59	522.44
B3	727.21	312.47	813.16
C3	616.31	120.58	589.03
D3	559.73	88.46	533.12
E3	2262.33	422.29	2072.23
F3	2036.23	315.46	1794.63

G3	1049.27	249.81	1027.19
H3	2003.44	208.50	1682.40
I3	1622.10	272.09	1479.76
J3	2796.38	416.40	2335.39
K3	574.70	133.61	554.31
L3	985.92	253.96	978.46
M3	907.21	189.85	869.23
N3	409.37	155.55	407.41

Tabla 5.1 Concentraciones de CO, PM₁₀ y ICA
Fuente: Propia

Haciendo uso del software SPS v.19, se propone un modelo básico, una regresión lineal, para relacionar las 3 variables (CO, PM₁₀ e ICA). Una de las tablas que arroja el programa al relacionarlas es la tabla 5.2 en donde lo importante es interpretar el valor del coeficiente de correlación lineal (R), el coeficiente de Determinación (R²) y el estadístico Sig.F:

R es cercano a 1 por lo que su asociación lineal entre variables es fuerte.

R² explica la variabilidad de los datos, están explicados en un 99.1%

Sig.F es inferior a 0.05, lo que permite afirmar lo descrito anteriormente y se concluye que son datos representativos.

Model	R	R ²	Adjusted R Square	Std. Error of The Estimate	Change		Statistics		Sig. F change
					R square Change	F change	Df1	Df2	
1	.996	.991	.991	63.36540	.991	2161.489	2	39	0.000

Tabla 5.2 Calculo de los factores R,R² y Sig.F
Fuente : Propia

En resumen, R explica el 99.6% de la variación. Es decir que ésta regresión lineal calcula o predice correctamente a partir de los valores estimados. Cuando se eleva el nivel de exigencia al cuadrado (R²), los valores ajustados explican el 99.1% de la varianza. Con la data obtenida se infiere que el modelo sería igualmente válido para el universo.

En la siguiente tabla 5.3 se muestran los coeficientes que formarán parte de la ecuación del ICA resultante, en éste caso la constante B es la desviación estándar de una variable dependiente que va a cambiar por un aumento en la desviación estándar de la variable predictoría, visto de manera sencilla indica los coeficientes de la ecuación resultante. Sin embargo, se observa un problema con la constante Sig, cuyo estadístico de prueba resulta no significativo en el primer caso (>0.05), situación que probablemente se debe a que el ICA ha sido construido sólo a partir de dos valores: PM₁₀ y CO, desechando otros valores como SO₂, CO₂, entre otros; es decir, es posible que exista colinealidad y es probable que el CO este implícito en el material particulado PM₁₀.

Model	Unstandarized	Coefficients	Standarized coefficients	t	Sig.
	B	Std.Error	Beta		
Constant	-28.760	24.872		-1.156	0.255
Concentracion de CO	0.669	0.17	0.792	39.071	0.000
Partículas Mecánicas 10mm	1.436	0.106	0.274	13.535	0.000

Tabla 5.3 Coeficientes
Fuente: Propia

Con la data de la columna B de la tabla 5.3 y considerando la naturaleza lineal del modelo, se puede formalizar la ecuación por medio de la expresión: $y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2$, obteniendo el siguiente ICA:

$$\text{ICA} = -28.76 + 0.669 \text{ CO} + 1.436 \text{ PM}_{10} \dots (a)$$

Al comparar los dos coeficientes estandarizados (Beta) se aprecia que la influencia de la concentración de CO es del 79.2% y el 27.4 % restante de la variación está dado por las partículas mecánicas. En la figura 5.1, se observa la correlación entre el ICA y la concentración de CO, con ello se evalúa la validez de la ecuación basándonos en el 79.4% que se obtuvo para el CO, que significa que la mayoría de la data se ajusta a una regresión lineal.

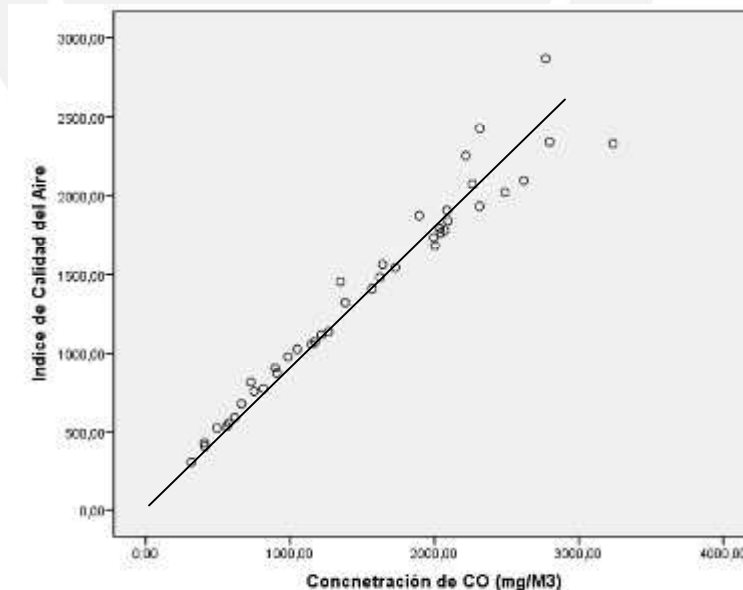


Fig. 5.1 Nivel de calidad del aire vs Concentración de CO.
Fuente: Propia

En la figura 5.2, se evalúa el índice de calidad del aire y la concentración de las partículas mecánicas menores a 10 μm , se observa una mayor dispersión de la data, lo cual es de esperarse porque el PM_{10} solo refleja el 27.4% de toda la muestra.

