



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE,  
PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN  
AMBIENTAL EN INTERIORES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL

P R E S E N T A

ING. SERGIO HERNÁNDEZ GARRIDO

DIRECTOR INTERNO: M. en C. RICARDO CONTRERAS CONTRERAS

DIRECTOR EXTERNO: M en C. HELIODORO HERNÁNDEZ LUNA

MÉXICO, D.F. 2012





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F. siendo las 12:00 horas del día 28 del mes de octubre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis titulada:

“DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES”

Presentada por el alumno:

Hernández  
Apellido paterno

Garrido  
Apellido materno

Sergio  
Nombre(s)

Con registro: 

A	9	7	0	4	8	7
---	---	---	---	---	---	---


aspirante de:


MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL


Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.


### LA COMISIÓN REVISORA


Directores de tesis

  
M. en C. Ricardo Contreras Contreras

  
M. en C. Heliodora Hernández Luna

  
M. en I. Felipe López Sánchez

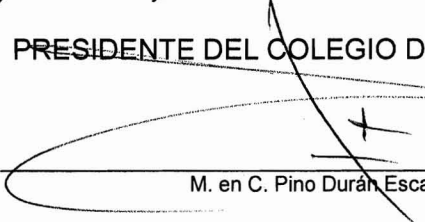
  
Dr. Jorge Hernández Estrada

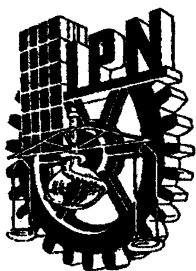
  
M. en C. Norma Josefina Ruiz Castillejos



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

  
M. en C. Pino Durán Escamilla



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F.; el día **28** del mes de **octubre** del año **2011**, el que suscribe **Hernández Garrido Sergio**, alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental**, con número de registro **A970487**, adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de **M. en C. Ricardo Contreras Contreras** y **M. en C. Heliodoro Hernández Luna**, y cede los derechos del trabajo intitulado **“DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **sehernandezg@ipn.mx** Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Hernández Garrido Sergio

Nombre y firma

## RECONOCIMIENTOS

**Al Instituto Politécnico Nacional**

por brindarme la oportunidad de ser parte de el,  
de su visión y misión, para formar mexicanos al  
servicio de la patria.

A la **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura  
Unidad-Zacatenco**, por la oportunidad brindada de  
continuar mis estudios de posgrado, con una  
formación de calidad.

A la **Escuela Superior de Ingeniería Química e  
Industrias Extractivas**, por formarme como Ingeniero  
y mostrarme que puedo apoyar a mí México.

Y por último, pero no menos importante, ya que gracias al **Centro  
de Estudios Científicos y Tecnológicos “Miguel Bernard”**  
inicio mis sueños hechos realidad hasta el día de hoy.

## **AGRADECIMIENTOS**

**Al ser supremo que nos da la vida y la oportunidad  
de escoger el rumbo de la misma.**

**A mis padres, Heliodoro y Beatriz,  
gracias a ellos y a sus consejos, amor, paciencia  
y oraciones he llegado a ser un hombre de bien.**

**A mi hermana, a quien le digo,  
es bueno tener a alguien como ejemplo,  
pero es mejor ser uno mismo.**

**A Ana María, que cuando mi alma está adolorida,  
cuando flaquea todo mi corazón, ahí estas en medio, en mi vida.**

**A mis dos tesoros que Dios me dio,  
Leopoldo Heliodoro y Sergio, esperando  
que esta etapa de vida, sea una motivación de  
superación para ustedes y deseándoles que siempre  
busquen ser mejores y que sus anhelos los alcancen.**

**A la maestra Flor del Monte Arrazola Domínguez,  
y quiero decir maestra, con toda la extensión de la palabra  
y lo que esto significa, mil gracias por mi fortaleza, por el apoyo,  
confianza y enseñanzas, siempre recordaré “Las palabras tienen efecto”.**

**Al Ing. Moisés Villafranca Gómez, gracias por sus consejos,  
confianza y el apoyo incondicional.**

**A mi maestro y asesor M. en C. Ricardo Contreras Contreras,  
mi agradecimiento por su apoyo para la realización de esta tesis  
y por lo que esto significa en mi vida profesional.**

**A mis alumnos y amigos Rodrigo, Néstor, Roselia, Lupita y Pollo,  
que cuando más necesitaba de apoyo estuvieron presentes.**

**ÍNDICE**

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	i
<b>ÍNDICE DE FIGURA</b>	ii
<b>RESUMEN</b>	iv
<b>ABSTRACT</b>	v
<b>INTRODUCCIÓN</b>	vi
<b>PROBLEMÁTICA</b>	viii
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	viii
<b>OBJETIVOS</b>	ix
<b>HIPÓTESIS</b>	ix
<b>ALCANCES</b>	x
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES SOBRE EL GRADO DE CONTAMINACIÓN EN INTERIORES, EN MÉXICO Y EN EL EXTRANJERO.</b>	
I.1 Localización del área	2
I.2 Contaminación ambiental	4
I.3 Grado de contaminación en interiores en México	7
I.4 Grado de contaminación en interiores en el extranjero	19
I.5 Marco legal y normativo en México para la protección al ambiente	22
I.6 Marco legal y normativo en el extranjero	40
<b>CAPÍTULO II. SELECCIÓN DEL MATERIAL ADSORBEDOR Y DE SOPORTE</b>	
II.1 Aspectos generales	43
II.2 Origen de la estructura porosa y descripción de un sólido poroso	44
II.3 Principales métodos de caracterización	46
II.4 Clasificación de los materiales adsorbentes	52
II.5 Adsorbedor y soporte seleccionados	77
<b>CAPÍTULO III. DISEÑO DEL ADSORBEDOR</b>	
III.1 Principio de adsorción	80
III.2 Desarrollo experimental. Obtención del adsorbedor zeolita faujasita	83
III.3 Investigación de la actividad adsorbedora	89
III.4 Propuesta del purificador	102
<b>CAPÍTULO IV. PRUEBAS DE CAMPO</b>	
IV.1 Descripción de las pruebas	117
IV.2 Presentación de resultados	122
IV.3 Análisis y discusión de resultados	125
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	137
<b>REFERENCIAS</b>	139
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	146

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla I.1	Marco Geoestadístico.	3
Tabla I.2	Índice de octano de diversos compuestos.	14
Tabla I.3	Grupos que influyen en la política del medio ambiente.	20
Tabla I.4	Distribución de atribuciones de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su reglamento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica.	29
Tabla I.5	Normas Oficiales Mexicanas expedidas que establecen los máximos niveles permisibles de emisión de contaminantes.	33
Tabla I.6	Atribuciones administrativas del gobierno Federal y de las entidades locales en el control de la contaminación del aire.	37
Tabla I.7	Secciones más importantes de la Clean Air Act de 1970, según las enmiendas de 1977 y 1990.	40
Tabla II.1	Clasificación de filosilicatos en bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos.	54
Tabla II.2	Tipos de arcillas que poseen una elevada superficie.	56
Tabla II.3	Capacidad de intercambio catiónico en zeolitas.	57
Tabla III.1	Tipos de zeolitas.	84
Tabla III.2.	Materiales y reactivos para la determinación de la isoterma de adsorción.	89
Tabla III.3.	Coeficientes de distribución para contaminantes orgánicos.	92
Tabla III.4.	Concentraciones que equivale a los 100 puntos IMECAS	103
Tabla IV.1	Porcentaje de conversión de iones bromuro.	125
Tabla IV.2	Tasas específicas de reacción para trimetilamina y el bromuro de n-propilo.	128
Tabla IV.3	Evaluación geométrica de la pendiente de la curva (figura IV.1)	128
Tabla IV.4	Concentraciones específicas de reacción para el hidróxido de sodio y el ácido acético.	129
Tabla IV.5	Determinación de la isoterma de adsorción.	131
Tabla IV.6	Resumen de resultados.	131
Tabla IV.7	Datos para la isoterma y predecir el comportamiento del carbón activado.	132
Tabla IV.8	Valores de la isoterma de adsorción	134
Tabla IV.9	Valores obtenidos a partir de la regresión lineal	134

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura I.1	Mapa de los Estados Unidos Mexicanos.	2
Figura I.2	Distrito Federal y sus Delegaciones.	3
Figura I.3	Ambiente contaminado en la Ciudad de México.	8
Figura I.4	Emisiones de los contaminantes claves del aire exterior en Estados Unidos.	10
Figura I.5	Diámetro medio de partículas suspendidas.	12
Figura I.6	Contaminantes del aire interior.	13
Figura II.1	Esquema de las fuerzas de cohesión en un sólido y en un sólido con un gas adsorbido.	43
Figura II.2	Esquema de la evolución de la energía potencial de una molécula de gas acercándose a una superficie plana.	44
Figura II.3	Modelos comunes de poros.	45
Figura II.4	Modelos y tipos de poros en un corte de un sólido poroso	46
Figura II.5	Esquema del plano de un sólido poroso.	47
Figura II.6	Representación esquemática de los seis tipos de isothermas de adsorción.	47
Figura II.7	a) Isotherma en la que se muestran la zona de llenado de la monocapa, la multicapa y el punto B; y b) Isotherma tipo I en la que se señala cómo calcular el volumen de poro a partir de la cantidad máxima de gas adsorbido.	48
Figura II.8a	Histéresis tipo A y las estructuras de poro posibles.	50
Figura II.8b	Histéresis tipo B y las estructuras de poro posibles.	50
Figura II.8c	Histéresis tipo C y las estructuras de poro posibles.	51
Figura II.8d	Histéresis tipo E posibles.	51
Figura II.9	Capas tetraédricas.	53
Figura II.10	Unión y disposición de las capas.	54
Figura II.11	Caolín, generalidades y propiedades físicas.	60
Figura II.12	Tamaños de poro de zeolitas naturales y sintéticas a (-) 77 K y (-) 420 K comparados con los diámetros cinéticos de algunas moléculas.	70
Figura II.13	Forma de algunas moléculas sencillas, D es el diámetro cinético correspondiente.	71
Figura II.14	Capacidad de adsorción de agua de la zeolita A en función de la temperatura de calentamiento.	71
Figura II.15	El butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) puede ser: (a) butano normal (n- C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) o (b) isobutano (i- C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ).	72
Figura II.16	Velocidad de eliminación de calcio en agua de lavado.	73
Figura II.17	Cantidad de Ca <sup>++</sup> y Mg <sup>++</sup> residual a los 10 minutos de operación en función de la cantidad de zeolita añadida.	74
Figura II.18.	Hidrocarburos del petróleo: (a) parafina; (b) olefina; (c) nafteno; (d) aromático.	75
Figura II.19	Diferencia entre los átomos de una superficie y los átomos	



**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN  
AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

	del volumen de un cristal.	76
Figura II.20	Metodología para la selección del adsorbente y soporte.	77
Figura II. 21	Diseño del soporte para la zeolita faujasita.	78
Figura II. 22	Horas vs ppm del adsorbedor de faujasita.	78
Figura III.1	Diferentes procesos.	81
Figura III.2	Representación esquemática del proceso de adsorción.	81
Figura III.3	Equipo de procesamiento de la zeolita faujasita <b>X</b> y <b>Y</b> .	86
Figura III.4	Diagrama del proceso de obtención de zeolitas.	87
Figura III.5	Diagrama de bloques para la obtención de zeolita faujasita.	87
Figura III.6	Isotermas de Freundlich y Langmuir.	90
Figura III.7	Forma dinámica para reducir NO <sub>x</sub> de FCC.	102
Figura III.8	Propuesta del proceso de limpieza del aire contaminado.	103
Figura III.9	Zeolita faujasita con una actividad del 50%.	111
Figura III.10	Gráfica del conjunto de curvas que demuestra los efectos de (1) crecimiento de la magnitud de la entalpía de adsorción a una temperatura fija, o (2), la temperatura decreciente para un sistema de adsorción dado.	112
Figura III.11	Demostración de los efectos de la presión y temperatura sobre los recubrimientos de la superficie a un equilibrio particular.	112
Figura III.12	Demostración de la etapa 1.	113
Figura III.13	Demostración de la etapa 2.	113
Figura III.14	Obtención del valor de entalpía de adsorción.	114
Figura III.15	Demostración de variación de presión.	116
Figura III.16	Curvas de Freundlich y Langmuir.	120
Figura III.17	Curvas de concentración de Freundlich y Langmuir	121
Figura IV.1	Dispositivo de aluminio de 1ft <sup>3</sup>	123
Figura IV.2	Equipo de laboratorio	124
Figura IV.3	Gráfica de la adsorción de la faujasita	124
Figura IV.4	Concentración de iones Bromo vs Tiempo	128
Figura IV.5	Muestra de faujasita en hidróxido de sodio para titulación.	129
Figura IV.6.	Concentración vs Tiempo	130
Figura IV.7	Ecuación de Langmuir 1/C vs 1/V.	132
Figura IV.8	Gráfica q vs C	134
Figura IV.9	Representación de la regresión lineal de la isoterma de Langmuir	135

## **RESUMEN**

Cortez-Lugo M y col., presentaron en 1998 una **Evaluación de la calidad del aire interior y exterior en un jardín de niños de la Ciudad de México**, que muestra las diferencias en los niveles de ozono ( $O_3$ ) y bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) en el suroeste de la Ciudad de México.

El comportamiento de  $O_3$  y  $NO_2$  reportado en los últimos años es similar, de modo que los resultados encontrados en este estudio, no difieren de los reportados en trabajos recientes. Por otro lado, existen pocos estudios que demuestren la relación de las concentraciones de  $O_3$  al aire libre e interiores.

Con respecto a la legislación, es importante tener en cuenta que la mayoría de las normas están dirigidas para controlar los niveles de la contaminación del aire exterior, y las leyes que regulan la contaminación del aire interior, son establecidas por oficinas no gubernamentales y varían de un país a otro.

Se considera que el desarrollo de un purificador de aire ayudaría a reducir los niveles de contaminación en interiores domésticos y públicos es de gran impacto ambiental. Para el diseño es necesario determinar los agentes contaminantes, seleccionar el material adsorbente de los óxidos de carbono ( $CO_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), hidrocarburos (HC) y el soporte. Se propone utilizar zeolita faujasita, un material que está disponible a bajo costo, así mismo investigar su actividad adsorbente, pruebas de campo y el costo preliminar.

Por lo tanto, se procedió a hacer un estudio de fondo sobre los niveles de contaminación del aire en México y el extranjero en los interiores domésticos y de oficina, la selección del material adsorbente, el soporte de éste y de su origen, la caracterización de los principales métodos para la selección de uno de ellos, detallando el diseño del adsorbedor, procedimiento experimental y los equipos utilizados, las pruebas de campo muestran los resultados, y finalmente, un análisis y discusión de los mismos.

Los resultados de esta investigación se centran en la verificación de la exactitud y linealidad de las isotermas de Langmuir y Freundlich, que son útiles para predecir el comportamiento de la adsorción de zeolita faujasita. Además, el método de la isoterma Brunauer-Emmett-Teller (BET) se determinó por la cantidad de gas adsorbido en el carbón vegetal de una manera indirecta, con valores entre 0.084 y 0.841.

De la investigación, trascendió que la isoterma BET es esencial para medir el área del carbón vegetal, ya que la superficie es muy irregular y porosa, por lo que no es posible obtener el valor directamente.

## **ABSTRACT**

Cortez-Lugo M, et al., submitted in 1998 a quality assessment of indoor and outdoor air in a nursery school in Mexico City that shows the differences in levels of ozone (O<sub>3</sub>) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) in southwestern Mexico City.

The behavior of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> reported in recent years is similar, so that the results found in this study are similar to those reported in recent papers. On the other hand, there are few studies showing the relationship of O<sub>3</sub> concentrations outdoors and indoors.

With regard to the law, it is important to note that most are designed to control the reduction of outdoor air pollution, and laws governing indoor air pollution, are established by non-governmental offices and vary from country to country.

It is considered that the development of an air purifier to reduce pollution levels in domestic interiors and public is of great environmental impact, the design is necessary to determine contamination levels, select the adsorbent material of carbon oxides (CO<sub>x</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), hydrocarbons (HC) and the bracket using a faujasite zeolite material is available at low cost, investigate their adsorptive activity, field tests and the preliminary cost.

Therefore, we proceeded to do a background study on air pollution levels in Mexico and abroad in the home and office interiors, the selection of adsorbent material, support it and its origin, the characterization of the main methods for selecting one of them, detailing the design of adsorbent, experimental procedure and equipment used, field tests show the results, and finally, an analysis and discussion of them.

The results of this research is focused on verifying the accuracy and linearity of the isotherms of Langmuir and Freundlich, which are useful for predicting the behavior of the faujasite zeolite adsorber. Moreover, the method of isothermal Brunauer-Emmett-Teller (BET) was determined by the amount of gas adsorbed on charcoal in an indirect way, with values between 0084 and 0841.

In the investigation, it transpired that the BET isotherm is essential to measure the area of charcoal, as the surface is very irregular and porous, so it is not possible to obtain the value directly.

## **INTRODUCCIÓN**

Las personas pasan del 50 al 70% en promedio de su tiempo en lugares cerrados y hasta la fecha nadie, por ahora, regula o controla la contaminación en el interior de los hogares y edificios no industriales; las mediciones encontradas, por lo regular indican que las concentraciones de contaminantes, pueden ser más altas que las registradas en el exterior.

En el artículo “Salud Publica Mexicana. 1998; 40:415-420”, intitulado **Evaluación de la calidad del aire interior y exterior en un jardín de niños en la Ciudad de México**, se muestran las evaluaciones de las diferencias en los niveles de ozono ( $O_3$ ) y bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) en el interior y el exterior del jardín de niños en el suroeste de la Ciudad de México.

Los resultados arrojaron que el  $NO_2$  dentro y afuera no sobrepasó la norma oficial mexicana (0.21 ppm.). El coeficiente de correlación entre las concentraciones máximas de  $NO_2$  de la estación de monitoreo local de la Ciudad de México y el exterior del salón fue de 0.82 ( $p < 0.001$ ). En relación con el  $O_3$ , la concentración máxima fuera del salón fue de 0.29 ppm y dentro de 0.17 ppm., lo cual da un promedio por debajo de 0.06 ppm; y se observó que, por cada 1.7 ppm., en el exterior hay 1.0 ppm en el interior ( $p < 0.05$ ).

Es importante señalar que la mayor parte de la legislación está dirigida a reducir la contaminación del aire exterior, y las leyes que la regulan son diferentes y establecidas por oficinas distintas al Gobierno Federal y Estatal de México y de los Gobiernos de los demás países del planeta.

Por lo anterior, la presente tesis se divide en cuatro capítulos que abordan la siguiente información: el capítulo I, describe los antecedentes sobre el grado de contaminación en interiores en México y extranjero, localización del área, contaminación ambiental, marco legal y normativo en México y en el extranjero para la protección al ambiente.

En el capítulo II, se hace una selección del material adsorbedor y de soporte, considerando los aspectos generales, origen de la estructura porosa y descripción de un sólido poroso, métodos de caracterización, clasificación de los materiales adsorbentes y la selección del adsorbedor y soporte.

El capítulo III, describe el diseño del adsorbedor, considerando el principio de adsorción, método experimental, obtención del adsorbedor zeolita faujasita, la investigación de la actividad adsorbedora y la propuesta del purificador.

Para el capítulo IV, se presentan las pruebas de campo, descripción de las pruebas, presentación de los resultados, el análisis y discusión de éstos.