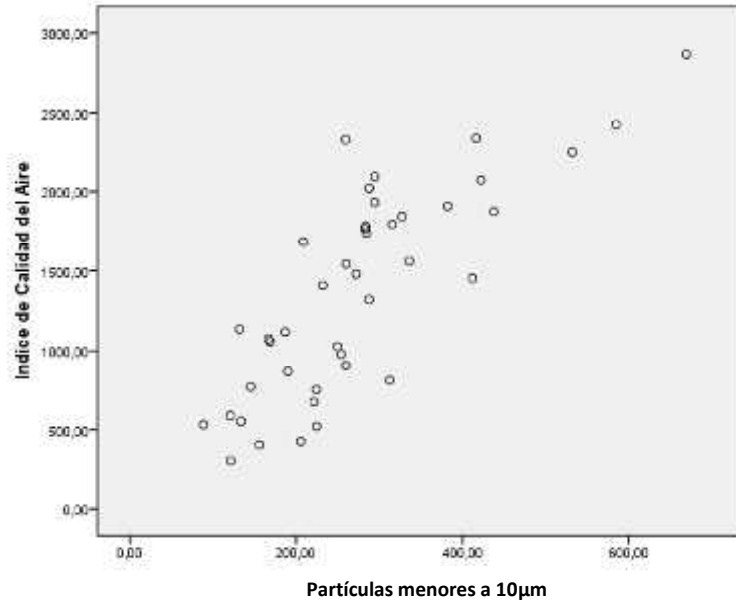


Fig. 5.2 Nivel de calidad del aire vs Partículas Mecánicas 10um

Fuente: Propia

Al ajustar el valor predictivo de estandarización, se puede apreciar que es un ajuste lineal perfecto, salvo un pequeño tramo, como se aprecia en la siguiente figura.

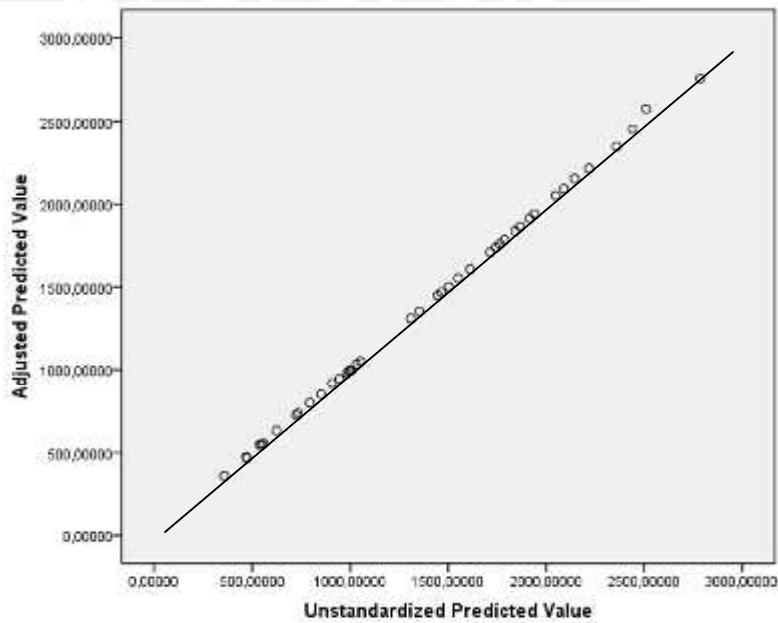


Fig. 5.3 Ajuste de Valores de partículas PM_{10} .

Fuente: Propia

Sin embargo, El CO está por debajo de los estándares máximos permisibles (ECA) por lo que se obviará, obteniendo la siguiente ecuación corregida del ICA.

$$\text{ICA} = -28.76 + 1.436 \text{ PM}_{10} \dots \dots \text{(b)}$$

De otro lado, se evaluaron diferentes modelos estadísticos para obtener una mejor aproximación y estos fueron los valores, conforme se aprecia en la Tabla 5.4. Comparativamente, se tiene que el modelo de Potencia (Power), sería el más acertado, porque predice el 98,3 % (R=0.983), sin embargo la ecuación lineal tiene un R de 0.949, por lo que el modelo lineal, dada la simplicidad en su aplicación, sería el más conveniente.

Equation	R Square
Linear	0.949
Logarithmic	0.893
Inverse	0.701
Quadratic	0.951
Cubic	0.96
Compound	0.914
Power	0.983
S	0.897
Growth	0.914
Exponential	0.914
Logistic	0.914

Tabla 5.4 Diferentes modelos estadísticos utilizados
 Fuente: Propia

5.2 CONTAMINACIÓN Y DAÑO A LA INFRAESTRUCTURA.

Como se ha indicado anteriormente, existe un número de factores por los cuales la infraestructura hecha por materiales comunes en la construcción de edificaciones, podrían verse dañados y cuyo mantenimiento a largo plazo tendría gran impacto tanto visual, funcional como económico. Visual por las acumulaciones de partículas en las edificaciones, funcional por el deterioro que se genera y económico debido a las consecuencias de ciertos fenómenos que se producen, los cuales deben corregirse. Se estudió los contaminantes más preocupantes en el campus universitario, sin embargo, debido a que el CO no representó un contaminante significativo en los modelos y regresiones presentadas anteriormente, se estudió otro contaminante más con datos entregados por informes realizados previamente en nuestro país por el SENAMHI (ver Anexo 1: Apéndice 4.4). El contaminante adicional utilizado en nuestra investigación viene a ser el SO₂.

5.2.1 Resumen del procesamiento de los casos para SO₂ y PM₁₀ en conjunto.

Para poder determinar la contaminación debido al gas SO₂, se estudió un informe presentado por el canal del estado TVPerú (Brack, 2002) realizado por Antonio Brack con colaboración del Ing. José Silva el cual indica que existen varias estaciones de recopilación de datos de algunos contaminantes, entre ellos el SO₂. El Ing. Silva en una entrevista señala: “la meteorología es muy importante para entender la contaminación del aire, en Lima es usual no tener vientos en la mañanas, sin embargo después de las 10am hasta las 5pm entran las brisas marinas, cuando el clima está despejado, toda la contaminación suele ir hacia el Este, después de las 5pm los vientos cambian y soplan hacia el norte contaminando todos los distritos pertenecientes a ese cono”.