Por último, se presenta la conclusión del diseño del purificador de aire, para la reducción de los contaminantes ambientales en interiores, resaltando las siguientes:

- Se verificó la exactitud y linealidad de la isoterma de Langmuir y de Freundlich, como factor importante en los estudios de adsorción.
- El carbón activado pulverizado proporciona datos de adsorción de manera eficiente y en un corto tiempo, debido a la velocidad por llegar al equilibrio.
- La isoterma BET es indispensable para medir el área del carbón vegetal poroso, ya que los estudios de adsorción son muy irregulares, por ello no es posible obtener ese valor directamente.
- El adsorbente que se examinó fue la faujasita que es soportada en el carbón activado.
- Las pruebas que se hicieron fueron corridas en los días más fuertes en contaminación, donde se desconectó la computadora al sistema y se alimentó directamente del aire contaminado, y registró 100 ppm. continuamente, por lo tanto, se tomaron estos valores como seguros en la experimentación.

## **PROBLEMÁTICA**

Las principales fuentes de emisiones de contaminantes en el interior de hogares y oficinas son el fumar, la combustión de gas por las estufas, el uso de solventes, productos químicos para limpieza, las emisiones de los materiales de construcción de la propia estructura y, además, la contribución a estos factores, de la contaminación del exterior.

Por lo tanto, la contaminación del aire es el mayor riesgo a la salud de los seres humanos, animales, vegetación, por lo que es necesario hacer algo más, no solo medidas de restricción, sino alternativas más efectivas.

A partir de zeolitas naturales o sintéticas y arcilla, que son materiales que se consiguen fácilmente a un bajo costo, y aprovechando las propiedades adsorbentes que tienen, ciertos materiales como el carbón (C) vegetal o mineral, y en función de sus áreas de adsorción, la presente investigación experimental pretende comprobar la factibilidad de purificar el aire que se respira en interiores.

Será una aportación a la ingeniería ambiental para solucionar un problema real; y que las constructoras de casas habitación u oficinas, dentro de su presupuesto-costos de la vivienda, incluyan a futuro este dispositivo para brindar un aire interior más limpio.

## **JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad, la contaminación del aire ambiental es el mayor riesgo para la salud de los seres humanos, principalmente en sus vías respiratorias. Además, que la vegetación y cultivos son dañados por la emisión de vapores ácidos que se incorporan al ciclo hidrológico ocasionando el fenómeno conocido como lluvia ácida.

Los ciudadanos del Distrito Federal (D.F.), realizan diversas actividades en un promedio de 12 horas al día, como mínimo y las otras 12 horas en sus hogares, pero es evidente que la contaminación del aire no solo se encuentra en el exterior, sino en interiores como los hogares y oficinas, por lo que se puede asegurar que los habitantes de las grandes urbes están en contacto con los contaminantes del aire las 24 horas del día, y los habitantes del Distrito Federal no son la excepción, ya que México no es un país de primer mundo, pero es la Ciudad con la población más grande del planeta.

Aunque en el Distrito Federal se está tratando de combatir la contaminación del aire, por ejemplo, el programa del "Hoy no circula", monitoreo de industrias, etc., es necesario que por lo menos en el lugar donde se reposa o se realizan actividades profesionales o cotidianas, tenga una disminución y protección de todos aquellos contaminantes del aire y brindar una mejor calidad de vida.

## **DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

Los contaminantes en la atmósfera se dispersan en el aire, aunque esto en el Distrito Federal se presenta en forma irregular, ya que las montañas que lo rodean constituyen una barrera natural que dificulta la circulación del viento, además de ser débil e intermitente durante la mayor parte del año, impidiendo el desalojo del aire contaminado hacia fuera del valle. Otro fenómeno son las inversiones térmicas, las que ocasionan que la atmósfera se estabilice causando la inhibición del mezclado vertical del aire.

Para dar una propuesta resolutive al problema, se desarrollará un **PURIFICADOR DE AIRE**, que adsorba los contaminantes: monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) e hidrocarburos (HC), para darles un tratamiento térmico y oxidarlos en bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno gas (N<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) respectivamente. Los cuales son menos nocivos para la salud de las personas, favoreciendo la calidad de vida en los interiores de hogares así como en lugares públicos de la zona metropolitana del D.F.

### **OBJETIVOS**

#### ***Objetivo general:***

Desarrollar un purificador de aire, para reducir los niveles de contaminación, en interiores domésticos y públicos.

#### **Objetivos específicos:**

- Determinar grados de contaminación en interiores domésticos y públicos para la cuantificación de gas adsorbido por gramo de adsorbedor.
- Seleccionar el material adsorbedor para reducir y establecer la capacidad de adsorción de los contaminantes CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e HC.
- Desarrollar experimentalmente el adsorbedor zeolita-faujasita para obtener información de su velocidad de adsorción.
- Establecer los métodos de caracterización de adsorbedores y soportes que permitan la clasificación de la porosidad en el material.
- Verificar la exactitud y linealidad de la isoterma de Langmuir y Freundlich.
- Aplicar la isoterma de Langmuir para la determinación de la entalpía de adsorción.
- Proponer el proceso de limpieza de aire contaminado para el tratamiento de los gases contaminantes.

### **HIPÓTESIS**

Se reducirán los niveles de contaminantes en lugares cerrados, mediante la implementación de un purificador de aire en interiores domésticos y públicos, para aumentar la calidad de vida de la población.

## **ALCANCES**

Mejorar de una manera satisfactoria la calidad del aire, de los actuales contaminantes primarios y secundarios del aire que se respira en los interiores de oficinas y hogares de la zona metropolitana, los cuales provocan deterioro a la salud de los habitantes.

Al disminuir dichos contaminantes, la calidad de vida de la población mejorará, principalmente en la época de invierno, en donde son más frecuentes la inversión térmica y el incremento de casos de enfermedades de las vías respiratorias.



# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES SOBRE EL GRADO DE CONTAMINACIÓN EN INTERIORES, EN MÉXICO Y EN EL EXTRANJERO

## **I.1 Localización del área**

La extensión territorial de México, es de 1 964 375 Km<sup>2</sup>, de los cuales 1 959 248 Km<sup>2</sup> son superficie continental y 5 127 Km<sup>2</sup> corresponden a superficie insular.<sup>[1]</sup>

La Ciudad de México, cuenta con el 0.1% de la superficie del país, es decir 1964.375 Km<sup>2</sup>, al encontrarse a 2,240 metros sobre el nivel del mar, contiene 23% menos oxígeno que al nivel del mar, produciendo esta deficiencia de oxígeno que los procesos de combustión sean menos eficientes, causa principal de la incorporación excesiva a la atmósfera de monóxido y bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.

Por otra parte, está rodeada por montañas de más de 3 000 m de altura, lo que limita la circulación del viento en la superficie e incrementa la concentración de contaminantes; a ello se aúna la existencia de un clima subtropical, con lluvias de Mayo a Octubre y sequia durante el resto del año. La altitud de la Ciudad de México, contribuye a una ineficiente combustión de los vehículos de motor, lo que aumenta las emisiones de precursores de ozono.

El Distrito Federal, capital de la Ciudad de México, es uno de los 32 estados que forman parte de los Estados Unidos Mexicanos (fig. I.1 y fig. I.2.), con 2 180 243 casas habitación



Figura I.1. Mapa de los Estados Unidos Mexicanos.<sup>[2]</sup>

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**



Figura I.2. Distrito Federal y sus Delegaciones.<sup>[3]</sup>

Sus aspectos geográficos se muestran en la tabla I.1

Tabla I.1. Marco Geoestadístico <sup>[4,5,6]</sup>

Nombre oficial del estado	Distrito Federal(a)
Capital	Ciudad de México(a)
Coordenadas geográficas extremas	Al norte 19°36', al sur 19°2' de latitud norte; al este 98°56', al oeste 99°22' de longitud oeste.(b)
Porcentaje territorial	El Distrito Federal representa el 0.1% de la superficie del país.(b)
Población Hombres	4,233,783 (c)
Población Mujeres	4,617,297 (c)
Población Total	8,851,080 (c)

## **I.2. Contaminación ambiental**

La contaminación atmosférica se define como la “presencia en la atmósfera o en el aire de uno o más contaminantes”, en cantidad y duración tal, que sea perjudicial para el hombre, la vida vegetal o animal, las construcciones o el desarrollo de un negocio. La contaminación puede ser tóxica, irritar los ojos y la nariz, dificultar la respiración o reducir la visibilidad.<sup>[7]</sup>

Efectos a la salud humana. Los daños a la salud humana causados por la contaminación del aire, normalmente no son el resultado de una sola exposición, sino de una serie de exposiciones a bajas concentraciones durante largos períodos.

Los contaminantes del aire que son considerados peligrosos para la salud humana y que, en la actualidad, se regulan son:<sup>[7]</sup>

- Óxido de azufre (SO<sub>x</sub>)
- Materia en partículas finas
- Monóxido de carbono (CO)
- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Plomo

Se sabe que no tiene significado hablar de cualquier sustancia como nociva, a menos que se especifique la dosis, es lo que la hace nociva o no. Lo mismo se cumple para la contaminación del aire sobre la salud humana, debe considerarse la dosis que reciben las personas, y se expresa como:

$$\text{Dosis} = \int (\text{Concentración en el aire respirado}) \, d(\text{Tiempo})$$

El interés actual en la contaminación del aire y la salud está dirigido en su mayor parte a exposiciones a bajas concentraciones y de larga duración, las cuales conducen a efectos crónicos, por lo que se tiene.

$$\text{Dosis dañina} = \int [(\text{razón de ingestión debido a la respiración}) - (\text{razón de eliminación por primer mecanismo})] \, d(\text{tiempo})$$

A continuación se presentan los factores sanitarios de los compuestos orgánicos e inorgánicos de los contaminantes atmosféricos, considerados peligrosos para la salud humana que actualmente son regulados.

**Plomo.** El plomo es venenoso en todas sus formas, pero en diferentes grados que dependen de la naturaleza química y de la solubilidad del compuesto de plomo. El Centro de Estados Unidos para el control de enfermedades (U.S. Center for Disease Control) recomienda que el nivel sanguíneo en niños, no debe ser

mayor de 30 microgramos por 100 mL. Las disposiciones de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), limita la exposición a compuestos inorgánicos de plomo, para un empleado sin mascarilla de respiración de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de aire durante un tiempo promedio de un turno de 8 horas.

Todos los compuestos de plomo son considerados tóxicos, especialmente los orgánicos. El límite común permisible de exposición a compuestos orgánicos de plomo de la OSHA es de  $75 \mu\text{g Pb}/\text{m}^3$  (aproximadamente 9 ppb) en el ambiente.<sup>[7]</sup>

**Óxidos de azufre.** Los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) como contaminantes atmosféricos incluyen el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y sales (sulfitos y sulfatos) correspondientes. La combustión de combustible fósil, sólido y líquido que contiene azufre (hulla o petróleo) en las plantas generadoras de energía es la principal fuente de estos contaminantes químicos.

**Dióxido de azufre.** Una vez que entra en la atmósfera, se oxida formando ácido sulfúrico y partículas de sulfatos entre  $0.2$  y  $2.0 \mu\text{m}$  de diámetro que corresponden de un 5 a 20% de las partículas suspendidas principalmente en las áreas urbanas como la Ciudad de México. El incremento de la humedad atmosférica, así como los porcentajes más elevados de humedad relativa, dan por resultado un aumento de la relación del ácido sulfúrico con respecto al dióxido de azufre y en la formación de gotas de ácido sulfúrico y partículas de sulfatos de mayor tamaño. El dióxido de azufre solo es un irritante respiratorio leve; la mayor parte de los efectos perjudiciales de los óxidos de azufre son causados por una combinación de éstos con ácido sulfúrico, o partículas de sulfatos.

**Monóxido de carbono.** Las emisiones de este compuesto a la atmósfera exceden el total combinado de los otros cuatro contaminantes principales. Para adaptar los niveles más altos, las concentraciones ambientales se expresan en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , igual que los otros contaminantes; aproximadamente del 75 al 95% de las emisiones de monóxido de carbono son producidas por vehículos de transporte. El resto de los gases son el resultado de la combustión incompleta de combustibles distintos a la gasolina. Son vertedores potenciales a la atmósfera superior, los vegetales y microorganismos del suelo que lo integran en su metabolismo, el mar y las superficies que lo absorben.

Se calcula que el tiempo promedio de residencia en la atmósfera para el monóxido de carbono es de cinco años. Este compuesto es absorbido por los pulmones, reacciona con la hemoglobina para formar carboxihemoglobina (COHb), la cual reduce la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre. La base de los índices de monóxido de carbono es la protección contra niveles de carboxihemoglobina superiores al 2% en personas que no fuman.<sup>[8]</sup>

**Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).** Se refiere a dos óxidos gaseosos del nitrógeno, dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y óxido nítrico o monóxido de nitrógeno (NO). Cuando

se miden las concentraciones de óxido nítrico, se expresa como dióxido de nitrógeno. La mayor parte de los óxidos de nitrógeno corresponden al óxido nítrico, producido por los fertilizantes, las turbinas alimentadas con gas natural que mueven los compresores en las plantas de gas y a lo largo de oleoductos y gasoductos, y la combustión a temperatura elevada de la hulla, petróleo o gas natural en las plantas generadoras de energía y de las gasolinas en las máquinas de combustión interna.

El dióxido de nitrógeno es el único de los contaminantes principales de la atmósfera que es visible y es el responsable del color café de la capa de *smog*. El tiempo de permanencia del dióxido de nitrógeno en la atmósfera es de unos cuantos días. El valor de la concentración anual promedio varía desde menos de 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como concentración natural, a 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en áreas urbanas.

**Hidrocarburos.** El principal objetivo en el control de hidrocarburos es reducir la concentración de oxidantes fotoquímicos limitando las emisiones de hidrocarburos distintos al metano, en especial las oleofinas y los compuestos aromáticos. La mayoría de los hidrocarburos contaminantes distintos al metano se descargan al aire durante la combustión incompleta, en especial por los motores de gasolina de los automóviles y por evaporación de otras fuentes.

**Los oxidantes fotoquímicos.** Son sustancias atmosféricas que se forman por reacciones en cadena estimuladas por la luz. Los oxidantes típicos son el ozono, (el más abundante en la atmósfera contaminada), nitrato y nitrito de peroxiacetileno y dióxido de nitrógeno. El ozono existe en grandes cantidades en la estratósfera, donde se forma mediante procesos fotoquímicos en los que el oxígeno de las capas superiores absorbe la radiación solar ultravioleta, mediante descargas eléctricas.<sup>[8]</sup>

Como contaminantes, el ozono y otros oxidantes se producen principalmente en la capa más baja de la atmósfera por reacciones fotoquímicas entre la radiación solar y los precursores oxidantes, óxido de nitrógeno e hidrocarburos.

El óxido nítrico es el principal suministrador de oxígeno en el proceso de la reacción fotoquímica. Aunque no existe correlación entre concentraciones elevadas de oxidantes y un aumento en la mortalidad o morbilidad, los oxidantes tienen un importante efecto perjudicial en la vegetación, los materiales y la comodidad del hombre.

El efecto combinado de ozono y dióxido de azufre o dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre puede causar más daño a la vegetación que cualquiera de los contaminantes por separado a la misma concentración. Muchos polímeros orgánicos sufren alteraciones químicas y el caucho se agrieta cuando se le expone al ozono. Cuando la concentración del oxidante en el ambiente alcanza 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.0002ppm), ocasiona irritación en los ojos.

**La materia orgánica policíclica.** En el aire se asocia exclusivamente con la materia en forma de partículas, especialmente el hollín. El tamaño de las partículas es generalmente  $< 5\mu\text{m}$  de diámetro. Dos clases de esta materia son los azareños, identificados como carcinógenos en animales, y los hidrocarburos aromáticos policíclicos, especialmente el benzo[ $\alpha$ ]pireno que procede del humo del cigarrillo, de los hornos alimentados con carbón de piedra y vehículos automotores sin control de emisiones.

**Bióxido de carbono.** Su concentración promedio se ha incrementado de 290 ppm antes del año 1900 a 300 ppm en la década de 1950. Es muy poca la cantidad de radiación solar visible que absorbe el bióxido de carbono; sin embargo, es opaco a ciertas bandas de la radiación de onda larga terrestre. Por lo tanto, al aumentar la cantidad de bióxido de carbono en la atmósfera disminuye la cantidad de energía que la tierra libera hacia el espacio, lo que da como resultado un incremento de la temperatura en la superficie del planeta.<sup>[8]</sup>

El CO y el NO son contaminantes primarios, y son emitidos en su mayor parte por los automóviles, como lo son los hidrocarburos (HC). La mayor concentración de estos contaminantes, se tiene durante la mañana.

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) son contaminantes secundarios que se forman en la atmósfera por un conjunto complejo de reacciones, las cuales se resumen como:



### **I.3. Grado de contaminación en interiores en México<sup>[9]</sup>**

El problema de la calidad del aire en las mega ciudades ha alcanzado grandes dimensiones, tal es el caso de la Ciudad de México en donde el crecimiento de la población y la demanda de servicios han incrementado enormemente las necesidades de energía y transporte, además las montañas que lo rodean constituyen una barrera natural que dificulta la circulación del viento, ya que durante la mayor parte del año es débil e intermitente, impidiendo el desalojo del aire contaminado hacia fuera del valle.

Otro fenómeno que propicia el estancamiento de los contaminantes son las inversiones térmicas, que ocasionan que la atmósfera se estabilice causando la inhibición del mezclado vertical del aire.

Las 2 180 243 casas habitación de la Ciudad de México, constituyen un riesgo para la salud de los residentes del Distrito Federal, porque, si se observa a través de alguna ventana de estas casas, se ve una gran evidencia de contaminación en las afueras, pero si se voltea y mira hacia adentro nos daremos cuenta de que vivimos en un verdadero medio ambiente tóxico (fig. I.3).



Figura I.3 Ambiente contaminado en la Ciudad de México<sup>[10]</sup>

Los contaminantes del aire interior pueden ser clasificados en 5 principales categorías:

1. Compuestos orgánicos volátiles.
2. Residuos tóxicos por combustión.
3. Plaguicidas.
4. Contaminación por campos electromagnéticos.
5. Sustancias que ocurren en forma natural.

Los agentes químicos tóxicos en los hogares afectan a todos, pero especialmente a los niños y a aquellos que son ambientalmente sensibles. Pensemos en las horas que pasamos dentro de nuestra casa, por lo que es de vital importancia mejorar la calidad del aire dentro de estos hogares, ya que los hogares son un refugio. Cuando hay contingencia ambiental en la Ciudad de México, las autoridades indican no salir de casa, por lo que hay una consideración de que es menor la contaminación que afuera.

En la actualidad se usan muchos nuevos materiales en la industria de la construcción y del mobiliario. Estas nuevas sustancias son sintéticas y muchas son potencialmente tóxicas. El interés crece día con día en relación con la exposición crónica, tóxica de bajo nivel, que produce síntomas que son frecuentemente atribuidos al proceso normal del envejecimiento.<sup>[11]</sup>

En el artículo intitulado **Evaluación de la calidad del aire interior y exterior en un jardín de niños de la Ciudad de México**, señala los problemas derivados de la contaminación del aire, agua, suelo y alimentos que son ampliamente



## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

conocidos en la actualidad. Una gran parte de esos problemas son el resultado del rápido proceso de desarrollo e industrialización propio de las grandes ciudades, no obstante se han puesto en marcha programas paralelos de protección al ambiente y la salud de los habitantes del Distrito Federal.<sup>[12]</sup>

El objetivo fue evaluar las diferencias en los niveles de ozono ( $O_3$ ) y bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) en el interior y el exterior de una escuela en el suroeste de la Ciudad de México. El material y método con que se midieron diariamente estos contaminantes dentro y fuera del salón, de Enero a Abril de 1990, fue mediante monitoreo manual. Los resultados del  $NO_2$  dentro y fuera no sobrepasó la norma mexicana (0.21 ppm) y el coeficiente de correlación entre las concentraciones máximas de  $NO_2$  de la estación de monitoreo local de la ciudad y el exterior del salón fue de 0.82 ( $p < 0.001$ ).