Las estaciones existentes son 5: Santa Anita, Jesús María, Callao, San Borja y Villa María del Triunfo.



Fig. 5.4 Rosa de vientos y estaciones de medición de Lima.

Fuente: Propia

Hasta el año 2010 las estaciones de monitoreo de éste contaminante no contaban con datos actualizados como hoy en día, por ello se utilizaron aquellos datos existentes y se analizaron debido a su relevancia o dirección de viento hacia la PUCP. Según los comentarios del Ing. Silva, los vientos soplan de la estación del Callao hacia el campus de la PUCP, de la misma manera los vientos suelen soplar desde la estación Jesús María hacia el campus, por ende solo se considera el alcance de los contaminantes provenientes de las estaciones: Callao y Jesús María ya que las otras estaciones están muy alejadas. Los cálculos se estudiaron en base a la data de las estaciones mencionadas y se promediaron para obtener un valor resultante de la cantidad aproximada de gas SO₂ que hay en el campus además de analizar los daños que causa en la infraestructura.

Haciendo nuevamente uso del software SPS v.19, se corre una regresión similar a lo cálculos del punto 5.1 con los datos promediados de las estaciones, estos 14 datos resultantes van desde el eje A hasta el eje N de la cuadrícula mostrada en a figura 3.1 Adicionalmente para cada uno de estos puntos se ha dado la cuantificación de daños apreciados en los materiales como acero, concreto y mampostería en los que se explica cómo afecta la concentración de SO₂ y PM₁₀, es decir, se analizaron imágenes de las estaciones de monitoreo y se cuantificaron de acuerdo a los daños en cada tipo de material (Ver Anexo 1: apéndice 4.3 y Anexo 3). En el caso del PM₁₀ se trabajaron todos los valores hallados por estación con la fórmula (b) del ICA en el punto 5.1 y luego se promediaron los valores para tener un total para cada estación, es decir A1, A2 y A3 se promediaban luego de pasar por la fórmula (b) para obtener el valor A.

	SOx	PM10	Acero	Concreto	Ladrillo
A	17.27	412.49	3.00	2.00	2.00
B	22.72	478.64	3.00	2.00	1.00
C	21.79	251.83	3.00	3.00	1.00
D	18.62	613.67	3.00	2.00	4.00
E	28.86	445.56	3.00	2.00	3.00
F	29.70	394.05	2.00	2.00	2.00
G	15.71	385.06	2.00	2.00	3.00
H	22.56	347.15	2.00	1.00	1.00
I	10.96	380.12	2.00	1.00	1.00
J	10.58	405.86	1.00	2.00	1.00
K	28.53	179.05	1.00	2.00	1.00
L	11.93	258.24	4.00	2.00	1.00
M	25.96	396.50	3.00	2.00	1.00
N	14.37	221.12	2.00	2.00	1.00

Tabla 5.5 Cuantificación y concentración de daños
Fuente: Propia

Como se mencionó previamente la cuantificación de daños de cada material analizado: acero, concreto y albañilería ha sido evaluada en base al análisis de cada una de las fotografías tomadas en los puntos del sector de estudio en las que para poder determinar el grado de daño que se ha generado a raíz de los contaminantes se tuvo que elaborar la tabla 5.6, de acuerdo al porcentaje de daño se ha estandarizado el cuadro para poder interpretarlo de manera mas sencilla, por ejemplo: si se trata de acero y la contaminación presente está en el rango de 20% se le atribuye el número 1 que significa que no se aprecia óxido.

Daños en el Acero	0.01 - 0.20	No se aprecia óxido	1
	0.21 - 0.4	Aparecen algunos puntos de óxido	2
	0.41 - 0.6	Aparece una capa leve de oxido	3
	0.61 - 0.8	Se aprecia oxido en una cantidad considerable	4
	0.81 - 1.0	Toda la zona se encuentra oxidada	5
Daños en el Concreto	0.01 - 0.20	No se aprecia daño	1
	0.21 - 0.4	Carbonatacion del concreto	2
	0.41 - 0.6	Fisuracion Ligera	3
	0.61 - 0.8	Fisuracion considerable	4
	0.81 - 1.0	Fisuración Severa con decoloración del concreto	5
Daños en mampostería	0.01 - 0.20	No se aprecia daño	1
	0.21 - 0.4	Decoloración del ladrillo	2
	0.41 - 0.6	Inicio de presencia de sales	3
	0.61 - 0.8	Sulfatos e inicio de desprendimiento de ladrillo	4
	0.81 - 1.0	Desprendimiento, ruptura del ladrillo	5

Tabla 5.6 Cuantificación y concentración de daños.

Fuente: Propia

En el Anexo 1: apéndice 4.3 y el anexo 3 se puede encontrar las imágenes evaluadas así como el cuadro elaborado para cada uno de los puntos cuantificados con la tabla 5.6, los valores estimados por la tabla se validarán de acuerdo a los valores que se obtengan de acuerdo al modelo estadístico escogido.

MATERIAL	PM10		SO2	
	R múltiple	R cuadrado	R múltiple	R cuadrado
ACERO	0,666	0,444	0,236	0,056
CONCRETO	0,461	0,212	0,200	0,040
MAMPOSTERIA	0,998	0,996	0,100	0,010

Tabla 5.7 Variable dependiente: Daño generado en las estructuras

Fuente: Propia

En la tabla 5.7 resultante de la corrida de la regresión con SO_2 , R presenta un valor intermedio reflejando el 66.6% de los casos vistos para el acero, en el caso del concreto me muestra el 46% de los casos y en la mampostería me muestra el 99.8% de los casos. Siendo R^2 el nivel de explicación del modelo respecto a la variación, con la data obtenida podemos decir que para el acero nuestro modelo explica el 44.4% del daño que se puede apreciar, siendo esta variación medianamente consistente para el tema del acero porque el SO_x genera corrosión.

Para el caso del concreto nuestro modelo no es muy eficiente y solo refleja el 21.2% del daño que se puede apreciar en este, por lo que para este caso mi nivel de significancia no es significativo.

Para el caso de la mampostería se observa que el mayor nivel de significancia se produce en este caso; explicando mi modelo el 99.6% de la variación que tiene, siendo altamente significativo.

Ahora, se presenta una tabla donde se muestra si la data obtenida es válida para el universo, para esto se crea la tabla 5.8, teniendo en consideración que el nivel de significancia de F deberá ser el más grande posible y el nivel de la variable Sig. deberá estar por debajo de 0.05 para poder afirmar que es una ecuación fuerte y se pueda aplicar para el universo.

Al revisar los valores obtenidos para los tres casos, se ve que el único que se podría tomar en cuenta es el de la mampostería, que analizado con la data recolectada, cumple con lo requerido para el PM_{10} , como se muestra en la tabla adjunta tiene un valor del estadístico F bastante alto, y una variación por debajo del valor requerido. Sin embargo con el SO_x esto no ocurre, por lo que indica que la data será válida para el sector de estudio pero no será posible emplearla para inferir el comportamiento en el universo.

	PM10		SOx	
	F	Sig.	F	Sig.
ACERO	1,077	,377	,351	,567
CONCRETO	1,214	,294	,472	,506
MAMPOSTERIA	13,657	,004	,002	,965

Tabla 5.8 Variable dependiente: Daño a Estructuras
Fuente: Propia

Con todo el análisis previo, las ecuaciones para medir el grado de daño de cada uno de los materiales estudiados serían las siguientes:

Acero	:	$Da = 0.666PM_{10} + 0.236SO_x \dots (1)$
Concreto	:	$Dc = -0.416PM_{10} + 0.200SO_x \dots (2)$
Mampostería	:	$Dm = 0.998PM_{10} - 0.1SO_x \dots (3)$

Los coeficientes de las fórmulas fueron calculados en la tabla 5.7 en donde R viene a ser el grado de representatividad de cada contaminante de acuerdo al daño de cada material (Da, Dc y Dm).

5.3 EL CONCRETO ARMADO, LA CARBONATACIÓN Y LOS DEPÓSITOS DE PM_{10} EN LA PUCP

En el caso del campus universitario existe gran circulación de autos en todo el sector de estudio porque ahí se encuentran las vías de acceso vehicular y los estacionamientos. La concentración de CO de esa área entra en contacto con el oxígeno del medio ambiente, se oxida y se convierte rápidamente en CO_2 , lo que a la larga da lugar a la Carbonatación y si ella ya existiese agravaría sus consecuencias. Se midió el CO porque es mucho más sencillo de cuantificar con el procedimiento utilizado en los muestreos, pero las concentraciones de CO_2 está directamente relacionada a los datos calculados ya que si no existiese el CO no existiría CO_2 . Si controlamos las emisiones de uno se entiende que se controlan la del otro compuesto.



Imagen 5.1 Corrosión del acero en cerco perimétrico PUCP por carbonatación.

Fuente: Propia

En la Imagen 5.1 se puede apreciar que existen indicios de la presencia de éste contaminante (CO) en el concreto armado de la infraestructura de la zona de estudio que si bien es cierto no es alarmante ya presenta un grado inicial de deterioro que se puede visualizar fácilmente.

Por otro lado aunque las partículas de PM_{10} no tienen un gran impacto en el concreto, los depósitos de las mismas si pueden visualizarse y por ende causan una gran inversión en lo que respecta al mantenimiento además que debido a la presencia del contaminante SO_2 pueden producir lluvia ácida que aceleraría o incrementaría el fenómeno de carbonatación que se produce por presencia del CO. En la Imagen 5.2, se aprecia los depósitos de polvo en el cerco perimétrico cercano a la CEPREPUC ubicada muy cerca a la estación de monitoreo A1.



Imagen 5.2 Acumulación de CO y PM_{10} en cercos tipo UNI de concreto.

Fuente: Propia

De otro lado, el contaminante SO_2 actúa como agente importante en la aparición de lluvia ácida. Esta lluvia causa gran daño a su superficie, provocando erosión, si debido a un mal proceso constructivo no existiese un buen recubrimiento, el acero queda expuesto y con ello se acelera el proceso de degradación de los materiales.

5.4 EL FENÓMENO DE LAS EFLORESCENCIAS (DAÑOS EN ALBAÑILERÍA Y MORTEROS)

Las Eflorescencias son cristales de sales, generalmente de color blanco, que se depositan en la superficie de ladrillos, tejas y pisos cerámicos o de hormigón. Algunas sales solubles en agua pueden ser transportadas por capilaridad a través de los materiales porosos y ser depositadas en su superficie cuando se evapora el agua por efecto de los rayos solares y/o del aire, generalmente es de dos tipos: Primaria y Secundaria. Debe considerarse que de tratarse de Eflorescencia Primaria se debió formar debido a la humedad de la obra recién terminada. Este caso es inevitable pero desaparece en pocos meses. La zona de estudio del campus no es en su mayoría nueva y por ello se descarta que se trate de la primaria, entonces al hablar de Eflorescencia Secundaria, se refiere a la que aparece en obras de más de un año de antigüedad debido a condiciones desfavorables propias de la estructura o del medio. Las eflorescencias secundarias son evitables, para ello se debe tener gran cuidado en cuanto a la alta porosidad, elevada humedad permanente y defectos constructivos.

En el caso de la PUCP, existen bastantes pruebas de éste fenómeno, podría decirse que es debido a la cercanía a la playa y las brisas marinas, como también la presencia elevada de la humedad del distrito, lo cual de acuerdo a la investigación explicada de Brimblecombe (ver cap. 1.5.4), no desacredita que los contaminantes presentes aceleren o aumenten el deterioro de los materiales expuestos, disminuyendo el tiempo de vida útil de éstos elementos y ocasionando gastos de mantenimiento constantes e imagen institucional poco deseable.



Imagen 5.3 Eflorescencia en el ladrillo en distintos puntos del cerco perimétrico del campus.