En relación con el  $O_3$ , la concentración máxima fuera del salón fue de 0.29 ppm, y adentro, de 0.17 ppm (0.06 ppm de la diferencia promedio); entre el interior y el exterior del salón hubo una correlación de 0.72 y se observó que, por cada 1.7 ppm en el exterior, hay 1.0 ppm en el interior ( $p < 0.05$  promedio).

La conclusión a la que llegaron fue que las mayores concentraciones de  $O_3$  en el exterior se presentaron entre las 11:00 y las 14:00 horas, por lo que se recomienda tener el descanso previamente a este horario.

Otra causa muy importante de contaminación en la casa surge de los residuos de la combustión. En un estudio de 47,000 pacientes químicamente sensibles, se encontró que las reacciones más adversas fueron causadas por estufas de gas y calentadores de agua. Sin embargo, aún una pequeña luz de piloto de gas produce una cantidad de humos, principalmente dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). Se ha demostrado que tales gases causan problemas aún en niños no sensibles químicamente. Como cualquiera podría imaginar, los niños con asma reaccionan más severamente.

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro que como es bien sabido, causa la muerte en niveles ligeramente altos. Sin embargo, el monóxido de carbono en dosis mucho más bajas, provoca serios efectos en funciones cognitivas superiores tales como la memoria, la concentración y el razonamiento, según un estudio de la Universidad de Hadassah de Israel. La exposición crónica del monóxido de carbono también puede resultar en sensibilidades químicas múltiples ya que interfiere con los métodos de desintoxicación en el hígado causando una sobrecarga tóxica.

Los fungicidas y los insecticidas se encuentran entre los principales riesgos de salud en la casa. Estos se encuentran principalmente en las alfombras, pinturas y la madera. Un estudio reciente encontró que combinar los pesticidas puede aumentar considerablemente su toxicidad haciéndolos hasta 1,600 veces más potentes. En un estudio los niños expuestos a insecticidas tuvieron un riesgo

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

superior a desarrollar tumores cerebrales y otros cánceres. Así también el ruido excesivo, los olores nocivos, ciertos colores, así como la falta de luz de espectro completo, pueden tener un impacto enorme sobre el bienestar físico y mental del ser humano. El ruido produce liberación de adrenalina, mientras que una falta de luz solar puede causar depresión.

Las fuentes de contaminación del aire exterior no es nueva, pero los tipos y cantidades de contaminantes del aire han aumentado desde la revolución industrial. La mayor parte de la contaminación del aire exterior reconocida en Estados Unidos, México y otros Países industrializados, provienen de cinco grupos contaminantes primarios: monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, óxidos de azufre, compuestos orgánicos volátiles principalmente hidrocarburos y partículas suspendidas. Otros contaminantes claves son el ozono (un contaminante secundario) y el plomo (principalmente provenientes de la combustión de la gasolina, fundidoras de metales e incineradores municipales de desechos).

En los países desarrollados (PD), la mayoría de estos contaminantes son emitidos a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles en las plantas industriales y de energía de fuentes estacionarias y de los vehículos automotrices (fuentes móviles). Por lo tanto, la mayor parte de la contaminación del aire es resultado de nuestra adición al petróleo y otros combustibles fósiles (figura I.4).

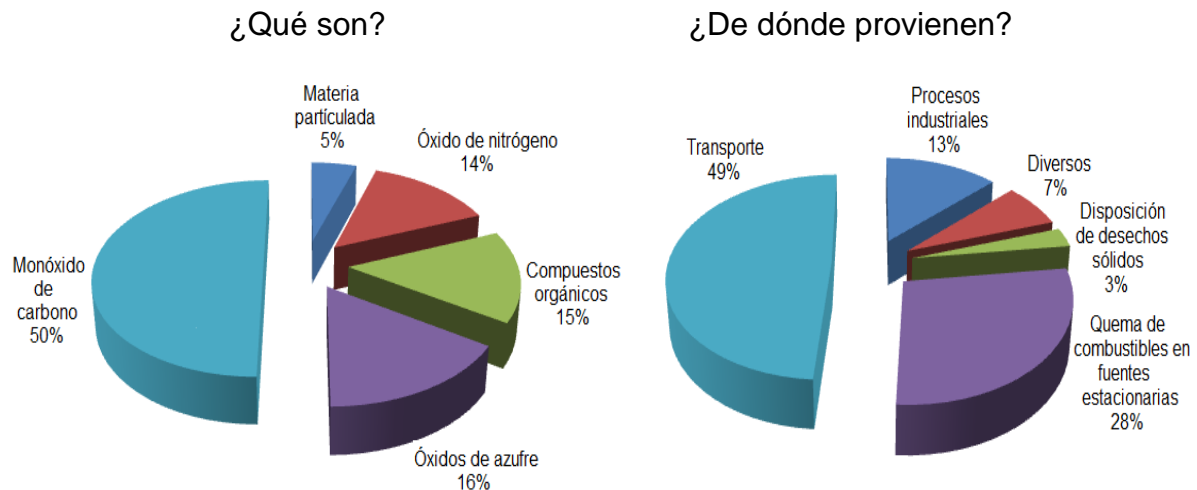


Figura I.4 Emisiones de los contaminantes claves al aire exterior en Estados Unidos. Los porcentajes de emisión de la izquierda están sobre la base de peso. Cada uno de los 198 millones de vehículos de motor de Estados Unidos arroja un promedio de 0.9 toneladas (métricas) de contaminantes al aire al año. <sup>[13]</sup>

En los países subdesarrollados (PSD), especialmente en las áreas rurales donde vive más de la mitad de la gente, la mayor parte de la contaminación del aire es producida por la combustión de madera, estiércol y residuos de cosechas,

en estufas ineficientes y a fuegos abiertos. Esto agrega dióxido de carbono y hollín a la atmósfera; además, las comunidades de escasos recursos agotan los bosques para obtener una fuente económica.

**Tipos y fuentes de contaminación del aire interior.** Dentro de espacios cerrados hay posibilidades de que se inhalen más contaminantes del aire que estando fuera como sería en laboratorios químicos, plantas industriales, casas habitación, oficinas de gobierno, particulares, escuelas, etc.

Puesto que pasamos del 70-98% de nuestro tiempo en interiores, La Agencia de Protección Ambiental (EPA), ha llamado a la calidad del aire interior, “El problema ambiental más significativo que tenemos que afrontar”. Plantea un riesgo para la salud especialmente alto para los mayores, los niños pequeños, las personas enfermas, mujeres embarazadas, personas con problemas respiratorios o cardíacos, trabajadores de fábricas y oficinas que pasan gran cantidad de tiempo en interiores.<sup>[14]</sup>

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), estima que los contaminantes del aire interior en las casas y oficinas en EE.UU, México y en todo el mundo originan muchas muertes por cáncer al año, y muchos decesos más por la inhalación en interiores de muchos productos radioactivos derivados del gas radón. Otros productos contaminantes del aire que se encuentran en los edificios producen vértigo, dolor de cabeza, los estornudos, náusea, ardor de ojos, problemas de las vías respiratorias y síntomas de gripe en mucha gente.

De acuerdo con funcionarios de salud pública, el humo de los cigarrillos, el gas radón, el asbesto, el formaldehído y los gases de la combustión de las estufas, son los contaminantes del aire interior más peligrosos. A este problema de salud se le llama “síndrome del edificio enfermo”, cada año, la exposición a estos contaminantes en el interior de fábricas, oficinas y departamentos, son la causa de enfermedades crónicas.

Muchos humanos de todo el mundo tienen problemas de respiración crónicos y padecen de: vértigo, erupciones, letargo, dolores de cabeza, ulceración en garganta, irritación de los senos frontales, ojos, y náuseas, ocasionadas por la exposición a niveles bajos de formaldehído que proviene de los materiales comunes en los edificios y artículos caseros.

En la figura I.5 se muestra como las partículas suspendidas se encuentra en una amplia variedad de tipos y tamaños (1 micrómetro=0.001 milímetros=0.00004 plg.).

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

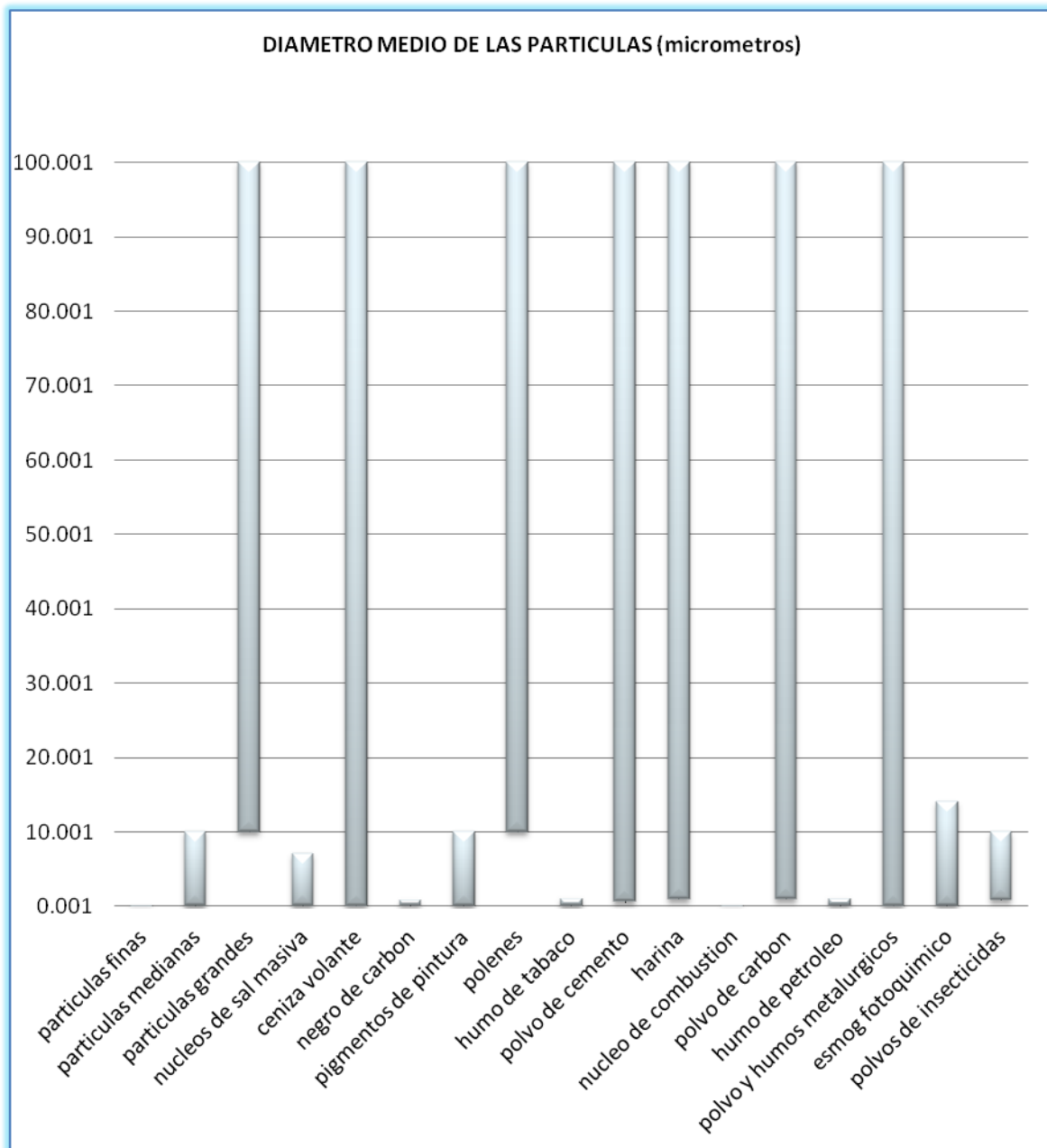


Figura I.5. Diámetro medio de partículas suspendidas. <sup>[15]</sup>

En la figura I.6, se observan algunos contaminantes importantes del aire interior, datos de La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (EPA).

# DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

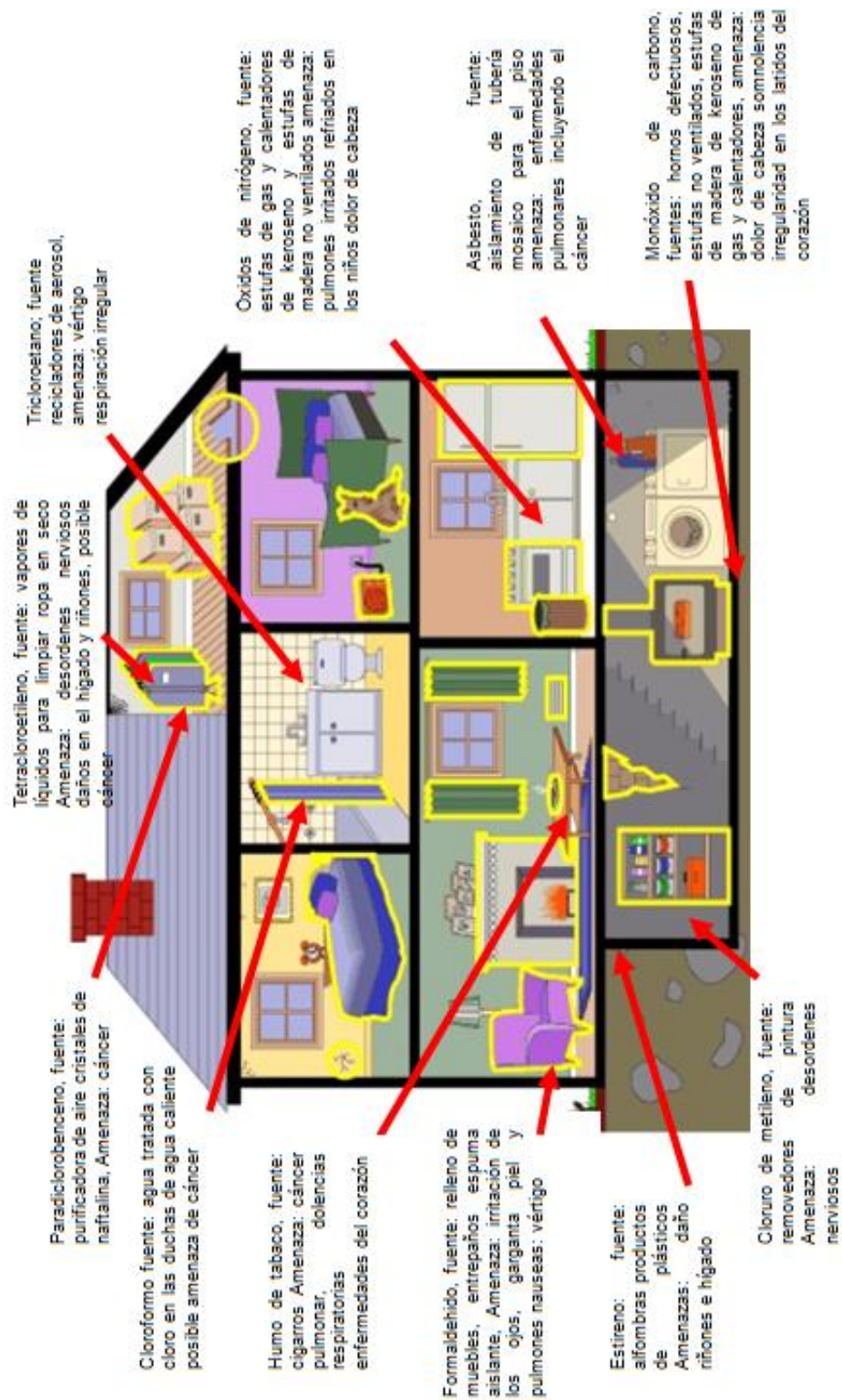


Figura I.6. Contaminantes del aire interior. [16]

**Contaminantes por derivados del petróleo.** Otros contaminantes son el petróleo, gasolina, y combustibles, cuya fracción de gasolina proveniente del petróleo se denomina gasolina directa, que es un grado bajo de gasolina y presenta un rendimiento también bajo como combustible.

Los alcanos de cadena ramificada son combustibles superiores a los compuestos de cadena recta porque son menos volátiles, se queman con menos rapidez en el cilindro, y por lo tanto reducen el golpeteo. Los alquenos (compuestos de doble enlace carbono-carbono) y los compuestos aromáticos también son buenos combustibles. Se han desarrollado métodos para convertir los hidrocarburos de pesos moleculares mayores y menores que la gasolina, o convertir hidrocarburos de cadena lineal en hidrocarburos ramificados. Los alquenos, alcanos y compuestos aromáticos de cadena ramificada se obtienen de hidrocarburos del petróleo mediante el cracking catalítico y la transformación catalítica. Los alcanos de cadena ramificada se preparan a partir de los alquenos y alcanos por reacciones de alquilación y a partir de alcanos, por isomerización catalítica.

La cualidad antidetonante de un combustible se mide por su octanaje. El heptano es un combustible muy pobre que provoca un severo golpeteo en el motor de un automóvil. Se le da arbitrariamente un número de octano de 0. Por otra parte el 2, 2,4-trimetilpentano (que incorrectamente se conoce como iso-octano en la industria del petróleo – nombre todavía en uso, debido a la importancia de este compuesto) es un excelente combustible, y se le ha dado con diversas mezclas de heptano y 2, 2,4-trimetilpentano.

Una gasolina que muestre un rendimiento igual que el de una mezcla de 10 mol% de heptano y 90 mol% 2,2,4-trimetilpentano tiene un octanaje de 90. Algunos hidrocarburos, conocidos hoy en día, son mejores que el 2,2,4-trimetilpentano, según se observa en la tabla I.2.

Tabla I.2 Índice de octano de diversos compuestos.<sup>[17]</sup>

<b>Nombre</b>	<b>Índice de octano</b>
Octano	-20
Heptano	0
Hexano	25
Pentano	62
1-Penteno	91
iso-Octano	100
Benceno	106
Metanol	107
Etanol	108
Alcohol ter-butílico	113
Metil ter-butil éter (MTBE)	116
Tolueno	118

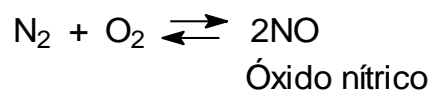
Una forma de aumentar el rendimiento de la gasolina es por la adición de alcanos de cadena ramificada que tienen un octanaje mayor. Otra consiste en agregar pequeñas cantidades de tetraetilo de plomo,  $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_4\text{Pb}$ , que produce gasolina etílica. El tetraetilo de plomo fue descubierto en 1922 y es un líquido azul altamente tóxico. En combustión el tetraetilo de plomo forma agua, dióxido de carbono y óxido de plomo, que refuerza y es inofensivo para el cilindro. El 1,2-dibromoetano,  $\text{BrCH}_2\text{CH}_2\text{Br}$ , a menudo se agrega a la gasolina etílica, y se combina con el óxido de plomo para formar bromuro de plomo volátil,  $\text{PbBr}_2$ , que se elimina con los gases del escape.

El uso de gasolinas con plomo tiene la desventaja de que los compuestos tóxicos del plomo contaminen la atmósfera. La mejor solución parece ser emplear alcanos altamente ramificados, que pueden prepararse al isomerizar los alcanos de cadena recta.

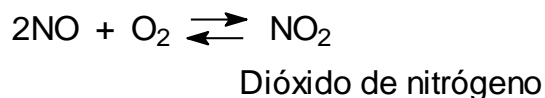
La contaminación en la Ciudad de México en casas habitacionales, en oficinas industriales y de gobierno es la del aire que se convierte en un problema actual serio, y se ha atribuido en gran medida a los gases de los escapes provenientes de motores de combustión interna, chimeneas de calderas industriales.

El monóxido de carbono y el *smog* son quizá los peores contaminantes del aire. La formación del *smog* es compleja y todavía no se comprende bien todo el proceso, los principales reactivos que intervienen parecen ser los hidrocarburos de cadena ramificada, que son emitidos por los escapes de los automóviles debido a una combustión incompleta, los óxidos de nitrógeno, que se forman en el motor de los automóviles y el oxígeno.