Fuente:Propia

Los principales contaminantes para éste caso se relacionan al mortero directamente y son el SO_2 y al CO_2 que induce a la deposición ácida lo que genera degradación en el mortero y pérdida en su adherencia, a su misma vez los contaminantes provocan incremento en la acumulación de sales, que al cristalizarse en los poros externos generan suciedad pero cuando llegan a depositarse en los poros internos, generando desprendimiento en la superficie. Esto se da cuando el ladrillo tiene poros más grandes provocados por la humedad y el ingreso de SO_2 .

5.5 Efectos de los árboles en el entorno Urbano ante los contaminantes. Solución ante los problemas de depósito de partículas.

Según David J. Nowak, de la USDA Forest Service, Syracuse, NY, la vegetación urbana puede afectar directa e indirectamente la calidad local y regional del aire mediante la alteración del ambiente atmosférico, las cuatro maneras principales en que la vegetación afecta la calidad del aire se conoce por sus siglas en inglés como T.R.E.E. En resumen los beneficios de los árboles en el entorno humano son:

La reducción de temperatura y otros efectos microclimáticos: La transpiración de los árboles interfiere en el clima además de absorber la cantidad de radiación y la velocidad del viento.

La remoción de contaminantes de aire: Los árboles funcionan como filtro natural, sus hojas y corteza son capaces de absorber las partículas y gases en el entorno y filtrarlos a través de sí mismos, combinarlos con agua, procesarlos y desecharlos de manera natural. Los efectos de energía en las edificaciones.: Dependiendo de las estaciones los árboles ayudan a disminuir el uso de energía en las edificaciones, generan sombra, bloquean los vientos, alteran las temperaturas y purifican el aire, lo que a la larga genera un gran ahorro en cuanto a la energía necesaria para contar con éstos beneficios.

5.5.1 Los árboles y el Clima en la PUCP

Entre los componentes del clima sobre los que tiene efecto el bosque, los árboles y por consiguiente los parques están: la radiación solar, la temperatura, los vientos, la humedad ambiental, la evapotranspiración y la precipitación, principalmente. La arborización puede beneficiar un microclima influyendo integralmente sobre el grado de radiación solar, el movimiento del aire, la humedad, la temperatura, y ofreciendo protección contra las fuertes lluvias. Se ha comprobado que las áreas urbanas arborizadas, ayudan a reducir el efecto invernadero. En éste caso en particular se buscó una solución para poder

contrarrestar la fuerte emisión de gases provenientes del parque automotor y el material particulado proponiendo la siembra de árboles a manera de barreras verdes.

No existe ningún tipo de árbol específico para la solución mencionada, todos brindan beneficios similares, podría utilizarse los ya existentes en el campus o escoger entre las 195 especies peruanas: entre ellas las Poncianas, Ficus, Eucaliptos, Jacarandás, Ceibos, Huarángos, Robles. etc

5.5.2 Protección contra el viento y control de contaminación

El movimiento del aire o viento, afecta el confort humano. El viento puede incrementar el enfriamiento evaporativo durante el día. Sin embargo, el viento puede reducir el diferencial en temperatura reemplazando el aire húmedo y frío por aire seco y caliente, los vientos mismos pueden ser causados por diferencias de temperatura. Los árboles reducen la velocidad del viento y pueden crear áreas protegidas. Por consiguiente los árboles interfieren con los procesos de enfriamiento evaporativo, haciendo que las temperaturas permanezcan altas en las áreas protegidas.

Los árboles y arbustos controlan el viento por obstrucción, por conducción, por desviación y por filtración. El efecto y el grado de control varían con el tamaño de especies, la forma, la densidad y la retención del follaje. La obstrucción implica la ubicación de los árboles para reducir la velocidad del viento al incrementar la resistencia al flujo del aire. Una correcta ubicación de los árboles puede eliminar corrientes de aire alrededor de las esquinas o la entrada de los edificios. El ancho de la cortina tiene poco efecto en la reducción de la velocidad del viento, en cambio favorece el microclima dentro del área propiamente dicha de la cortina. A la misma vez si colocamos árboles para obstruir la entrada de viento, de manera indirecta evitamos el flujo o transporte de contaminantes. En el caso de la PUCP, uno de los principales sectores a proteger, sería el perímetro del campus como lo muestra la figura 5.5 así como el límite entre las vías de acceso vehicular con las edificaciones.

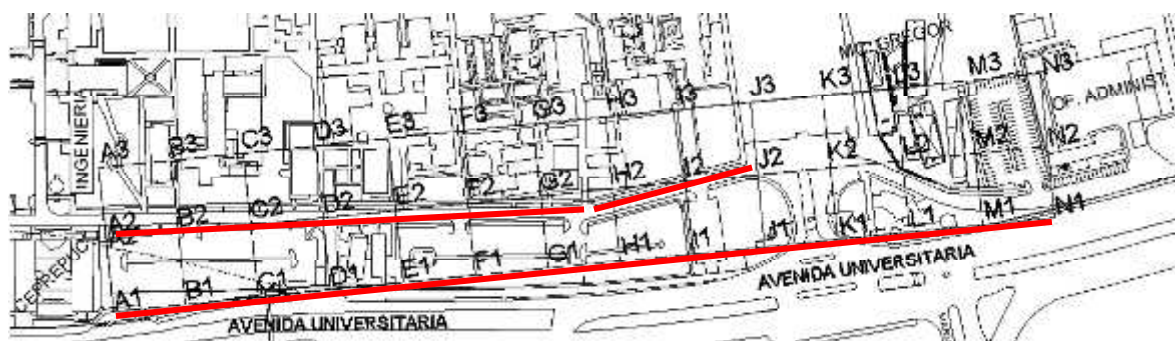


Fig 5.5 Cerco perimétrico de árboles como barreras verdes

Fuente: Propia

Como se mencionó previamente, las plantas pueden absorber contaminantes del aire. El CO_2 es el contaminante que responde casi a la mitad del peso total de los contaminantes emitidos a la atmósfera pero los árboles lo captan, absorben y convierten en oxígeno.