Se tiene cierta idea de cómo se produce el *smog* foto químico, es decir, *smog* producido por la luz del sol. Los óxidos de nitrógeno se forman en el motor que toma nitrógeno y oxígeno de la atmosfera de acuerdo a la reacción siguiente:<sup>[18]</sup>



El óxido nítrico reacciona fácilmente con más oxígeno de la atmosfera para formar dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ):

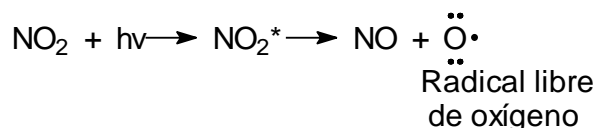


A partir de este momento, se cree que empiezan a intervenir las reacciones fotoquímicas. La producción de *smog* se inicia por una molécula de  $\text{NO}_2$  que absorbe un fotón de luz ultravioleta proveniente del sol. La molécula de  $\text{NO}_2$

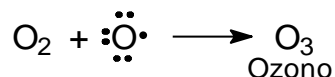
## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

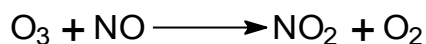
activada designada como  $\text{NO}_2^*$  posteriormente se disocia en  $\text{NO}$  y un radical libre de oxígeno:



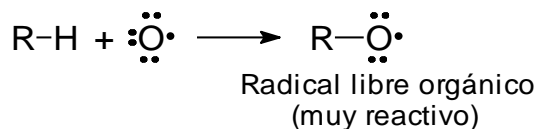
El radical libre de oxígeno es muy reactivo y puede reaccionar con el oxígeno molecular para formar ozono  $\text{O}_3$  que es otro componente del *smog*:



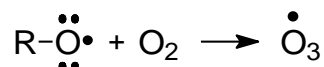
Entre otras cosas, el ozono ataca y degrada al caucho y perjudica a las plantas, puede reaccionar con otras moléculas de  $\text{NO}$  para generar más  $\text{NO}_2$ , que inicia el ciclo nuevamente:



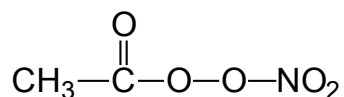
Algunos átomos de oxígeno reaccionan con casi cualquier clase de hidrocarburo a fin de producir nuevos radicales libres orgánicos:



Estos a su vez pueden reaccionar con el oxígeno molecular para formar radicales libres de ozono, todavía más reactivos:



Esta mezcla de radicales libres puede reaccionar todavía más con los hidrocarburos para producir una diversidad de moléculas que contienen oxígeno, muchas de las cuales son indeseables, un irritante de los ojos particularmente nocivo es el nitrato de peroxiacetilo (PAN), que se forma por la combinación de radicales libres con  $\text{NO}_2$ .



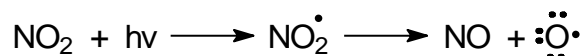
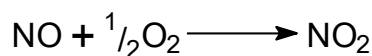


## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

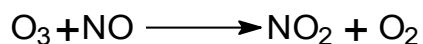
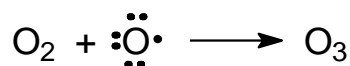
---

Los pasos involucrados en la producción de *smog* fotoquímico son otro ejemplo de una reacción en cadena de un radical libre; es posible clasificar los diversos pasos de reacción como sigue:

Paso 1: Iniciación de la cadena:

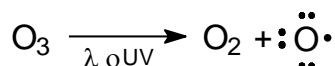


Paso 2: Propagación de la cadena:



Los pasos terminales de la cadena son difíciles de especificar pero sin duda involucran la reacción entre el hidrocarburo, R-H y el átomo de oxígeno para formar productos.

**El ozono y el ambiente.** Desempeña un papel importante en nuestra vida diaria como se mencionó anteriormente, uno de los sustituyentes principales del *smog* fotoquímico. En este contexto, el ozono es un oxidante y una fuente primaria del oxígeno atómico, que, como se vio, puede participar en muchas reacciones no deseables.



Sin embargo, el ozono es necesario para la vida, la tierra es irradiada constantemente con la luz ultravioleta (UV) procedente del sol. La luz es tan intensa que si pasa a través de nuestra atmósfera inalterada, podría aumentar considerablemente la incidencia de cáncer en la piel y de cataratas en los seres humanos.

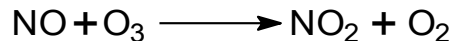
No obstante, el ozono se encuentra en la atmósfera superior y absorbe una porción significativa de la radiación ultravioleta antes que llegue a la superficie de la tierra.

Esta propiedad del ozono ha llevado a diversas confrontaciones importantes entre los intereses ambientales y comerciales. El primer argumento fue con relación al avión supersónico. La causa del fracaso comercial de estos aviones

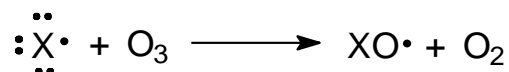
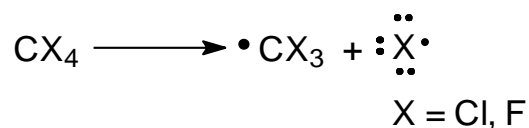
## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

fue, en gran medida, al trabajo de los ambientalistas que determinaron que las altas concentraciones de óxido nitroso (NO), emitidas por el escape del avión, reduciría severamente la capa de ozono de la atmósfera donde se sabe que ocurre la siguiente reacción:



Una nueva confrontación se inició en el siglo pasado con respecto al uso de los freones como propulsores en los rociadores en aerosol. Freones es el nombre genérico de clorofluorometano, freón 12, es el más común. Aun cuando los freones son relativamente no reactivos, en presencia de la luz UV pueden descomponerse para producir átomos de halógeno entre otras cosas. Los átomos de halógeno pueden reaccionar con ozono.



El resultado total, como el caso del AST (Avión Supersónico de Transporte), sería la disminución de la capa de ozono, al final del siglo pasado otros propulsores que no contienen halógenos han reemplazado a los freones, que en la actualidad están prohibidos.

Otro factor muy importante que hay que considerar en la contaminación de la Ciudad de México es la acumulación de contaminantes en el Distrito Federal y zona metropolitana, por la falta de circulación de estos. Debido a la influencia de las montañas alrededor de la ciudad. Toda la contaminación permanece estática por tiempos largos, y hasta que entra una corriente de aire procedente del golfo, la ciudad de México se logra limpiar.

La contaminación de la Ciudad de México está compuesta principalmente por gases de la combustión de los automotores, camiones, chimeneas de calderas de baños públicos, plantas industriales y de energía, fugas de reactivos químicos de la industria y apertura de reactores para limpieza. Otro factor es la tala de los arboles alrededor de la zona metropolitana, la aplicación de clorofluorocarbonos o clorofluorocarbonados (CFC) en aerosoles, y el ruido. Así como también es el crecimiento de población, que requiere mayor número de servicios que trae como consecuencia mayor contaminación en la ciudad de México y zona metropolitana.

En lo que respecta a interiores y exteriores de casa habitación con respecto al gobierno federal y estatal, el control de la contaminación debe ser más rígido en la aplicación de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente de la contaminación.<sup>[19]</sup>

#### **I.4 Grado de contaminación en interiores en el extranjero**

El término aire interior suele aplicarse a ambientes de interior no industriales: edificios de oficinas, edificios públicos (colegios, hospitales, teatros, restaurantes, etc.) y viviendas particulares. Las concentraciones de contaminantes en el aire interior de estas estructuras suelen ser de la misma magnitud que las encontradas habitualmente al aire exterior, y mucho menores que las existentes en el medio ambiente industrial, donde se aplican normas relativamente bien conocidas con el fin de evaluar la calidad del aire. Aun así, muchos ocupantes de edificios se quejan de la calidad del aire que respiran, por lo que es necesario investigar esta situación. La calidad del aire interior comenzó a considerarse un problema a finales del decenio de 1960, aunque los primeros estudios no se llevaron a cabo hasta unos diez años después.<sup>[20]</sup>

La política es el proceso según el cual personas o individuos y grupos tratan de influir o controlar acciones de los gobiernos de las comunidades locales, estatales, nacionales o internacionales. La política trata la distribución de recursos y beneficios, quien obtiene, que, cuando y como, así tiene una función significativa regulando los sistemas económicos del mundo e influyendo en las decisiones económicas.

Resolver los problemas de recursos y ambiente que encaramos es fundamentalmente un problema político porque requiere la unidad y fuerzas públicas para que los oficiales de elección, locales, estatales y nivel nacional hagan cambios sustanciales en las erogaciones (subsidios) y en las exenciones (impuestos y reglamentaciones) que las corporaciones ricas y poderosas reciben por el uso de los recursos de la tierra de ciertas maneras. Esto implica reestructurar el modo en que se hacen los negocios desplazando la producción y ganancias de la degradación de la tierra.

Aunque este cambio beneficiará a todos a largo plazo, en el corto plazo es visto como una seria amenaza a los intereses políticos y económicos atrincherados. Sin embargo, hemos llegado al punto en el que las antiguas maneras de hacer negocios son tan amenazadoras para nuestra seguridad ambiental, económica y militar; y a los procesos de la ecósfera, de los cuales depende toda la vida. Debemos tener la sabiduría y el valor para efectuar cambios políticos y económicos drásticos.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

Influencia sobre la política pública, ambiental y de recursos. Son varios los grupos que intervienen sobre la política pública. Las decisiones acerca de las políticas para el medio ambiente y el uso de recursos son influenciadas por una mezcla de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales (ONG), de acuerdo a las naciones unidas.

En la tabla I.3 se muestran algunos grupos que influyen en la política del medio ambiente y del uso de recursos.

Tabla I.3. Grupos que influyen en la política del medio ambiente. <sup>[21,22]</sup>

NIVELES	GUBERNAMENTALES	NO GUBERNAMENTALES	
Mundial (o global)	Organizaciones Intergubernamentales como la FAO (Organización de Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas ), el PNUMA (Programa para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas), La IAEA (Agencia Internacional de Energía Atómica).	No lucrativos Unión Internacional para la conservación de la naturaleza y los recursos naturales, amigos de la tierra, Greenpeace.	Lucrativos empresas multinacionales como Oil Mobil y Mitsubishi.
Regional	Comunidad económica europea comisión conjunta de los grandes lagos (Canadá y estados unidos).	Liga Europea para la cooperación económica.	Empresas que operan en una región como América del norte o la cuenca del mediterráneo.
Nacional	Gobiernos nacionales, agencia como la EPA (agencia de Protección Ambiental) de EE.UU, y el servicio forestal también de EE.UU.	Asociación forestal de estados unidos, Club, sierra, consejo para la defensa de los recursos naturales.	Empresas que operan dentro de un País.

Un reporte reciente de la Agencia de Protección Ambiental de los E.U, dice "la contaminación del aire interior en las casas, escuelas, oficinas y otros edificios es uno de los riesgos potenciales más serio del medio ambiente sobre la salud".<sup>[14]</sup>

En la actualidad se usan muchos nuevos materiales en la industria de la construcción y del mobiliario. Estas nuevas substancias son sintéticas y muchas son potencialmente tóxicas. El interés crece día con día en relación con la exposición crónica, tóxica de bajo nivel, que produce síntomas que son frecuentemente atribuidos al proceso normal del envejecimiento.

## **DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

En los noventas, se realizó un estudio a largo plazo y se encontró que el aire interior frecuentemente contiene más químicos peligrosos que el aire exterior aún en áreas altamente industrializadas.

Este estudio fue realizado por la Agencia de Protección Ambiental Americana y se descubrió que en un día típico en el trabajo o en la casa, los sujetos investigados respiraron al menos de 2 a 5 veces más químicos peligrosos cuando estaban adentro de su casa que si se sentaban en el jardín. En ciertas ciudades, los químicos en el aire interior eran de 5 a 10 veces más altos que los niveles de afuera.

El grupo más grande de contaminantes interiores son los compuestos orgánicos volátiles. Derivados de petroquímicos, y los compuestos volátiles orgánicos fácilmente liberan vapores a la temperatura de un cuarto en un proceso llamado "gaseoso". Los compuestos volátiles orgánicos se encuentran en una multitud de materiales que se usan en el mobiliario y en la construcción. El olor distintivo de una casa nueva es causado principalmente por estos compuestos orgánicos volátiles de los materiales de la construcción, pintura y mobiliario.

Los organoclorados proveen la base de muchos químicos sintéticos usados en el hogar; algunos de ellos son cancerígenos, entre éstos se incluyen los bifenilos policlorados (PCB) y los policloruros de vinilo (PVC). Luego se tiene el cloro, en blanqueadores, acetona, en limpiadores y solventes; y naftalina. El formaldehído y el benceno son los 2 principales compuestos orgánicos volátiles tóxicos.

El formaldehído es un gas incoloro emitido por muchos materiales de la construcción y productos relacionados como gomas, resinas y algunos preservativos. Debido a que es un sensibilizador del sistema inmunológico puede causar alergias múltiples y sensibilidades a substancias totalmente no relacionadas, si la exposición es crónica.

En Gran Bretaña, el Dr. Llewellyn del Establecimiento de Investigación de Edificios (BRE) realizó estudios similares y llegó a las mismas conclusiones que los estudios americanos. Se encontraron más de 200 químicos en el aire interior, de los cuales, se consideró que 80 tenían importantes consecuencias adversas para la salud.

El gran pionero de la ecología clínica, Theron Randolph desarrolló la teoría de que la enfermedad está causada cuando la habilidad del cuerpo para desintoxicarse de los contaminantes ambientales está sobrecargada <sup>[14]</sup>. Su casa puede ser un riesgo para la salud, la exposición simple e intermitente a los químicos puede no causar daño obvio, pero si la exposición se repite, el sistema inmunológico puede alterarse aún a niveles bajos. Por ejemplo, se encontró que los pintores ocupacionalmente expuestos a compuestos volátiles orgánicos tuvieron significativamente más reacciones adversas a estos compuestos que el

no-pintor, aunque las exposiciones individuales fueron debajo del umbral aceptado para no producir efectos dañinos.

En la actualidad, se recomienda en Inglaterra que las casas tengan un completo cambio de aire cada 2 horas. La exposición crónica a las toxinas en el medio ambiente interior, hoy en día ha sido ligada a un vasto espectro de enfermedades que van desde la sinusitis, el asma, los dolores de cabeza, la fatiga, la ansiedad, el insomnio hasta un síndrome de sensibilidad química múltiple.

El benceno es un conocido cancerígeno humano y una fuente importante de él, es la pintura. Los cigarros también contienen benceno. Las alfombras son una fuente muy importante de benceno y formaldehído. Una alfombra típica puede contener más de 120 diferentes agentes químicos.

Estudios en animales han demostrado que las frecuencias entre 16 y 60 Hertz alteran la síntesis de proteínas celular rompiendo la síntesis del ácido ribonucleico (RNA) y reduciendo la respuesta inmunológica (RW Adey B Norden and C Ramel, 1992).

Por lo anterior es recomendable que se conserve los campos electromagnéticos a un nivel mínimo, en el área donde se pasa la mayor parte de nuestro tiempo, alrededor de nuestras camas.

El asbesto es una fibra peligrosa bien conocida, es un polímero natural y se encuentra en decenas de materiales comunes de la construcción. Se usó ampliamente como un aislante y en la construcción general hasta mediados de los 70's. Las partículas de polvo pueden causar problemas de salud como las alergias.

Aunque el plomo fue prohibido en las pinturas hace algunos años, las pinturas en las casas viejas pueden todavía constituir un riesgo. El cadmio que muchas veces viene en el agua de la toma de la calle. También puede existir un riesgo a la salud por el aluminio. La batería de cocina de aluminio puede ser una fuente importante debido a que los óxidos de aluminio son solubles.<sup>[14]</sup>

## **1.5 Marco legal y normativo en México para la protección al ambiente.**

La legislación en materia de protección al ambiente es relativamente nueva, de hecho su desarrollo ha estado asociado con algunos hechos significativos que han marcado a la sociedad por su impacto en el medio ambiente.

En ocasiones la inclusión de nuevos artículos en la ley correspondiente y la aparición de nuevas normas oficiales mexicanas obedecen a situaciones de tipo

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

social, político y en ocasiones a los avances tecnológicos. En México, la protección ambiental desde el punto de vista legal obedece a la jerarquía jurídica que se maneja en la Pirámide de Keizen:

1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
2. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
3. Reglamentos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
4. Normas Oficiales Mexicanas en materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

El tratamiento institucional del problema se ha dado en las últimas décadas, es decir, a partir de los años 70's.

Trabajos iniciales (1970-1976). En un entorno donde prácticamente no existía preocupación social por el deterioro ambiental, se promulgó en 1971 la Ley de Protección al Ambiente. De esta forma se colocaba a la contaminación en la agenda pública antes de que éste fuera considerado como asunto de interés por la sociedad en general, aunque se redujo el problema ambiental al denominador común más cómodo de todas sus facetas: la salud.

De esta manera, la entidad del gobierno responsable de la atención del problema fue la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), que a través de la subsecretaría de mejoramiento del ambiente (SMA) debía conducir las políticas oficiales al coordinar los trabajos de los sectores Industrial y Comercio, Recursos Hidráulicos, Agricultura y Ganadería, lo cual en la práctica resultaría imposible. Dotada de pocos recursos y restringida a un papel esencialmente normativo, la gestión de este organismo se limitó a presionar tímidamente, sin un respaldo técnico y jurídico adecuado, a la industria y a las líneas de camiones de carga y pasajeros para evitar las emisiones visibles de humos. Por su parte, se inició también la recopilación de información en la materia y la formulación de metodologías para determinar niveles de contaminación.

Ampliación de la estructura administrativa (1976-1982). En el sexenio del presidente López Portillo se crearon más entidades administrativas involucradas en la gestión ambiental; la recién creada Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas tenía bajo su cargo la Dirección General de Ecología Urbana, en tanto que en la Secretaría de Agricultura se creó la Dirección General de Protección y Ordenamiento Ecológico. Por su parte, otras dependencias públicas (**Secretarías de Recursos Hidráulicos, Marina y Pesca**, así como **PEMEX** y **Fertimex**) crearon sus propias unidades administrativas encargadas de atender aspectos ambientales.

Por su parte la Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, seguía tutelando al sector, especialmente en lo referente al problema de

## **DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

contaminación del aire en la Ciudad de México. Con la naciente diversidad administrativa, también surgieron las luchas interburocráticas, lo cual desde entonces ha dificultado el tratamiento de éste y de la generalidad de los problemas ambientales. Al final del sexenio se expidió una nueva Ley Federal de Protección al Ambiente sin que ello representara una modificación significativa del marco legal del problema.

El país cuenta con una considerable infraestructura jurídica; las leyes y reglamentos existentes en materia de contaminación atmosférica si bien, como se verá más adelante son perfectibles, configuran ya un sustrato jurídico básico para dar una respuesta eficaz al deterioro de la calidad del aire. Las reformas al artículo 27 constitucional hechas en la década de los ochenta encuentran en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) una legislación reglamentaria extensa de la que a su vez se desprende reglamentos y normas técnicas en materia de Control y Prevención de la Contaminación Atmosférica.

Cabe hacer mención, que la LGEEPA se inserta dentro de un sistema de ordenamientos complementarios como la Ley General de Asentamientos Humanos y la Ley de Planeación que permiten a las autoridades y a la sociedad una amplia perspectiva de actuación integral, congruente con la naturaleza urbana, regional y de actividad sectorial que caracterizan el problema.

Además, existen 31 leyes estatales y la Ley del Distrito Federal. Sin embargo, sólo se describirá en forma general los apartados y artículos sobre los instrumentos jurídicos que ya se mencionaron.

Dentro de estas leyes estatales y del G.D.F. se encuentra los artículos del reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica y normas aplicables en materia de prevención y control de la contaminación a la atmósfera, que deben demostrar su cumplimiento las fuentes fijas de la industria manufacturera que soliciten exentar al programa de contingencias atmosféricas.

Los artículos del reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica son:

**ARTÍCULO 17.-** En la planeación nacional del desarrollo se deberá incorporar la política ambiental y el ordenamiento ecológico que se establezcan de conformidad con esta Ley y las demás disposiciones en la materia.

En la planeación y realización de las acciones a cargo de las dependencias y entidades de la administración pública federal, conforme a sus respectivas esferas de competencia, así como en el ejercicio de las atribuciones que las leyes



confieran al Gobierno Federal para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y en general inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se observarán los lineamientos de política ambiental que establezcan el Plan Nacional de Desarrollo y los programas correspondientes.<sup>[23]</sup>

**ARTÍCULO 17 BIS.-** La Administración Pública Federal, el Poder Legislativo Federal y el Poder Judicial de la Federación, expedirán los manuales de sistemas de manejo ambiental, que tendrán por objeto la optimización de los recursos materiales que se emplean para el desarrollo de sus actividades, con el fin de reducir costos financieros y ambientales.<sup>[24]</sup>

**ARTÍCULO 18.-** El Gobierno Federal promoverá la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de los programas que tengan por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, según lo establecido en esta Ley y las demás aplicables.<sup>[23]</sup>

## **SECCIÓN II    Ordenamiento Ecológico del Territorio**

**ARTÍCULO 19.-** En la formulación del ordenamiento ecológico se deberán considerar los siguientes criterios:

- I. La naturaleza y características de los ecosistemas existentes en el territorio nacional y en las zonas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción;
- II. La vocación de cada zona o región, en función de sus recursos naturales, la distribución de la población y las actividades económicas predominantes;
- III. Los desequilibrios existentes en los ecosistemas por efecto de los asentamientos humanos, de las actividades económicas o de otras actividades humanas o fenómenos naturales;<sup>[25]</sup>
- IV. El equilibrio que debe existir entre los asentamientos humanos y sus condiciones ambientales;
- V. El impacto ambiental de nuevos asentamientos humanos, vías de comunicación y demás obras o actividades, y
- VI. Las modalidades que de conformidad con la presente Ley, establezcan los decretos por los que se constituyan las áreas naturales protegidas, así como las demás disposiciones previstas en el programa de manejo respectivo, en su caso.<sup>[26]</sup>

**ARTÍCULO 19 BIS.-** El ordenamiento ecológico del territorio nacional y de las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, se llevará a cabo a través de los programas de ordenamiento ecológico:<sup>[25]</sup>

- I. General del Territorio;
- II. Regionales;
- III. Locales, y
- IV. Marinos.

### **SECCIÓN III Instrumentos Económicos**

**ARTÍCULO 21.-** La Federación, los Estados y el Distrito Federal, en el ámbito de sus respectivas competencias, diseñarán, desarrollarán y aplicarán instrumentos económicos que incentiven el cumplimiento de los objetivos de la política ambiental, y mediante los cuales se buscará:

- I. Promover un cambio en la conducta de las personas que realicen actividades industriales, comerciales y de servicios, de tal manera que sus intereses sean compatibles con los intereses colectivos de protección ambiental y de desarrollo sustentable;
- II. Fomentar la incorporación de información confiable y suficiente sobre las consecuencias, beneficios y costos ambientales al sistema de precios de la economía;
- III. Otorgar incentivos a quien realice acciones para la protección, preservación o restauración del equilibrio ecológico. Asimismo, deberán procurar que quienes dañen el ambiente, hagan un uso indebido de recursos naturales o alteren los ecosistemas, asuman los costos respectivos;
- IV. Promover una mayor equidad social en la distribución de costos y beneficios asociados a los objetivos de la política ambiental, y
- V. Procurar su utilización conjunta con otros instrumentos de política ambiental, en especial cuando se trate de observar umbrales o límites en la utilización de ecosistemas, de tal manera que se garantice su integridad y equilibrio, la salud y el bienestar de la población.<sup>[27]</sup>

**Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su reglamento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica.** Con el fin de atender la problemática ambiental del país, por iniciativa presidencial se realizó en 1987 una reforma a los artículos 27, 73 y 115 constitucionales, ello permitió que en marzo de 1988 entrara en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Esta Ley da cuerpo a una estructura legislativa integral que establece un amplio sistema de concurrencia entre los diferentes niveles de gobierno y entre éstos y la sociedad civil, descentralizando facultades y responsabilidades en un marco de coordinación y cooperación.

La protección de la calidad del aire es uno de los criterios fundamentales que dieron origen a la LGEEPA.

**ARTÍCULO 5o.-** Son facultades de la Federación:

- I. La formulación y conducción de la política ambiental nacional;
- II. La aplicación de los instrumentos de la política ambiental previstos en esta Ley, en los términos en ella establecidos, así como la regulación de las acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la

- protección al ambiente que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción federal;
- III.** La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico en el territorio nacional o en las zonas sujetas a la soberanía y jurisdicción de la nación, originados en el territorio o zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de otros Estados, o en zonas que estén más allá de la jurisdicción de cualquier Estado;
  - IV.** La atención de los asuntos que, originados en el territorio nacional o las zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de la nación afecten el equilibrio ecológico del territorio o de las zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de otros Estados, o a las zonas que estén más allá de la jurisdicción de cualquier Estado;
  - V.** La expedición de las normas oficiales mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento en las materias previstas en esta Ley;
  - VI.** La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como para la preservación de los recursos naturales, de conformidad con esta Ley, otros ordenamientos aplicables y sus disposiciones reglamentarias;
  - VII.** La participación en la prevención y el control de emergencias y contingencias ambientales, conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan;
  - VIII.** El establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas de competencia federal;
  - IX.** La formulación, aplicación y evaluación de los programas de ordenamiento ecológico general del territorio y de los programas de ordenamiento ecológico marino a que se refiere el artículo 19 BIS de esta ley;
  - X.** La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades a que se refiere el artículo 28 de esta Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes;
  - XI.** La regulación del aprovechamiento sustentable, la protección y la preservación de las aguas nacionales, la biodiversidad, la fauna y los demás recursos naturales de su competencia.<sup>[28]</sup>
  - XII.** La regulación de la contaminación de la atmósfera, proveniente de todo tipo de fuentes emisoras, así como la prevención y el control en zonas o en caso de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal;
  - XIII.** El fomento de la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes provenientes de cualquier tipo de fuente, en coordinación con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios; así como el establecimiento de las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos;
  - XIV.** La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

- dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente;
- XV. La regulación de la prevención de la contaminación ambiental originada por ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente;
  - XVI. La promoción de la participación de la sociedad en materia ambiental, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley;
  - XVII. La integración del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales y su puesta a disposición al público en los términos de la presente Ley;
  - XVIII. La emisión de recomendaciones a autoridades Federales, Estatales y Municipales, con el propósito de promover el cumplimiento de la legislación ambiental;
  - XIX. La vigilancia y promoción, en el ámbito de su competencia, del cumplimiento de esta Ley y los demás ordenamientos que de ella se deriven;
  - XX. La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más entidades federativas;
  - XXI. La formulación y ejecución de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, y
  - XXII. Las demás que esta Ley u otras disposiciones legales atribuyan a la Federación.<sup>[29]</sup>

Por su parte el **ARTÍCULO 6o.-** Las atribuciones que esta Ley otorga a la Federación, serán ejercidas por el Poder Ejecutivo Federal a través de la Secretaría y, en su caso, podrán colaborar con ésta las Secretarías de Defensa Nacional y de Marina cuando por la naturaleza y gravedad del problema así lo determine, salvo las que directamente corresponden al Presidente de la República por disposición expresa de la Ley.<sup>[30]</sup>

Cuando, por razón de la materia y de conformidad con la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal u otras disposiciones legales aplicables, se requiera de la intervención de otras dependencias, la Secretaría ejercerá sus atribuciones en coordinación con las mismas.

Las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal que ejerzan atribuciones que les confieren otros ordenamientos cuyas disposiciones se relacionen con el objeto de la presente Ley, ajustarán su ejercicio a los criterios para preservar el equilibrio ecológico, aprovechar sustentablemente los recursos naturales y proteger el ambiente en ella incluidos, así como a las disposiciones de los reglamentos, normas oficiales mexicanas, programas de ordenamiento ecológico y demás normatividad que de la misma se derive.<sup>[31]</sup>

**ARTÍCULO 9o.-** Corresponden al Gobierno del Distrito Federal, en materia de preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, conforme a las

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

disposiciones legales que expida la Asamblea Legislativa del Distrito Federal, las facultades a que se refieren los artículos 7o. y 8o. de esta Ley.<sup>[31]</sup>

El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de prevención y control de la contaminación a la atmósfera precisa las áreas de responsabilidad de las distintas entidades del gobierno y define los mecanismos que regirán disposiciones señaladas en la Ley. En el caso de la Ciudad de México, para el Gobierno del Distrito Federal resulta relevante la responsabilidad de determinar los criterios ecológicos para las políticas ambientales locales e incorporarlos en los programas de desarrollo urbano y demás instrumentos aplicables en la materia.

Una relación de la distribución de atribuciones que son relevantes para la gestión de la calidad del aire en la ciudad de México, de acuerdo con la LGEEPA, se muestra en la tabla I.4.

Tabla I.4 Distribución de atribuciones de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su reglamento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica.<sup>[32]</sup>

<b>SEMARNAT</b>	1) Regular, mediante leyes y reglamentos, las actividades altamente riesgosas, la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos, la flora y fauna silvestres, bosques, así como las fuentes y zonas de jurisdicción federal (exploración y explotación de minerales, fronteras, playas, costas aguas nacionales, puertos y aeropuertos [art.5-X, XII a XV, XVII a XIX]).
	2) Regular y fijar los límites de emisiones contaminantes y los métodos para su medición en todos los asuntos ambientales, mediante la expedición de normas técnicas ecológicas (NTE), sustituidas luego por las normas oficiales mexicanas o NOMs), a observarse en todo el territorio nacional.
	3) Aplicar la LGEEPA, sus Reglamentos y las NTE en los siguientes asuntos: i) Emisiones contaminantes a la atmósfera (incluyendo ruido, energía térmica, lumínica y olores) producidas por (arts. 5-III, VII, XIV, XIX y XX, 8-II, 10, 112-VII y 113): <ul style="list-style-type: none"> <li>– Las industrias ubicadas en el Distrito Federal y los municipios conurbados del Estado de México;</li> <li>– La realización de actividades altamente riesgosas;</li> <li>– La generación o manejo de materiales y residuos peligrosos;</li> <li>– Los automotores nuevos en planta o de servicio público federal, esto es, con placas o autorizaciones expedidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT);</li> </ul>

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

Tabla I.4. Cont.

	<p>ii) Los que afecten el equilibrio ecológico de 2 o más entidades federativas (art. 5-VII y 10);</p> <p>iii) Los que se generen en fuentes o zonas de jurisdicción federal o afecten bienes de ésta, tales como aguas nacionales, minerales reservados a la Federación, etc.- (art. 5-XX, 8-II y 112-VII);</p> <p>iv) Actividades o situaciones con implicaciones ambientales internacionales (originadas en otros países que afecten el ambiente del nuestro o viceversa [art. 5-V y VI y 8-II]);</p> <p>v) La protección, aprovechamiento, restauración y conservación de la flora y fauna silvestres, así como de los bosques, y</p> <p>vi) Los que por su naturaleza y complejidad requieran la participación de la Federación (art. 5-III y 8-II).</p>
<p><b>Facultades de los estados y municipios</b></p>	<p>1) Normar, mediante leyes y reglamentos, los asuntos ambientales de su competencia, es decir, aquellos cuya regulación no esté otorgada a la Federación por la LGEEPA (entre ellos, el manejo y la disposición final de residuos no peligrosos);</p> <p>2) Aplicar la LGEEPA y sus Reglamentos, las leyes, reglamentos y bandos ambientales locales, así como las NTE en los siguientes asuntos no atribuidos a la Federación por la LGEEPA:</p> <p>i) Emisiones contaminantes a la atmósfera de establecimientos comerciales o de servicios localizados en su territorio, así como de las industrias, excepto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Las industrias pertenecientes a la Federación o aquellas cuyas emisiones a la atmósfera se deban a la realización de actividades altamente riesgosas, a la generación o manejo de materiales o residuos peligrosos o a la exploración o explotación de minerales reservados a la Federación (art. 5-XIV, XVIII a XX), y</li> <li>- Las industrias ubicadas en la zona metropolitana de la Ciudad de México (art. 10).</li> </ul> <p>ii) Emisiones contaminantes a la atmósfera de los automotores que circulen en su territorio, salvo, respecto de la verificación de sus emisiones a la atmósfera, los del servicio público federal que circulan al amparo de placas o autorizaciones de la SCT, y</p> <p>iii) Emisiones contaminantes a las redes locales de drenaje y alcantarillado o a otros cuerpos receptores de aguas locales.</p> <p>Cabe destacar que antes de la reforma del 13 diciembre de 1996, la LGEEPA reconocía en su artículo 6, primer y penúltimo párrafos, que la competencia entre las autoridades estatales y municipales se determi--</p>

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

Tabla I.4. Cont.

	naría con base en las disposiciones ambientales correspondientes expedidas por los congresos locales, con arreglo a sus respectivas constituciones y leyes.
<b>Régimen competencial especial para el G.D.F.</b>	<p>El D.F. contaba con un régimen competencial especial, pues no se asimilaba a los Estados en los siguientes asuntos:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1) Prevención y control de la contaminación atmosférica industrial (que correspondía a los Estados, salvo en el D.F. y su zona conurbada, en donde era competencia federal, conforme al artículo 6-VI en relación con el 10);</li><li>2) Regulación del manejo y disposición final de residuos sólidos no peligrosos (que se atribuía a los Estados, excepto al D.F., el cual sólo podía proponer al ejecutivo Federal dicha regulación (arts. 6-XIII y 9-B)-IX-), y</li><li>3) La regulación, creación y administración de parques urbanos y zonas sujetas a conservación ecológica (que correspondía a los Estados, salvo al D.F., que únicamente podía participar en su organización y administración [arts. 6-V y 9-B)-XVII]).</li></ol>

En la década de los ochenta, núcleos considerables de la sociedad mexicana comenzaron a tomar conciencia del deterioro ecológico sufrido por el país. La cuestión ambiental, donde el problema de la contaminación del aire en la ZMCM aparecía como uno de los más graves y evidentes, se convirtió en una verdadera preocupación pública recibiendo cada vez una mayor atención por parte de la sociedad y del gobierno.

El gobierno del presidente De la Madrid creó al inicio de su gestión en 1982, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), adjudicándole a los aspectos ambientales un papel esencialmente normativo. Además, en esa administración la ecología fue por primera vez integrada al Sistema Nacional de Planeación. Una serie de reformas legales realizadas a lo largo de estos años y la creciente importancia del tema culminaron en la expedición de un nuevo ordenamiento básico, a partir de una concepción integral del problema: la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. En la tabla I.4, se expuso ya una síntesis de los atributos otorgados por esta ley a las distintas entidades públicas.

En sus primeros seis años de vida, la SEDUE logró avanzar en los aspectos de diagnóstico de la contaminación del aire en la ciudad de México, fundamentalmente a raíz de la instalación de una red automática de monitoreo del aire que opera desde 1986. A su vez, el DDF y el gobierno del estado de México realizaron a lo largo de este tiempo algunas modificaciones administrativas de acuerdo al marco legal aplicable. La Subsecretaría de Ecología de la SEDUE, se transformó en dos nuevas instancias: el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la

## **DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), que pasaron a formar parte como órganos desconcentrados de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en el año de 1992 y, al elevarse la autoridad ambiental al rango de Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), estos dos órganos quedaron integrados en ella.

**Normas de calidad del aire y de emisiones.** Los objetivos que guían el desarrollo y la aplicación de las políticas de calidad del aire se expresan mediante normas de calidad del aire que, en su papel de instrumentos de regulación, establecen las pautas que evalúan el grado de excelencia del aire para la realización de las actividades humanas, la protección a la salud, la preservación de la vegetación y la fauna, así como la prevención de daños al bienestar en general.

Sin embargo, las normas de calidad del aire no son valores universalmente aceptados, sino que reflejan los niveles de limpieza del aire que una sociedad pretende alcanzar y mantener; lo anterior significa compromisos, programas, metas, presupuestos y plazos de cumplimiento bien definidos. De esta manera, un requisito fundamental para la adecuada formulación de un programa de gestión ambiental lo constituye la expedición de normas de calidad del aire que tengan un respaldo toxicológico, epidemiológico, de análisis económico y técnico que, por una parte, garantice su validez y, por otro lado, asegure su cumplimiento.

Es necesario mencionar que en el caso de nuestro país esto no es todavía un asunto resuelto. Aunque desde 1982 fueron establecidos oficialmente los llamados criterios de evaluación de la calidad del aire, éstos no cuentan con el estatuto legal de normas. Ante esta deficiencia es conveniente reconocer la necesidad de revisar los criterios de evaluación vigente y, en su nivel federal y/o de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), a la luz del conocimiento de su proceso de determinación mediante una metodología clara y una memoria escrita de los criterios que las sustentan.

En relación con las normas de emisión, se han dado avances importantes con la promulgación de normas técnicas ecológicas. Hasta el momento se han orientado principalmente al control de los procesos de combustión en algunas de las llamadas fuentes fijas y en los vehículos automotores. Al margen de críticas muy particulares al contenido de algunas de ellas, puede señalarse que este cuerpo básico de normas es fundamental para promover y vigilar un nivel mínimo de control en los procesos emisores. Sin embargo, no existe hasta este momento regulaciones que se dirijan hacia el origen inmediato del problema; es decir, hacia los propios procesos de emisión, sus insumos y sus materias primas.

Por otra parte, son múltiples los ejemplos de sustancias con una elevada reactividad fotoquímica y/o considerables riesgos a la salud que son empleadas en forma indiscriminada en ciertos procesos. Tal es el caso de las mezclas de



**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

solventes que se emplean en la actualidad, para las que no se tiene criterios de uso o control y mucho menos de emisión.

En la tabla I.5 se resumen las normas técnicas ecológicas, parámetros y tipo de fuente o proceso emisor.

Tabla I.5. Normas Oficiales Mexicanas expedidas que establecen los máximos niveles permisibles de emisión de contaminantes. <sup>[33, 34, 35, 36, 37, 38]</sup>

<b>Tipo de fuente o proceso emisor</b>	<b>Parámetros o contaminantes regulados</b>	<b>Norma Oficial Mexicana</b>
Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible	HC CO	NOM-041-SEMARNAT-2006
Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.	HC CO NOx	NOM-042-SEMARNAT-2003
Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipadas con este tipo de motores.	Opacidad del humo	NOM-044-SEMARNAT-2006
Características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.	Opacidad del humo	NOM-047-SEMARNAT-1999

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

Tabla I.5. Cont.

Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico.	SO <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	NOM-039-SEMARNAT-1993
Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.	Partículas CO SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub>	NOM-043-SEMARNAT-1993

Su cumplimiento debe estar acorde con la actividad particular que realice cada una de las empresas, para lo cual se deberá comprobar su cumplimiento mediante documentación oficial; sellos de recibido, acuses de recibo, documentos comprobatorios emitidos por la autoridad en donde se demuestre estar dentro de lo establecido por las normas correspondientes, oficios de liberación de condicionantes en caso de que se hayan detectado incumplimientos de las normas o del reglamento.

A continuación se enlistan las Normas Oficiales Mexicanas en materia de Contaminación Atmosférica.