Las partículas suspendidas son reducidas por la presencia de árboles y arbustos. Los árboles captan partículas como arena, polvo, ceniza, polen y humo. Las hojas, ramas, troncos y sus estructuras asociadas (como la pubescencia de las hojas), atrapan las partículas que más tarde serán lavadas por la precipitación o humedad o en su defecto procesadas de manera interna por los mismos.

La creación de áreas verdes urbanas reduce en cierta medida el nivel de algunos contaminantes en el aire. Los árboles en particular captan partículas contaminantes acumulándolas en sus hojas o sirven de pantalla para detener el curso de las partículas, aunque éstas puedan afectar de alguna manera su función fotosintética.

A través de la transpiración los árboles incrementan la humedad que ayuda también a lavar el aire de partículas contaminantes. Los árboles también ayudan a enmascarar ciertos olores desagradables, reemplazándolos con aromas y fragancias desprendidas de su follaje y de sus flores. El color de la floración, la fructificación, los troncos la textura y color del follaje; la forma o silueta enriquecen visualmente un lugar. El dinamismo del movimiento y del sonido producido por las ramas y las hojas de los árboles mecidos por el viento enriquecen notablemente la calidad ambiental del lugar.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Análisis de las Conclusiones con respecto a los objetivos planteados.

1.-Se ha comprobado que en el campus de la Universidad se da la presencia de contaminantes como CO y PM₁₀ así como de otro contaminante, SO₂. Con estos contaminantes se calculó la divergencia en relación a las normas actuales de la EPA y Normas de Salud Peruanas existentes con las que se obtuvo que las concentraciones actuales en el campus en relación al CO no son significativas, pero que en conjunto con los otros dos contaminantes afectan a la infraestructura debido a que aceleran procesos y fenómenos como la carbonatación, lixiviación, eflorescencia y corrosión, así como el cambio en el fenómeno de pasivación del acero.

Utilizando una regresión del ICA elaborado y sus valores de PM₁₀ y CO se ha podido determinar que los datos obtenidos en este estudio son representativos y se pueden considerar para el universo que en nuestro caso sería toda la universidad con un porcentaje que predice el 94.9% de los casos. Con esta regresión se obtiene una ecuación para el ICA, que solo considera el PM₁₀, porque el CO está por debajo del máximo permitido. Siendo la ecuación obtenida:

$$ICA = -28.76 + 1.436 PM_{10}$$

2.-Las ecuaciones para determinar el daño que generan las concentraciones de cada uno de los materiales estudiados son las siguientes:

(1) Acero	:	Da = 0.666PM ₁₀ + 0.236SO _x
(2) Concreto	:	Dc = -0.416PM ₁₀ + 0.200SO _x
(3) Mampostería	:	Dm = 0.998PM ₁₀ - 0.1SO _x

Con las cuales se ha podido determinar las siguientes conclusiones.

- I. Se ha demostrado que la concentración de PM₁₀ y SO_x afecta mayoritariamente a la mampostería y el modelo que se postula, permitiendo explicar este daño de manera constante mediante la expresión (3)
- II. Se evidencia que el daño en el acero es parcialmente explicado por la concentración de PM₁₀ y SO_x, y solo es consistente para la data de la muestra recogida mediante la ecuación (1)

- III. No ha sido posible demostrar la afectación de la concentración de SO_x y PM₁₀ al concreto; por lo que el modelo cuya expresión es la ecuación (2) tiene baja consistencia.

3.-Se concluye que los muros de mampostería que cumplen una función de cerco perimétrico en el perímetro de la Av. Universitaria y la Universidad Católica han sido fabricados sin un control de calidad adecuado, es por esto que periódicamente la universidad tiene que cambiar y reparar columnetas y ladrillos en esta zona. Esto ha generado que el mortero de concreto se haga más permeable a agentes agresivos de CO₂ y SO₂ que ocasionan problemas de corrosión y causan el pronto deterioro de la mampostería. Los contaminantes ingresen a la armadura y al ladrillo generando un ataque químico a los materiales.

4. Se ha comprobado que en la Universidad un porcentaje elevado de edificaciones presenta un aspecto exterior con diversos niveles de degradación. El color de la fachada es un indicador de la existencia de variaciones en las características y propiedades de los materiales; el concreto sufre alteraciones cuando entra en contacto con un medio agresivo o cuando sobre el mismo se depositan a gran velocidad partículas que se van adhiriendo generando una costra.

5. Los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del concreto, éstos penetran a través de él cuando la estructura es puesta en servicio. Al llegar a la superficie del metal, provocan que la corrosión se desencadene. Una vez que la corrosión se ha desencadenado, ésta se manifestará bajo tres vertientes:

- Sobre el acero, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica.
- Sobre el concreto, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interface acero-concreto, provoca fisuras y desprendimientos.
- Sobre la adherencia acero/concreto. Ya que al perderse la adherencia empiezan a presentarse problemas estructurales.

Desde el punto de vista de la corrosión del acero en el concreto, definimos un modelo muy sencillo que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto que brinda servicios para los cuales ha sido diseñada. Este modelo se divide en dos periodos.

1. Periodo de iniciación: Tiempo en que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector.
2. Periodo de propagación: Comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable.

6.2 Recomendaciones para disminuir el grado de impacto de los contaminantes a la infraestructura.

1. Existen métodos para disminuir o controlar la concentración de PM_{10} , uno de ellos es sustituir los combustibles utilizados lo cual por el momento está fuera de alcance y otro es la utilización de cercos vivos. Un ejemplo práctico es el Caso de Chile, según el Journal Environmental Management que dice que en la provincia de Santiago se tenían altas concentraciones de PM_{10} y se optó, después de hacer un estudio en cada municipio, por este método, el cual ha rendido frutos reduciendo fuertemente las concentraciones de estas partículas en la ciudad por lo que se recomienda que a medida que la universidad siga creciendo en infraestructura, mantenga áreas verdes que le permitan seguir autososteniéndose.