Mediciones de Concentraciones emitidas por la Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico:

- **NOM-034-SEMARNAT-1993**, Métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- **NOM-035-SEMARNAT-1993**, Métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.
- **NOM-036-SEMARNAT-1993**, Métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- **NOM-037-SEMARNAT-1993**, Métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- **NOM-038-SEMARNAT-1993**, Métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Emisiones de fuentes fijas emitidas por la Dirección General de Industria:

- **NOM-039-SEMARNAT-1993**, Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

- **NOM-040-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental-fabricación de cemento hidráulico-niveles máximos de emisión a la atmósfera.
- **NOM-043-SEMARNAT-1993**, Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
- **NOM-046-SEMARNAT-1993**, Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de azufre, neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico, provenientes de procesos de producción de ácido dodecibencensulfónico en fuentes fijas.
- **NOM-097-SEMARNAT-1995**, Límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país.
- **NOM-105-SEMARNAT-1996**, Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total provenientes de los procesos de recuperación de químicos de las plantas de fabricación de celulosa.
- **NOM-121-SEMARNAT-1997**, Límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles (COV'S) provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías nuevas en planta de automóviles, unidades de uso múltiple, de pasajeros y utilitarios; carga y camiones ligeros, así como el método para calcular sus emisiones.
- **NOM-123-SEMARNAT-1998**, Contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COV'S), en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos. (aclaración D.O.F. 29-septiembre-1999).
- **NOM-148-SEMARNAT-2006**, Contaminación atmosférica - recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación de petróleo 28/NOV/07.

Emisiones de fuentes fijas emitidas por la Dirección General de Energía y Actividades Extractivas:

- **NOM-075-SEMARNAT-1995**, Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo.
- **NOM-085-SEMARNAT-1994**, Fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión. (modificación D.O.F. 11-NOVIEMBRE-1997).
- **NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005**, Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.

- **NOM-092-SEMARNAT-1995**, Requisitos, especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo ubicadas en el Valle de México.
- **NOM-093-SEMARNAT-1995**, Método de prueba para determinar la eficiencia de laboratorio de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo.
- **NOM-137-SEMARNAT-2003**, Contaminación atmosférica - plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos – control de emisiones de compuestos de azufre.

Emisiones de Fuentes Móviles emitidas por la Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico:

- **NOM-041-SEMARNAT-2006**, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.
- **NOM-045-SEMARNAT-2006**, Protección ambiental.- Vehículos en circulación que usan diesel como combustible.- Límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y características técnicas del equipo de medición.
- **NOM-047-SEMARNAT-1999**, Características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.
- **NOM-048-SEMARNAT-1993**, Niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y humo, provenientes del escape de las motocicletas en circulación que utilizan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible.
- **NOM-049-SEMARNAT-1993**, Características del equipo y el procedimiento de medición, para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulación que usan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible.
- **NOM-050-SEMARNAT-1993**, Niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos como combustible.

Emisiones de Fuentes Móviles emitidas por la Dirección General Industrial:

- **NOM-042-SEMARNAT-2003**, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

- **NOM-044-SEMARNAT-2006**, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipadas con este tipo de motores.
- **NOM-076-SEMARNAT-1995**, Niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta. (acuerdo D.O.F. 29-diciembre-2003).

A continuación, en la tabla I.6, se desglosan los atributos más relevantes para la gestión de la calidad del aire contenidos en este cuerpo de leyes. Como resultado de la distribución de competencias cabe resaltar que la responsabilidad del desarrollo y la ejecución de planes y programas para la prevención y el control de la contaminación en la ciudad de México recae esencialmente en el Gobierno del Distrito Federal, en el gobierno del estado de México y en la SEMARNAT.

Tabla I.6 a y b. Atribuciones administrativas del gobierno Federal y de las entidades locales en el control de la contaminación del aire. <sup>[39]</sup>

(a)

Funciones	Sector de actividad y responsabilidad institucional					
	Transporte	Industria	Servicios	Energía	Suelo	Servicios públicos
Cambio ó mejoramiento de combustibles	F	F	F	F		
Control de Combustión y de emisiones	F	F	F	F		F M
Normatividad Vigilancia	F <sup>1</sup> M	F M	M	F	F M	M
Reubicación y manejo de procesos urbanos	M	F M	M	F M	F M	M

<sup>1</sup> Sólo en el caso de vehículos nuevos.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

(b)

Funciones		
Monitoreo y análisis	Normatividad y asesoría	F
	Medición y tratamiento de la información	F M
Investigación sobre efectos de la contaminación atmosférica y evaluación de programas		F M
Investigación y seguimiento tecnológico de las opciones de control		F M
Concertación y comunicación pública		F M

<sup>F</sup> Indica atribución del gobierno federal (SEMARNATL, S. SALUD, SECOFI, SCT, SARH, Pémex y CFE).

<sup>M</sup> Indica atribución de las entidades metropolitanas (GDF, Edo. Méx. y gob. Municipales de la ZMCM).

### **Estructura administrativa para la atención del problema en la actualidad.**

Se presenta un esquema de la distribución de atribuciones de los distintos niveles de gobierno. Como se observa, los órganos federales son esencialmente responsables de los combustibles y de la normatividad técnica en tanto que las entidades estatales lo son de la vigilancia y del manejo de los procesos urbanos relevantes. En cuanto a los aspectos de medición, diagnóstico, investigación y planeación de estrategias de control, las responsabilidades no son exclusivas, de tal forma que en este momento existe una amplia diversidad de entidades que realizan esfuerzos en estos sentidos.

La estructura administrativa enfocada al combate de la contaminación del aire en la ciudad de México ha sido modificada también recientemente. En el Diario Oficial de la Federación del 08 de enero de 1992, se publicó el acuerdo por el que se crea la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México.

La Comisión tiene por objeto definir y coordinar las políticas, programas y proyectos, así como verificar la ejecución de las acciones que las dependencias y entidades de la administración pública deban emprender contra la contaminación ambiental en esta zona. Cuenta con un consejo en el que se analizan las opiniones y propuestas el cual está integrado por representantes de la comunidad científica y por miembros de los sectores social y privado.<sup>[40]</sup>

### **Las principales funciones de la comisión son:**

1. Definir, en forma concurrente, las políticas, programas, proyectos y acciones que las dependencias y entidades de la administración pública federal deban observar y ejecutar en materia de prevención y control de la contaminación ambiental en la zona, incluyendo los concernientes a las contingencias y emergencias ambientales.

2. Establecer los criterios y lineamientos para la integración de programas, proyectos y acciones especiales para prevenir y controlar la contaminación ambiental en la zona, los cuales especificarán las acciones obligatorias para el sector público.
3. Establecer los mecanismos que garanticen la adecuada coordinación de las mencionadas acciones.
4. Opinar sobre los programas, proyectos y presupuestos de las dependencias y entidades de la administración pública federal, que prevean acciones relacionadas con el medio ambiente en dicha zona.
5. Proponer a las autoridades correspondientes las acciones y medidas para prevenir y controlar contingencias ambientales y emergencias ecológicas en la mencionada zona.
6. Acordar la realización de programas de investigación y desarrollo tecnológico y de capacitación de recursos humanos en materia ambiental.
7. Definir los mecanismos para allegar los recursos necesarios a fin de construir un fondo para el financiamiento de los programas, proyectos y acciones cuya realización acuerde la comisión.
8. Evaluar periódicamente el cumplimiento de los acuerdos y determinaciones de la comisión.

Dentro de la SEMARNAT, el Instituto Nacional de ecología y la Procuraduría para la Defensa del Ambiente mantienen la responsabilidad de ejecutar y vigilar la aplicación de la LGEEPA en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica. En el caso del GDF, la Coordinación General de Reordenación Urbana y Protección Ecológica es formalmente responsable de realizar los estudios tendientes a prevenir, controlar y reducir el deterioro de la calidad del aire, agua y suelo a través de acciones coordinadas y sistemáticas y de proponer, coordinar y ejecutar las políticas del GDF en materia de planificación urbana y protección ecológica.

Sin embargo, existe una nueva estructura fuera de esta coordinación que en la actualidad (marzo de 1992) ha asumido las responsabilidades del GDF en materia ambiental. Por su parte, la Coordinación General de Transporte ejerce las funciones de administración y regulación del transporte urbano, aunque su participación en las políticas de control de la contaminación del aire se ha limitado a considerar aspectos ambientales en la compra y regulación de nuevas unidades de autobuses, minibuses y taxis. En el ámbito del gobierno del estado de México, la Secretaría de Ecología funge como encargada de ejecutar y vigilar las responsabilidades otorgadas al gobierno estatal por la LGEEPA y la Ley de Ecología del Estado.

Por otro lado las direcciones generales de Epidemiología y de Salud Ambiental de la Secretaría de Salud se encargan de evaluar los efectos potenciales de la calidad del aire en la ZMCM, así como de contribuir al desarrollo de criterios de salud y de consolidar un sistema de vigilancia epidemiológica.<sup>[40]</sup>

## **I.6 Marco legal y normativo en el extranjero<sup>[41]</sup>**

El cuerpo de la legislación de EE.UU. sobre la contaminación del aire está contenido principalmente en la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) y las reglamentaciones (locales, estatales y federales) que la implementan. En la tabla I.7, se listan las partes principales de esta compleja legislación. La legislación contiene muchas otras provisiones que son de procedimiento, legal y presupuestarias y que, en general, son menos interesantes para los ingenieros especialistas en la contaminación del aire que las aquí listadas.

Las leyes sobre la contaminación del aire también interactúan con las de la contaminación del agua y las de desechos sólidos. Las reglamentaciones de la EPA que implementan la Clean Air Act se encuentran en el capítulo 40 del Code of Federal Regulations (CFR, Código de Reglamentaciones Federales) (tabla I.7).

Se realizó un breve resumen desde los inicios de las principales leyes de EE.UU. sobre la contaminación del aire.

TABLA I.7 Secciones más importantes de la Clean Air Act de 1970, según las enmiendas de 1977 y 1990.<sup>[41]</sup>

<b>SECCIÓN</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PROVISIONES PRINCIPALES</b>
<b>Prevención de la Contaminación del Aire y Control</b>		
101-131	Parte A- Calidad del Aire y Limitaciones de Emisiones	La ley obliga a la EPA a establecer los Estándares Nacionales de Calidad del Aire (NAAQS) para los contaminantes atmosféricos que ponen en peligro el bienestar o la salud pública.
160-169	Parte C - Prevención del deterioro significativo de la calidad del aire	Los estados son responsables de establecer los procedimientos para alcanzar y mantener los estándares. En virtud del artículo 110 de la ley, los estados que adopten planes, conocidos como Planes Estatales de Implementación.
171-193	Parte D – Incumplimiento en los Requisitos para el Plan de Espacios	Áreas de incumplimiento, se clasifican sobre la base de un "valor de diseño", que se deriva de la concentración de contaminantes (en partes por millón o microgramos por metro cúbico) registrados por los dispositivos de monitoreo de la calidad del aire.
202-235	Normas de emisión para fuentes móviles	La EPA regula la mayoría de las fuentes móviles de contaminación atmosférica (por ejemplo, automóviles y aviones). Normas de funcionamiento expedida por la EPA limitan las emisiones de determinados agentes contaminantes procedentes de estas fuentes.
201-219	Parte A- Normas para Emisiones en vehículos de motor y combustible	Al igual que con las áreas de incumplimiento de ozono, las áreas de incumplimiento de monóxido de carbono (CO) están sujetos a requisitos de control específico. Especificadas en la sección correspondiente.
231-234	Parte B- Normas para Emisiones de Aviones	Las áreas de incumplimiento de monóxido de carbono (CO) están sujetos a requisitos de control específico. Especificadas en la sección correspondiente.



**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

Tabla I.7. Cont.

241-250	Parte C - Vehículos de Combustible Limpio	Las áreas de incumplimiento de monóxido de carbono (CO) están sujetos a requisitos de control específico. Especificadas en la sección correspondiente.
301-328	General	La EPA desarrolla una lista de 188 fuentes que emiten Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), y elaborar un estatuto para esta categoría de fuentes.
401 - 416	Control de la deposición ácida.	La Ley de Aire Limpio hizo enmiendas en 1990, agregó un programa de control de la deposición ácida (Título IV), para hacer frente a la lluvia ácida causada por el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) y óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )
501-507	Permisos	La Ley de Aire Limpio exige a los estados administrar un programa de permisos para la operación integral de las fuentes emisoras de contaminantes del aire.
601-618	Protección del ozono estratosférico	La Ley del Aire Limpio (CAA) hace enmiendas para el agotamiento del ozono estratosférico. Se pretende eliminar sustancias de la capa de ozono

1. Desde 1863 hasta 1970, los esfuerzos para el control de la contaminación del aire se basaron en gran parte en la filosofía de la norma sobre emisiones o del aire más limpio posible. Desde entonces, la filosofía de la norma de la calidad del aire o del daño cero ha sido la dominante en la legislación de EE.UU. sobre la contaminación del aire. Se ha propuesto la filosofía de los impuestos por emisiones, o la colocación en el mercado de recursos públicos, y se ha analizado como una alternativa para aquéllas.
2. Las normas de la calidad del aire, las cuales se basan en las suposiciones de valores verdaderos de umbral, responden la pregunta: “¿Qué tan limpio debe ser el aire?” Las normas sobre emisiones y los impuestos por emisiones no dan respuesta a esa pregunta en lo absoluto. Si se prueba que la hipótesis básica de la filosofía de las normas de la calidad del aire es incorrecta, entonces ninguna de estas filosofías dará respuesta a esa pregunta.
3. De modo informal, o inconscientemente, las oficinas de control de la contaminación han dado respuesta a esa pregunta por medio de cierto tipo de estimación de costos y beneficios.
4. En las legislaciones y reglamentaciones actuales de EE.UU. sobre la contaminación del aire se han visto favorecidos los métodos de mercado de colocación de derechos de emisiones.

**CAPÍTULO II**

**SELECCIÓN DEL MATERIAL  
ADSORBEDOR Y DE  
SOPORTE**

## II.1 Aspectos generales<sup>[42]</sup>

La superficie de los materiales sólidos es una región excelente, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades para adsorber gases o líquidos que se encuentran en el medio ambiente y que son nocivos para la salud del hombre (fig II.1).

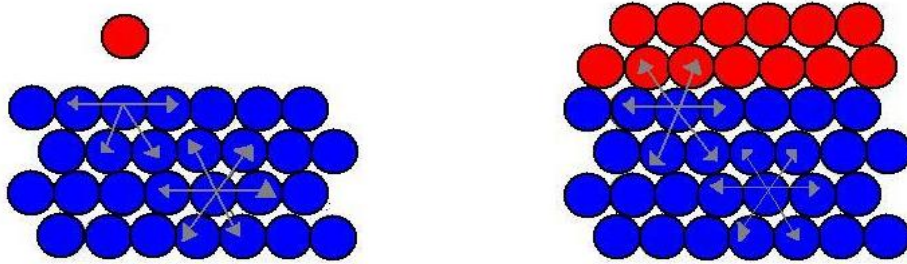


Figura II.1 Esquema de las fuerzas de cohesión en un sólido y en un sólido con un gas adsorbido<sup>[42]</sup>

La adsorción de la superficie de un sólido se define como la acumulación de material gaseoso o líquido usando las fuerzas de cohesión del material sólido y gas adsorbido.

Para este principio hay dos tipos de adsorción:

1. Fisisorción: La especie adsorbida (fisorbida) conserva su naturaleza química.
2. Quimisorción: La especie adsorbida (quimisorbida) sufre una transformación, más o menos intensa, para dar lugar a una especie distinta.

Otras diferencias:

- a) En la fisisorción, el gas se adsorbe formando capas sucesivas, mientras que en la quimisorción la adsorción queda restringida a una monocapa.
- b) La energía de adsorción es mayor para la quimisorción que en el caso de la fisisorción.
- c) La fisisorción es un fenómeno más general y menos específico.
- d) La transformación química de la especie adsorbida (Quimisorción) requiere una cierta energía de activación, que no es necesaria en fisisorción, por lo que esta última suele ocurrir a temperatura ambiente o menores.

En la figura II.2 se presenta un esquema de la evaluación de energía potencial.

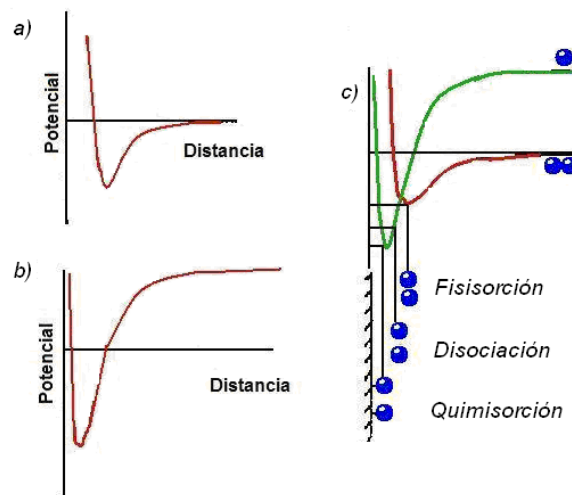


Figura II.2. Esquema de la evolución de la energía potencial de una molécula de gas acercándose a una superficie plana. a) Fisisorción b) Fisisorción de una molécula disociada y c) fisisorción seguida de quimisorción.<sup>[42]</sup>

La distancia para la cual la energía del sistema respecto a la molécula a ser adsorbida es mínima se conoce como distancia de adsorción.

$$(d_{\text{fisisorción}} < d_{\text{quimisorción}})$$

Debido a que el potencial de atracción para la especie quimisorbida es mayor que la fisisorbida, la molécula estará más cerca de la superficie.

La fisisorción es una etapa previa y necesaria para que ocurra la quimisorción, que tiene una mayor interacción con la superficie y por lo tanto, menor distancia de adsorción.

## II.2 Origen de la estructura porosa y descripción de un sólido poroso

La textura porosa surge del método de preparación de los sólidos:

- La precipitación a partir de una disolución origina partículas precursoras que se aglomeran y forman una estructura porosa.
- La cristalización hidrotérmica produce zeolitas u otros sólidos microporos cristalinos, donde el peculiar ordenamiento de sus unidades de construcción genera cavidades intracristalinas de tamaño molecular.
- La eliminación de materias volátiles durante tratamientos térmicos.
- La disolución selectiva de algunos componentes puede producir poros.

Debe distinguirse entre los siguientes términos:

- Agregado es un conjunto de partículas sueltas, no consolidadas.
- Aglomerado es un conjunto rígido de partículas consolidadas.

### **Descripción cualitativa de un sólido poroso**

Cualquier material que contenga cavidades, canales o intersticios puede ser considerado como poroso.

Clasificación de los poros de acuerdo a su disponibilidad a un fluido externo.

- Poros cerrados: totalmente aislados de sus vecinos. Influencian propiedades macroscópicas como la densidad, fuerza mecánica y conductividad térmica, pero son inactivos en procesos como flujo de fluidos y adsorción de gases.
- Poros abiertos: poseen canales continuos de comunicación con la superficie externa del material.

Las geometrías más frecuentes de los poros son:

- Poros cilíndricos (por ejemplo, en alúmina y óxido de magnesio).
- Poros en forma de rendijas o hendiduras (en carbón activado y arcillas).
- Espacios o huecos entre esferas de sólidos conectadas (en sílice y otros sólidos obtenidos a partir de geles).
- Poros en forma de bote de tinta (el cuerpo del poro es mayor que su boca).
- Poros en forma de embudo (contrario al anterior).

La International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (figura II.3).

Macroporos	→	> 50 $\mu\text{m}$
Mesoporos	→	2-50 $\mu\text{m}$
Microporos	→	2 $\mu\text{m}$

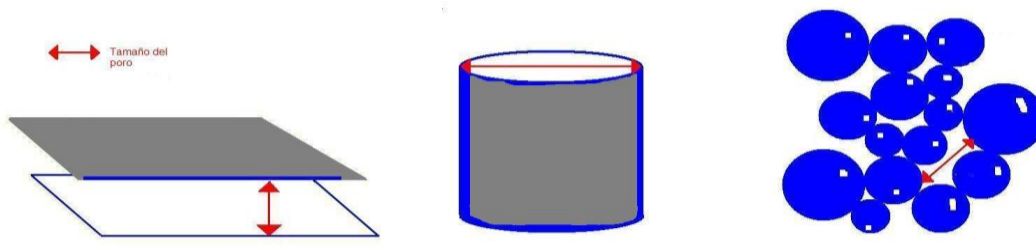


Figura II.3. Modelos comunes de poros.<sup>[42]</sup>

En un corte de sólidos porosos se presentan algunos modelos y tipos de poro, como se muestra en la figura II.4.

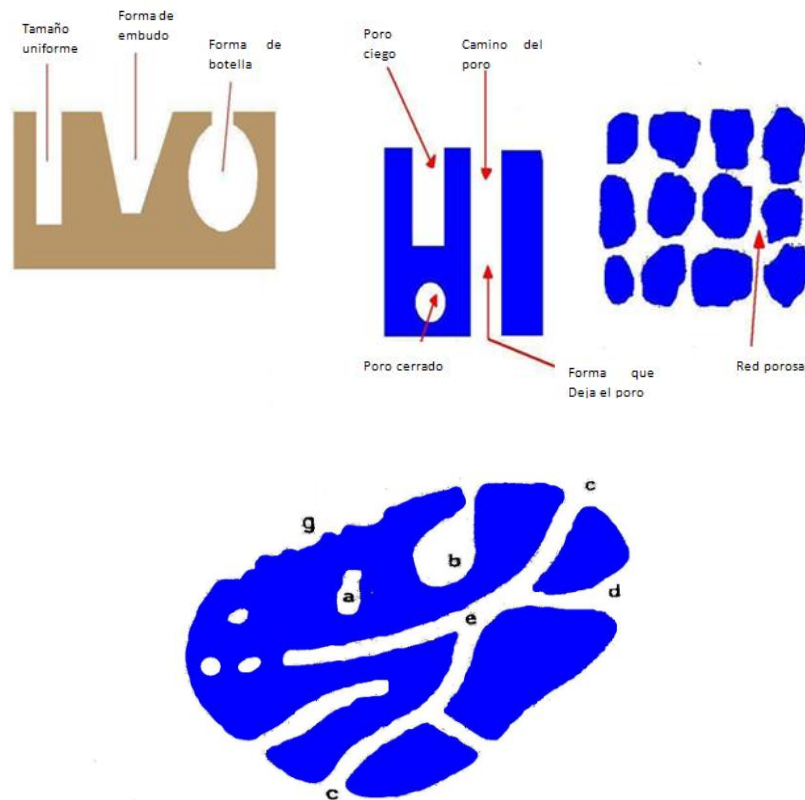


Figura II.4. Modelos y tipos de poros en un corte de un sólido poroso.<sup>[42]</sup>

### II.3 Principales métodos de caracterización

Son varios los métodos que permiten caracterizar un sólido, tales como:

- **Estereología.** Basada en la observación directa de cortes transversales mediante su estudio por microscopía electrónica u óptica.
- **Dispersión de la radiación.** La dispersión de la radiación en un sólido poroso experimenta variaciones en la longitud de la radiación dispersada.
- **Picnometría.** La medida de desplazamiento de fluidos permite estimar la densidad aparente de un sólido.
- **Flujo de fluidos.** Se pretende obtener la estructura porosa de un material a partir de su permeabilidad a un flujo de fluidos.
- **Métodos calorimétricos.** Se basan en estudiar el cambio de entalpía que ocurre cuando una muestra se sumerge en un líquido o absorbe gases o líquidos.
- **Otros métodos.** Cromatografía de exclusión de tamaños; NMR de Xenón.
- **Adsorción de gases.**

### Adsorción física: caracterización de la textura porosa

Las medidas de adsorción de gases se utilizan ampliamente para la caracterización de una amplia variedad de sólidos porosos, como óxidos, carbones, zeolitas o polímeros orgánicos.

A medida que disminuye el tamaño del poro aumenta el potencial de adsorción.

En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa, y a medida que aumenta la cantidad adsorbida, el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas), (figuras II.5).

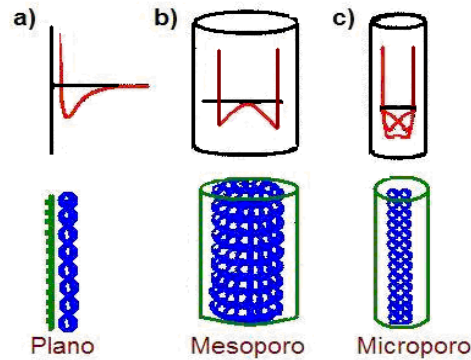


Figura II.5. Esquema del plano de un sólido poroso.<sup>[42]</sup>

La cantidad de gas adsorbido a una temperatura dada para distintas presiones relativas de gas se conoce como isoterma de adsorción (figura II.6).

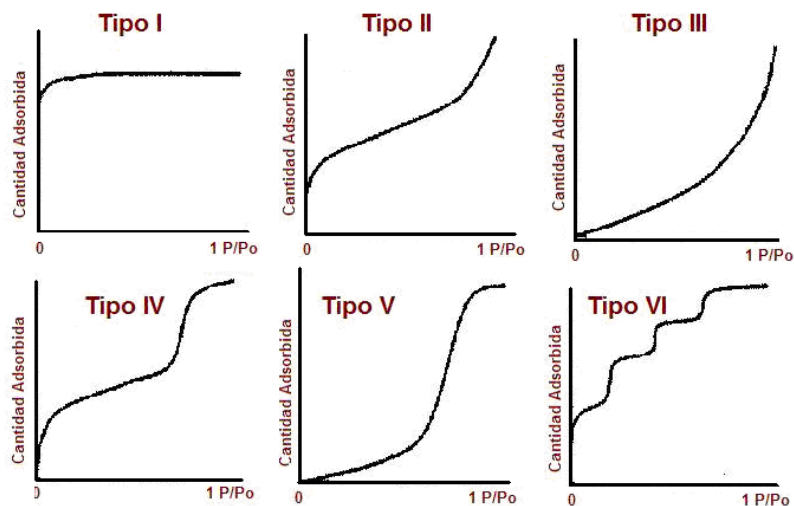


Figura II.6. Representación esquemática de los seis tipos de isotermas de adsorción.<sup>[42]</sup>

**La isoterma tipo I** se caracteriza porque la adsorción se produce a presiones relativas bajas. Característica de los sólidos microporosos.

**La isoterma tipo II** es característica de sólidos macroporosos o no porosos, tales como negros de carbón.

**La isoterma tipo III** ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja. Ejemplo: adsorción de agua en negros de carbón grafitizados.

**La isoterma tipo IV** es característica de sólidos mesoporosos. Presenta un incremento de la cantidad adsorbida importante a presiones relativas intermedias, y ocurre mediante un mecanismo de llenado en multicapas.

**La isoterma tipo V** al igual que la isoterma tipo III, es característica de interacciones adsorbato-adsorbente débiles, pero se diferencia de la anterior en que el tramo final no es asintótico.

**La isoterma tipo VI** es poco frecuente. Este tipo de adsorción en escalones ocurre sólo para sólidos con una superficie no porosa muy uniforme. Ejemplo: adsorción de gases nobles en carbón grafitizado.

La medida de la superficie específica se realiza mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET). En la figura II.7 se muestra la isoterma de la zona de llenado de la monocapa y la tipo I.

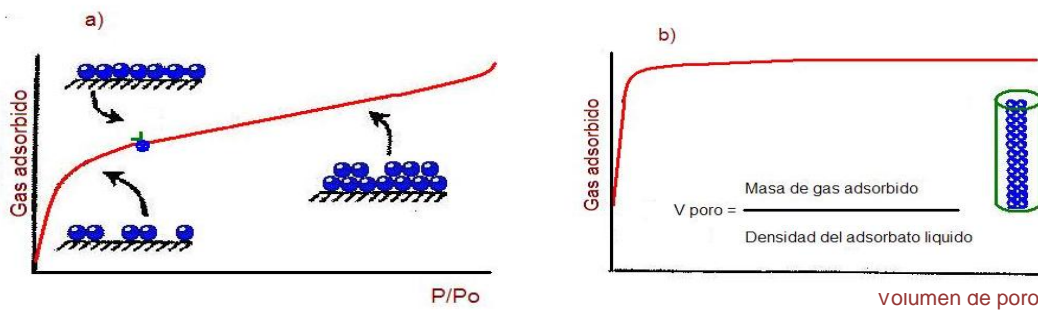


Figura II.7. a) Isotherma en la que se muestran la zona de llenado de la monocapa, la multicapa, y el punto b) Isotherma tipo I en la que se señala cómo calcular el volumen de poro a partir de la cantidad máxima de gas adsorbido. <sup>[42]</sup>

La idea central del método BET es conocida por la cantidad de gas adsorbido necesario para formar una monocapa y el área que ocupa una de estas moléculas adsorbidas que permite estimar el área del sólido.

La estimación de la cantidad de gas adsorbido necesario para la formación de una monocapa,  $n_m$  se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{n(P_0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m} \bullet \frac{P}{P_0}$$



En el caso de la isoterma tipo I, el volumen de poros puede estimarse de forma sencilla mediante la siguiente relación:

**Masa total de gas adsorbido / densidad de la fase adsorbida**

$$V_{\text{poro}} = \frac{MT_{\text{gas}}}{\rho_{\text{fase}}}$$

Donde:

$MT_{\text{gas}}$  = Masa total del gas adsorbido

$\rho_{\text{fase}}$  = Densidad de la fase líquida adsorbida

El método de Dubinin-Radushkevich (DR) permite obtener el valor del volumen de microporos:

$$W = W_0 \exp\left(-\frac{K}{\beta^2 (RT \ln(P/P_0))^2}\right)$$

$W$ : Volumen adsorbido a cada presión relativa.

$W_0$ : Volumen de poros.

$K$ : Constante dependiente de la estructura.

$\beta$ : Coeficiente de afinidad, que es el cociente entre los potenciales de adsorción de dos gases.

$P/P_0$ : Presión relativa fija

$R$ : Constante de los gases ideales

$T$ : Temperatura en grados K

El método "t" y sus extensiones suministran una manera simple de comparar la forma de una isoterma dada, con la de un sólido no poroso estándar.

En el método t original, la cantidad adsorbida se representa frente a "t", el grosor correspondiente a la multicapa calculado a partir de la isoterma estándar obtenido con un sólido de referencia no poroso. Para la evaluación de la micro porosidad, es preferible reemplazar "t" por la adsorción "reducida",  $\alpha_s$ , definida como  $(n^a/n^a_s)$  donde  $n^a_s$  es la cantidad adsorbida por el sólido de referencia a una presión relativa fija,  $P/P_0=s$ .

Es esencial que las isotermas estándar (o curvas t) se obtengan con sólidos de referencia que sean no porosos o de estructura superficial conocida. Existe una gran variedad de adsorbatos:  $N_2$ ,  $O_2$ , Ar, Kr,  $CO_2$  y algunos hidrocarburos, como el benceno y algunos alcanos y alcoholes de cadena corta.

Sin embargo, la adsorción de  $N_2$  a una temperatura de 77 K es la que más se utiliza, cubre todo el rango de porosidad e interacciona débilmente con la mayoría de sólidos. La microporosidad estrecha se estudia con  $CO_2$  a una temperatura de 273 K. Es necesario emplear una serie de moléculas sonda para establecer fiablemente la distribución del tamaño de microporos. El análisis del tamaño de macroporos emplea la porosimetría de mercurio.

### Ciclos de histéresis

La histéresis que aparece en el intervalo de multicapa de las isothermas de fisisorción se asocia normalmente con la condensación capilar en la estructura de mesoporos.

Tipo A. Característica de capilares de forma tubular abierto en ambos extremos, y de capilares con forma de bote de tinta (fig.II.8a).

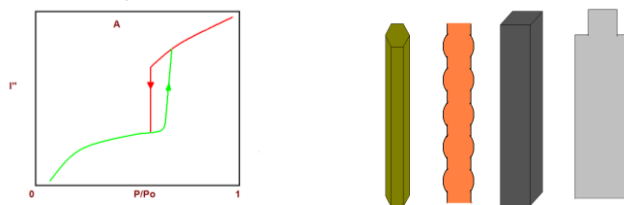


Figura II.8a. Histéresis tipo A y las estructuras de poro posibles.<sup>[42]</sup>

Tipo B. Característica de poros formados por dos láminas paralelas. Este tipo de histéresis ocurre en el grafito, montmorillonitas e hidróxidos de aluminio (Fig.II.8b).

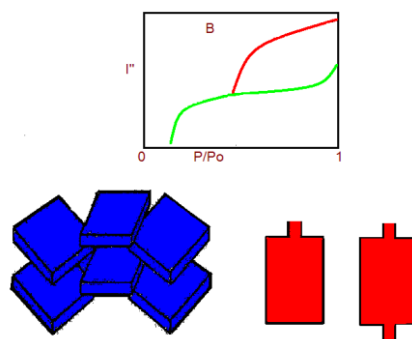


Figura II.8b. Histéresis tipo B y las estructuras de poro posibles.<sup>[42]</sup>

Tipo C. Característica de materiales con poros esferoidales todos con un radio de la cavidad circular pero con entradas de varios tamaños (Fig.II.8c).

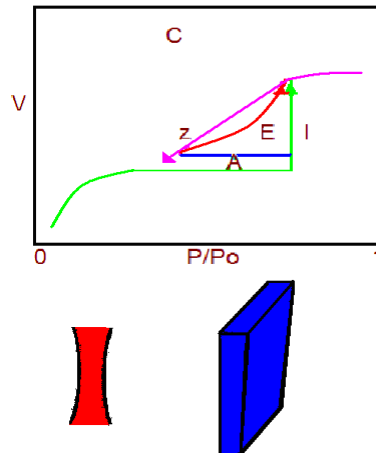


Figura II.8c. Histéresis tipo C y las estructuras de poro posibles. <sup>[42]</sup>

Tipo D. Tipo raro de histéresis poco frecuente.

Tipo E. Ocurre para poros en forma de bote de tinta con cuerpos grandes y radio efectivos variables y cuellos pequeños y estrechos.

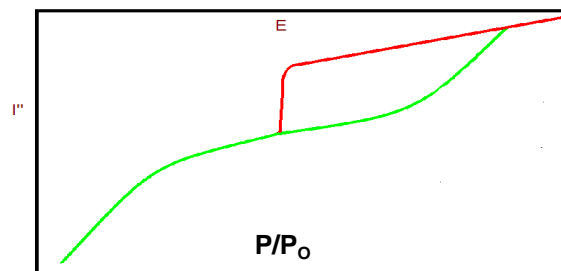


Figura II.8d. Histéresis tipo E posibles. <sup>[42]</sup>

### Determinación de las isothermas de adsorción. Procedimiento experimental.

1. Se realiza la desgasificación del adsorbente y exposición de la superficie a un elevado vacío.
2. Para conseguir una buena limpieza de la superficie se fluye un gas inerte sobre el adsorbente a elevadas temperaturas.
3. Una isoterma de adsorción muestra cómo la cantidad adsorbida depende de la presión de equilibrio del gas a temperatura constante.
4. Los procedimientos utilizados para la determinación de la cantidad de gas adsorbido son:

- a. Aquellos que dependen de la medida de la cantidad de gas eliminada de la fase gaseosa (*método volumétrico*).
- b. Aquellos que implican la medida del gas retenido por el adsorbente.

En la práctica, pueden usarse técnicas estáticas o dinámicas para determinar la cantidad de gas adsorbido.

## **II.4 Clasificación de los materiales adsorbentes**

### **Las arcillas: Propiedades y usos<sup>[43]</sup>**

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino, inferior a  $2\mu\text{m}$ .
- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a  $2\mu\text{m}$ .
- Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica.
- Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a  $2\mu\text{m}$ . Según esto, todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las  $2\mu\text{m}$ .

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

### Estructura de los filosilicatos

Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos  $(\text{SiO})_4^{4-}$  se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico, puede estar, en parte, sustituido por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ .

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibsita o brucita. En ellas algunos  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , pueden estar sustituidos por  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$  y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos  $(\text{OH})^-$  de la capa brucitica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un  $(\text{OH})^-$  en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales.

El resto de los  $(\text{OH})^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros (Figura II.9).

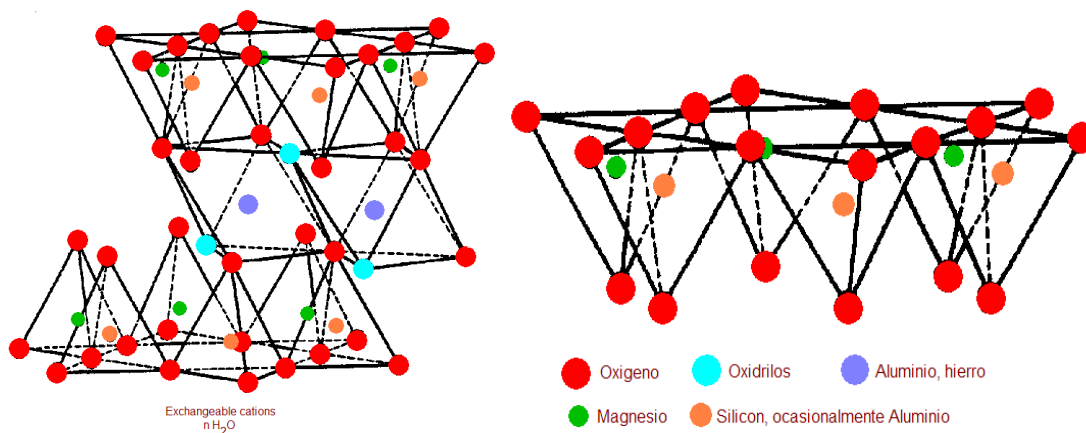


Fig. II.9. Capas tetraédricas.<sup>[43]</sup>

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan bilaminares, **1:1**, o **T:O**; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, **2:1** o **T:O:T**. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina.

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina trioctaédrica ( $Mg^{2+}$  dominante en la capa octaédrica). Si solo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina dioctaédrica (el  $Al^{3+}$  es el catión octaédrico dominante).

En algunos filosilicatos (esmeclitas, vermiculitas, micas) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar, o espacio existente entre dos láminas consecutivas de cationes, como por ejemplo en el grupo de las micas, cationes hidratados, como en las vermiculitas y esmeclitas o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se les denomina **T:O:T:O** o **2:1:1**. La unidad formada por una lámina más la interlámina es la unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos ( $Mg^{++}$  y  $Ca^{++}$ ).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas (fig.II.10).

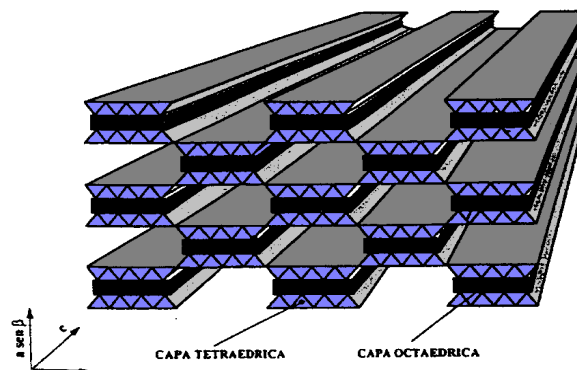


Fig. II.10. Unión y disposición de las capas.<sup>[43]</sup>

También pertenecen a este grupo de minerales la Sepiolita y la Paligorskita, a pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, éstos tienen hábito fibroso, ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada **8** posiciones octaédricas como la **sepiolita** o cada **5** posiciones como la **paligorskita**. Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

### **Clasificación de los filosilicatos**

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos (tabla II.1). Como puede verse pertenecen a los

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

filosilicatos grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas.