Se recomienda continuar con el cerco vivo que se tiene en la zona del paradero principal entre las estaciones M1 y N1 (Fig. 6.1), donde se aprecia que debido a la presencia de arbustos, las concentraciones de partículas de PM_{10} en las estaciones M2, M3 y N2, N3 fueron bajas en relación con las demás estaciones de análisis.



Fig 6.1 Cerco vivo ubicado en las estaciones M y N

Fuente: Propia

En la Imagen 6.1 se muestran 2 fotografías de la zona mencionada y los resultados obtenidos en el análisis previo demuestran su beneficio.



Imagen 6.1 Cerco vivo en zona de análisis.

Fuente:Propia

2. El deterioro por corrosión de las estructuras de concreto armado tiene un gran impacto económico debido a que los procesos correctivos de los daños involucran mano especializada y diversos materiales. Por lo tanto, es importante conocer las causas de su origen y desarrollo para controlarlo a fin de prolongar la vida útil de las obras civiles. Frecuentemente, se han promocionado las estructuras de hormigón armado como construcciones con una vida en servicio limitada pero longeva y con mínimas exigencias de mantenimiento. Sin embargo, en ciertas circunstancias especialmente desfavorables, esto deja de ser cierto, porque existen algunos factores de corrosión capaces de despasivar al acero embebido en el hormigón, Dando lugar a velocidades de corrosión que pueden plantear serios daños en pocos años. En estas condiciones los deterioros conducen a la adopción de medidas preventivas, de costosas reparaciones, o incluso a la demolición, dependiendo de que se hayan realizado inspecciones a tiempo, a destiempo, o excesivamente tarde.

Cuando los daños afectan a una parte importante de la estructura, el procedimiento convencional de reparación implica la eliminación del hormigón carbonatado o contaminado con cloruros hasta detrás de las armaduras, la limpieza de éstas en todo su perímetro, el remplazo del concreto afectado y, frecuentemente, la aplicación de algún tipo de protección que evite nuevas reparaciones. Por tanto debemos prestar mayor atención a la exposición del parque automotor y en que sectores se dará con mayor intensidad para poder controlar o prever los posibles daños que pueda sufrir la infraestructura.

Para evitar todo lo descrito, se deben revisar las instalaciones periódicamente y evaluar su condición, preparar una base de datos de que puntos requieren mantenimiento constante y evaluar que en las futuras construcciones la calidad de los procesos constructivos sea supervisada de manera estricta y bajo procedimientos protocolizados que nos aseguren un mejor comportamiento de los materiales involucrados. Inicialmente se recomienda realizar limpieza en aquellos sectores de difícil o escaso acceso como los cercos perimetrales, azoteas y paredes de las distintas edificaciones, hay que tener en consideración que al decir limpieza no se refiere necesariamente a hacerlo a través de lavado con agua ya que eso podría empeorar las condiciones actuales.

3. Se debe tener en consideración la relación agua-cemento (a/c) en cualquiera de los proyectos que se vayan a realizar, ya que la importancia radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua tendrá menos cantidad de poros interconectados (que son permeables a líquidos y gases) en donde se aloje la humedad, esto impedirá la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión; lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por lo tanto mayor porosidad y mayor permeabilidad. Esto es de una importancia crítica para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, porque tanto los elementos soporte (como el oxígeno) como los agentes iniciadores (ión cloruro) del ataque corrosivo, pueden difundir hacia el acero a través de la masa de concreto. La velocidad de difusión del oxígeno y de los iones cloruro en el concreto es menor cuando se reduce la relación agua/cemento y por lo tanto la porosidad. También debemos considerar el uso de aditivos reductores de agua que no modifican la resistencia pero que aumentan o disminuyen dicha relación, lo cual podría cambiar las propiedades completamente y acelerar o retardar los procesos de corrosión que se dan de manera natural en el concreto. En éste caso nuevamente haría falta de un proceso de control de calidad más estricto porque no se suele atribuir los fenómenos (Carbonatación, Eflorescencias) que llamamos comunes en las construcciones como parte de un proceso de contaminación del aire.

4. En el caso del concreto, los caminos por los cuales el SO_2 y CO_2 lo atacan, parecen depender de las concentraciones atmosféricas relativas. La concentración atmosférica de CO_2 (320 ppm) (Brimblecombe, 1986), es de aproximadamente 10.000 veces la concentración de SO_2 y NO_2 (20 ppb) (Brimblecombe, 1986), resultando así que la carbonatación es un efecto mucho más significativo. Sin embargo, la carbonatación en la práctica solo es un problema si el refuerzo de acero no está protegido. El uso de una capa

de concreto lo suficientemente gruesa y de buena calidad, debe corregir este problema de deposición ácida de SO_2 que es el responsable de la erosión superficial y agrietamiento de la matriz de cemento. Esto sólo es un problema cosmético a menos que exista un efecto sinérgico con el CO_2 que resulte en un aumento de las tasas de carbonatación. Se recomienda para éste punto revisar aquellas zonas en las que el acero se encuentre expuesto, limpiar el acero deteriorado y remplazar el concreto retirado con uno de alta calidad. En la Imagen 6.2 se muestra que el acero embebido en el concreto está expuesto por lo que ya está siendo afectado.



Imagen 6.2 Concreto expuesto, pérdida de recubrimiento y corrosión en el acero.

Fuente: Propia

5.- En el caso de la albañilería, el principal mecanismo de deterioro se da en la fábrica de ladrillo en sí y es la cristalización de sales solubles. Las sales solubles son inherentes a los materiales originales durante su producción y a las fuentes de contaminantes del aire. La resistencia de la albañilería al deterioro se relaciona generalmente con la penetración del agua a las unidades. Podría ser en climas helados, cambios bruscos de mojado y secado o en su defecto por transporte de sales en el medioambiente (brisas marinas). Se recomienda utilizar ladrillos de muy buena calidad ya que el diseño y la fabricación de los componentes es muy importante, sobre todo la composición de las materias primas, la producción, los procesos y las condiciones de cocción. El control de estos podría conducir

a una baja en los niveles de sulfatos y la distribución de los tamaños de los poros, lo que mejoraría la durabilidad a largo plazo. Es decir, parece haber poco o ningún problema del efecto de la deposición ácida en el ladrillo. Sin embargo la deposición ácida en mortero podría conducir a una mayor cantidad de sales y por lo tanto un mayor grado de deterioro por sales en la mampostería de ladrillo en su conjunto.



FUENTES BIBLIOGRAFICAS

- AGUILAR, Orlando A.
1997 *Gasolina Sin Plomo... "Lo bueno, lo Malo y lo Feo". Tecnología Hoy, Panamá, 1997, Vol1, N°9, p.6-7 en: <http://www.fim.utp.ac.pa/tecnologia-hoy-vol-i>*
- BAUDRAN, Yann
2005 *Lluvias ácidas, lluvias asesinas, Brasil, p.1, en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/lluvia.pdf>*
- BRACK, Antonio
2002 *La Buena Tierra DVD N°18 "Aire limpio, ciudad limpia", Mullu Producciones, TNP, Lima en: [http://www.spda.org.pe/buscar/infoworld.exe/?in=search.in\]?datos=spda&campo1=/\(901\)&rg=25&h1=1&h2=25&boolean1=La%20Buena%20Tierra%20con%20Antonio%20Brack\\$](http://www.spda.org.pe/buscar/infoworld.exe/?in=search.in]?datos=spda&campo1=/(901)&rg=25&h1=1&h2=25&boolean1=La%20Buena%20Tierra%20con%20Antonio%20Brack$)*
- BRIMBLECOMBE, Peter
2003 *Air Polution Reviews: The Effects of Air Pollution on The Build Environment, Reino Unido, Vol2 Editorial Imperial College Pres, p.110-124,221-234*
- BROWN, P.W y CLIFTON, R.C
1988 *Durab. Build. Mater, Cap 5, p. 409-420*
- CAMPBELL, Gaylon y NORMAN, John
1998 *An Introduction to environmental biophysics, USA*
- CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DE AMBIENTE
2005 *Manual de Autoinstrucción: Orientación para el Control de la Contaminación del Aire, Estados Unidos, Cap.2,6 en: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/*
- DEFENSORIA DEL PUEBLO
2006 *Informe Defensorial N°116: La Calidad del Aire en Lima y su Impacto en La Salud y La Vida de sus Habitantes, Lima, p.16,24,27,29*
- DEFENSORIA DEL PUEBLO
2009 *Informe Defensorial N°134: La Calidad del Aire en Lima y su Impacto en La Salud y La Vida de sus Habitantes: Seguimiento de las recomendaciones defensoriales, Lima*

- DIGESA
2005 *Protocolo de Monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos, Lima-Perú*
- GOODWIN J.F y WEST, H.W.H
1982 *Proceedings of the British Ceramic Society, Cap 30, p23-37*
- HEDIN, Lars O. y LIKEN, Gene E.
1997 *Investigación y Ciencia: Polvo atmosférico y Lluvia Acida, Barcelona, Cap 3 en:*
http://www.infoagro.com/agricultura_ecologica/lluvia_acida.htm
- HERNANDEZ, Roberto y FERNANDEZ, Carlos
2007 *Fundamentos de metodología de la investigación, Ed. McGraw Hill/Interamericana de España SA, p.60-66*
- HOFFMAN, D
1976 *Proceedings of the Second International Symposium on Deterioration Building Stone, Athens, p.37-42*
- INSUNZA, Juan Carlos
2007 *Física: Introducción a la Mecánica y Calor, Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, p.274*
- KIELY, Gerard
1999 *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión, España, Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España SA, p.446*
- KUCERA, V y MATTSON, E
1987 *Atmospheric Corrosion. In "Corrosion Mechanisms", ed Masfeld F. Marcel Dekker, New York, p. 221-284*
- MARTINEZ-RAMIREZ
1996 *8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlín, p.1557-1563*
- MORENO, Luis
2005 *Beneficio de los Arboles, International Society of Arboriculture, España, p.2 en:*
http://www.treesaregood.com/treecare/tree_benefits.aspx

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

2004 *Organización Mundial de la Salud y Organización Panamericana de la Salud, guías para la calidad del aire, Lima, p.5 en:*
<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/fulltext/quiasaire.pdf>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

2005 *Organización Mundial de la Salud y Organización Panamericana de la Salud, Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la Salud en America Latina y el Caribe, Washington DC, p.23,24*

ROBERTS, Alley & Associates Inc

2009 *Manual de Control de la Calidad del Aire, México, Tomo I, p.2,5*

RODRIGUEZ, Jorge

2010 *Estudio del Efecto de la Corrosión en el Concreto Reforzado, Tesis de Licenciatura de facultad de Ingeniería con mención en Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, México, p.41,43*

SABIONNI, Cristina

2010 *The City Of Tomorrow And Cultural Heritage, en:*
http://cordis.europa.eu/eesd/ka4/02-3_es.htm

SINC

2010 *Servicio de Información y Noticias Científicas, "El deterioro de los monumentos en Marruecos", en:*
<http://www.agenciasinc.es/Noticias/Estudian-el-deterioro-de-los-monumentos-de-Marruecos>

SCHOLL-KNOFEL

1991 *Cement Concrete Res. Cap 21, p.127-136*

SWISSCONTACT

2004 *Manual de Gestión de la Calidad del aire, Lima, p.7*

VERBECK, G

1958 *ASTM Spec. Publ. N205 p. 17-36*

VIZCARRA, Gonzalo; DE LA VERA CRUZ, Pablo; GUZMAN, Rivalino e HILARIO, Violeta.

2006 *Estudio de Daños Ocasionados por la Contaminación Atmosférica en Materiales y Monumentos Históricos, p.2,8,13,16,20,21-23*

WIERTZ, Jacques
2008

*Gestión Ambiental en Minería, MI55D, Modelos atmosféricos
en dispersión de contaminantes en:*

https://www.u-cursos.cl/ingenieria/MI55D/datos_ramo/