Tabla II.1. Clasificación de filosilicatos en bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos. <sup>[43]</sup>

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
<b>BILAMINARES</b> T:O 1:1		Caolinita		Antigorita	
	<b>CANDITAS</b>	Nacrita	<b>SERPENTINA</b>	Crisolito	
		Dichita		Lizardita	
		Halloisita		Bertierina	X = 0
<b>TRILAMINARES</b> T:O:T 2:1		Pirofilita		Talco	X = 0
		Montmorillonita		Saponita	X = 0.2-0.6
	<b>ESMECTITAS</b>	Beidellita	<b>ESMECTITAS</b>	Hectorita	
		Nontronita			
		Vermiculitas		Vermiculitas	X = 0.6-0.9
		Illitas			X = 0.9
		Moscovita		Biotita	
	<b>MICAS</b>	Paragonita	<b>MICAS</b>	Flogopita	
<b>T:O:T:O</b> 2:1:1	<b>CLORITAS</b>				
<b>FIBROSOS</b>	Paligorskita		Sepiolita		

### Propiedades físico-químicas

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su tamaño de partícula extremadamente pequeño (inferior a 2  $\mu\text{m}$ )
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada de otros

cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

**Superficie específica:** La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en  $m^2/g$ .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad (tabla II.2).

Tabla II.2. Tipos de arcillas que poseen una elevada superficie. <sup>[43]</sup>

<b>Tipo de arcilla</b>	<b>Superficie específica <math>m^2/g</math></b>
Caolinita de elevada cristalinidad	15
Caolinita de baja cristalinidad	50
Halloisita	60
Illita	50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240

**Capacidad de Intercambio catiónico:** Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80% de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20% de la carga total de la lámina.

A continuación en la tabla II.3 se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en meq/100g) en zeolitas:



## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

Tabla II.3. Capacidad de intercambio catiónico en zeolitas.<sup>[43]</sup>

Zeolita	meq/100g
Caolinita	3-5
Halloisita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200
Sepiolita-paligorskita	20-35

**Capacidad de adsorción:** Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los adsorbentes ya que pueden adsorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (**esmeclitas**) o en los canales estructurales (**sepiolita** y **paligorskita**).

La capacidad de adsorción está directamente relacionada con las características texturales, superficie específica y porosidad, y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: fisisorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y quimisorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

**Hidratación e hinchamiento:** La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmeclitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmeclitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmeclita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales.

Si por el contrario, tienen  $\text{Ca}^{++}$  o  $\text{Mg}^{++}$  como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

**Plasticidad:** Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límites Líquido, Plástico y de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.<sup>[44]</sup>

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

**Tixotropía:** La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si se les deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este comportamiento especial deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

**Arcillas comunes:** El principal uso de estos materiales arcillosos se da en el campo de la cerámica de construcción (tejas, ladrillos, tubos, baldosas), alfarería tradicional, lozas, azulejos y gres, desde los comienzos de la humanidad.

Prácticamente todas las arcillas son aptas para estos usos, sin tomar en cuenta las consideraciones económicas.

Así mismo, utilizadas en la manufactura de cementos, como fuente de alúmina y sílice, y en la producción de áridos ligeros (arcillas expandidas).

**Arcillas industriales:** Hoy en día las arcillas comerciales, son aquellas que sirven como materia prima industrial, figuran entre los recursos minerales más importantes, tanto por el volumen explotado como por el valor de la producción. Un 90% de la producción se dedica, preferentemente a la fabricación de materiales de construcción y agregados. Sólo un 10% se dedica a otras industrias (fabricación de papel, caucho, pinturas, absorbentes, decolorantes, arenas de moldeo, productos químicos y farmacéuticos, agricultura, etc.)

En general, al primer tipo (las que se utilizan en construcción) se les denomina arcillas cerámicas, arcillas para la construcción o arcillas comunes, son arcillas compuestas por dos o más minerales de la arcilla, generalmente illita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales que no son filosilicatos (carbonatos, cuarzo). Se utilizan para la fabricación de materiales de construcción y agregados.

Al segundo tipo se las denomina arcillas especiales, son arcillas constituidas fundamentalmente por un sólo tipo de mineral de la arcilla, y sus propiedades dependen esencialmente de las características de ese mineral. Estas, a pesar de ser mucho menos importantes en volumen, suponen más del 70% del valor de las arcillas comerciales, y son objeto de comercio internacional. Se pueden dividir en caolines y arcillas caoliníferas, bentonitas, sepiolita y paligorskita.

**Paligorskita y Sepiolita:** Las arcillas con Paligorskita o Sepiolita como mineral mayoritario son raras. Son arcillas conocidas desde la antigüedad. Los Mayas fabricaban el azul Maya con paligorskita. La sepiolita se ha utilizado para fabricar pipas (de espuma de mar). Además entre 1735 y 1808 se preparaba con sepiolita la pasta de la famosa porcelana. Los principales yacimientos se encuentran en Eskişehir, Turquía. Les siguen en importancia los de Samos (Grecia), Marruecos y la Península Ibérica.

Son arcillas con un contenido en dichos minerales superior al 50%, hábito fibroso con una enorme área superficial debida tanto al pequeño tamaño de partícula como a la porosidad estructural que presenta su estructura. La superficie específica teórica se calcula alrededor de los 900 m<sup>2</sup>/g, aunque la superficie accesible es muy inferior.

Su peculiar estructura les confiere una serie de propiedades, entre ellas las de formar suspensiones poco afectadas por la concentración iónica y una enorme capacidad sorcitiva, por lo que son poderosos decolorantes y adsorbentes. También tienen propiedades reológicas, son capaces de formar geles y suspensiones estables de alta viscosidad a bajas concentraciones de sólido. Al igual que las esmectitas, son susceptibles de ser activadas mediante tratamientos térmicos y ácidos.

Los usos de estas dos sustancias son consecuencia de sus propiedades reológicas, tixotropía, alta superficie específica, baja capacidad de cambio y, sobre todo, su elevado poder adsorbente. Por ello se utilizan en:

- Adsorbentes, para lechos de animales, suelos, etc.
- Soporte de aerosoles y aerogeles para pesticidas y fertilizantes.
- En la purificación de productos de petróleo, azúcar, etc; por sus propiedades adsorbentes.
- Procesos de filtración, floculación y clarificación.
- En farmacéuticas, pinturas, resinas y cosmética, por sus propiedades reológicas.
- Cerámica y aislantes.
- Nutrición animal.

**Caolines y arcillas caoliníferas:** Un caolín es una roca que contiene una cierta proporción de minerales como feldespato y otros silicatos de aluminio, que puede ser económicamente extraída y concentrada. Se trata, generalmente, de una arcosa o arena caolinífera, granito o gneis caolinitizado, que es necesario procesar para enriquecer en minerales del grupo del caolín.

La arcilla caolinífera es también un caolín. Igualmente, se trata de una arcilla compuesta, fundamentalmente, de minerales del grupo del caolín. Esta no se procesa, se usa tal cual, e inicialmente los porcentajes en minerales del grupo del caolín son más altos que en el caolín (>50%). Cuando el caolín se usa para cerámica blanca recibe la denominación de China Clay (figura II.11).



<b>Generalidades</b>	
Categoría	Minerales filosilicatos
Clase	9.ED.05 (Strunz)
Fórmula química	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
<b>Propiedades físicas</b>	
Color	Blanco
Raya	Blanca
Lustre	Mate, nacarada
Sistema cristalino	Triclínico
Exfoliación	Perfecta
Dureza	1
Densidad	2.6

Figura II.11. Caolín, generalidades y propiedades físicas. <sup>[45]</sup>

El caolín, tal como se obtiene en una explotación mineral (caolín bruto) posee un contenido variable de caolinita, halloysita que, a veces no llega al 20%, además suele tener cuarzo, feldespatos, micas, y, dependiendo de la roca madre otro tipo de minerales. Para concentrar el mineral es preciso someterlo a diferentes procesos que eleven el contenido en filosilicatos por encima del 80%. El producto final, generalmente, recibe el nombre de caolín lavado.

Como la caolinita tiene un tamaño de partícula muy pequeño, el lavado de las fracciones conduce a un material con alto contenido en caolinita. Es evidente que cuanto mayor sea el contenido en fracciones finas del caolín bruto, mayor será también el porcentaje en caolinita. Un caolín comercial de alta calidad apenas deberá tener partículas superiores a las 20  $\mu\text{m}$ , lo que garantizaría una riqueza en caolinita superior al 80%.

Otro término utilizado para arcillas especiales, con un indudable significado industrial, es el de arcillas refractarias: Arcillas caoliníferas utilizadas para la fabricación de materiales cerámicos refractarios.

Dentro de este grupo pueden incluirse las denominadas arcillas caoliníferas plásticas y dispersables en agua, que son grises o negras pero que cuecen blanco. Son los materiales más interesantes para la fabricación de cerámica blanca de gran calidad. Las arcillas refractarias propiamente dichas, suelen tener óxidos de hierro, lo que hace que no cuezan blanco. Las arcillas caoliníferas duras, carentes de plasticidad se utilizan fundamentalmente para la fabricación de refractarios silicoaluminosos. Por último las Tonsteins (Underclays), son muy similares a las arcillas caoliníferas duras, son niveles volcánicos.

### **Bentonitas:**

Una bentonita es una roca compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, independientemente de cualquier connotación genética.

Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades físico-químicas; así la clasificación industrial más aceptada establece tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua:

- Bentonitas altamente hinchables o sódicas
- Bentonitas poco hinchables o cálcicas
- Bentonitas moderadamente hinchables o intermedias

El término *fuller's'earth*, también conocido en español como tierras de batán, los ingleses lo usan para denominar a las arcillas constituidas fundamentalmente por montmorillonita con  $\text{Ca}^{++}$  como catión de cambio, mientras que los americanos se lo dan a arcillas paligorskíticas. A las bentonitas cálcicas que los ingleses

denominan fuller's'earth los americanos las llaman bentonitas no hinchables.

Otras clasificaciones se basan en criterios distintos, así, por ejemplo, en USA se utiliza el término "Bentonitas del Sur" (Southern Bentonites) como equivalentes de bentonitas cálcicas, ya que la mayor parte de la bentonita cálcica norteamericana se explota cerca del Golfo de México, denominándose "Bentonita tipo Wyoming" a las bentonitas sódicas.

**Tratamientos destinados para mejorar la calidad:** En ocasiones se procede a someter a las bentonitas a procesos físicos y químicos que tienen por objeto potenciar algunas de sus propiedades para determinadas aplicaciones industriales.

Desde el punto de vista industrial tienen gran importancia los procesos destinados bien a modificar las propiedades de superficie del mineral mediante tratamientos de distinta naturaleza (tratamiento ácido, térmico, o de polarización) o bien a modificar la químisorción del espacio interlaminar. El tratamiento ácido produce la destrucción del mineral por disolución de la capa octaédrica, generando sílice amorfa procedente de la capa tetraédrica lo cual conlleva un considerable incremento de la superficie específica. Así mismo, aumentan la capacidad de intercambio iónico y la actividad catalítica. Las variaciones en el tipo de arcilla (granulometría y mineralogía); en el tipo y grado de acidulación (tipo de ácido, temperatura, tiempo de contacto, proporción de arcilla, etc.) darán lugar a diferentes productos con diversas propiedades.

Igualmente, se puede efectuar una activación sódica, sobre bentonitas cálcicas, tratándolas con carbonato cálcico, para obtener bentonitas sódicas. Norteamérica, Europa y Japón son los principales productores de bentonitas activadas.

Si los cationes de cambio inorgánicos de una esmectita son sustituidos por cationes orgánicos de cadena larga de compuestos tipo tetra amonio o alquil amina, a esta arcilla se le denomina arcilla organofílica. Las arcillas naturales son organofóbicas; sin embargo, cuando son modificadas orgánicamente presentan afinidad por las moléculas orgánicas; por ello tienen importantes aplicaciones como adsorbentes de residuos orgánicos. Además son hidrofóbicas, adecuadas para su empleo en la fabricación de pinturas, como gelificantes de líquidos orgánicos, en lubricantes, etc.

El uso de la hectorita como base para las arcillas organofílicas está muy extendido, ya que esta esmectita da un producto de alto poder gelificante en sistemas altamente polarizados.

En 1970 comenzó a funcionar por primera vez en Houston (Texas) una planta de fabricación de montmorillonita sintética. Se trata, en realidad, de un interestratificado al azar illita/montmorillonita.

El material se usa para catálisis en cracking, hidrogenación/deshidrogenación, y como componente en catalizadores hidrotratantes. Posee un área superficial de 110-160 m<sup>2</sup>/g, y una capacidad de cambio entre 150 y 160 meq/g.

También se fabrica hectorita sintética en el Reino Unido, que se comercializa con el nombre de laponita. Es, evidentemente, más pura que el material natural y se destina a los mismos usos que la bentonita sintética.

**Otros tipos de arcillas especiales:** También pueden considerarse arcillas especiales las halloysitas, compuestas fundamentalmente por halloysita, mineral del grupo del caolín y las hectoritas, compuestas por hectorita (una esmectita), Las arcillas halloysíticas también pueden considerarse caolines, y las hectoritas un tipo de bentonitas. Ambos tipos son muy escasos en el mundo.

Recientemente el término arcilla especial ha sido restringido aún más por algunos autores y lo reservan para arcillas raras como la sepiolita o hectorita, poco abundantes, o como la paligorskita y bentonitas blancas. También lo usan para arcillas modificadas químicamente como las bentonitas activadas con tratamientos ácidos u organofílicos, quedando fuera de la denominación de arcillas especiales los caolines, bentonitas y, por supuesto las arcillas comunes.

**Extracción y procesado:** La explotación, normalmente, se efectúa a cielo abierto, utilizando medios mecánicos convencionales. La potencia del recubrimiento a remover varía de unos yacimientos a otros, pero, generalmente, en la mayor parte de las explotaciones son inferiores a los 15 m.

El procesado industrial del producto de cantera viene fijado por la naturaleza y uso a que se destine. Generalmente es sencillo, reduciéndose a un machaqueo previo y eliminación de la humedad y finalmente, a una molienda hasta los tamaños de partícula deseados. La temperatura de secado depende de la utilización posterior de la arcilla.

**Aplicaciones industriales:** Desde el punto de vista industrial, la mayor parte de las aplicaciones no requieren especificaciones estrictas en cuanto a composición química (composición de las capas tetraédrica y octaédrica). Sin embargo, en el caso de las bentonitas si tiene importancia el quimismo del espacio interlamina y sus propiedades fisicoquímicas.

Son muy numerosos los usos industriales de las bentonitas, tanto que resulta difícil enumerarlos todos. Los más importantes son:

**Arenas de moldeo:** A pesar de que la industria ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas y ha ido sustituyendo a las bentonitas por otros productos en la fabricación de moldes para fundición, éste sigue siendo su uso principal.

Las arenas de moldeo están compuestas por arena y arcilla, generalmente bentonita, que proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando su moldeo y dándole resistencia suficiente para mantener la forma adquirida después de retirar el moldeo y mientras se vierte el material fundido.

La proporción de las bentonitas en la mezcla varía entre el 5 y el 10%, pudiendo ser ésta tanto sódica como cálcica, según el uso a que se destine el molde. La bentonita sódica se usa en fundiciones de mayor temperatura que la cálcica por ser más estable a altas temperaturas, suelen utilizarse en fundición de acero, hierro dúctil y maleable y en menor medida en la gama de los metales no férreos. Por otro lado la bentonita cálcica facilita la producción de moldes con detalles más complicados y se utiliza, principalmente, en fundición de metales no férreos.

El aumento de los costos de las materias primas está forzando a las fundiciones a recuperar las mayores cantidades posibles de mezclas de arenas para ser usadas de nuevo, si bien generalmente esto no afecta de forma sensible al consumo de bentonita. El reciclado, en la mayoría de los casos, no es posible, pues la mezcla alcanza temperaturas superiores a los 650°C, y a esas temperaturas la arcilla pierde parte de su agua de constitución, proceso que es irreversible, y pierde con ello sus propiedades, no pudiendo ser recuperada.

**Lodos de perforación:** A pesar de los importantes cambios que van sufriendo con el tiempo las formulaciones de los lodos de perforación, (comenzó a utilizarse a principios del siglo XX) este sigue siendo uno de los mercados más importantes de las bentonitas.

Las funciones que debe cumplir el lodo son:

- Extracción del flóculo y limpieza del fondo del pozo.
- Enfriamiento de la herramienta de perforación.
- Control de presiones de formación y estabilización de las paredes.
- Mantenimiento en suspensión del flóculo.
- Transmisión de potencia hidráulica al tricono.
- Soportar parte del peso de la sarta de perforación.
- Permitir la adición de agentes densificantes.

Las bentonitas de Wyoming son las más utilizadas para la preparación de lodos de perforación.

**Pelletización:** La bentonita se ha venido usando desde los años 50's del siglo pasado. Como agente aglutinante en la producción de *pellets* del material previamente pulverizado durante las tareas de separación y concentración. La proporción de bentonita añadida es del 0,5%, en la mayor parte de los casos.



Aunque no existen especificaciones estandarizadas para este uso, se emplean bentonitas sódicas, naturales o activadas, puesto que son las únicas que forman buenos pellets, así como una resistencia mecánica elevada tras la calcinación.

**Absorbentes:** La elevada superficie específica de la bentonita, le confiere una gran capacidad tanto de absorción como de adsorción. Debido a esto se emplea en decoloración y clarificación de aceites, vinos, sidras, cervezas, etc. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y contaminantes orgánicos.

Se utiliza además como soporte de productos químicos, como por ejemplo herbicidas, pesticidas e insecticidas, proporcionando una distribución homogénea del producto tóxico.

En los últimos años, además, están compitiendo con otras arcillas absorbentes (sepiolita y paligorskita) como materia prima para la fabricación de lechos de animales. La demanda de bentonitas para este uso varía sustancialmente de unos países a otros, así en Estados Unidos comenzaron a utilizarse a finales de los años 80's, sin embargo en Europa el mercado es más complejo y su demanda mucho menor.

**Material de sellado:** La creciente importancia que está tomado en los últimos años, por parte de los gobiernos de toda Europa, la legislación en lo referente a medio ambiente, ha favorecido la apertura y desarrollo de todo un mercado orientado hacia el uso de bentonitas como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radiactivos de baja y media actividad.

Durante muchos años las bentonitas se han venido utilizando en mezclas de suelos en torno a los vertederos, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito. Esta mezcla se podía realizar in situ o sacando el suelo de su emplazamiento, mezclándolo con la bentonita y volviéndolo a colocar en su sitio, la ventaja de la primera alternativa es que supone un gasto menor pero, sin embargo, implica una mezcla menos homogénea. La segunda alternativa, sin embargo, es más cara pero asegura una mejor homogeneización de la mezcla bentonita-suelo. Por otro lado, esto disminuye la cantidad de bentonita necesaria 5-6%, frente a 7-8% para la utilizada en mezclas in situ.

Más recientemente ha surgido una nueva tendencia en el diseño de barreras de impermeabilización que se basa en la fabricación de complejos bentonitas-geosintéticos (geomembranas y geotextiles). Consiste en la colocación de una barrera de arcilla compactada ente dos capas, una de geotextil y otra de geomembrana (plásticos manufacturados, como polietileno de alta densidad o polipropileno, entre otros).

## **DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

La geomembrana es impermeable, mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la bentonita hinchar, produciendo la barrera de sellado compactada.

La norma varía de un país a otro en cuanto a los valores que tienen que cumplir las arcillas compactadas para dicho fin.

Esta utilidad de las bentonitas como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. Las bentonitas más utilizadas para este fin son las sódicas, por tener mayor capacidad de hinchamiento.

Así mismo, se utilizan bentonitas sódicas como material impermeabilizante y contenedor en los siguientes campos:

- Como contenedores de aguas: Estanques y lagos ornamentales, campos de golf, canales etc.
- Como contenedores de aguas residuales: Efluentes industriales (balsas).
- En suelos contaminados: Cubiertas, barreras verticales.
- En el sellado de pozos de aguas subterráneas contaminadas.
- En depósitos de residuos radiactivos: Repositorios subterráneos, sellado de fracturas en granitos, etc.

**Ingeniería civil:** Las bentonitas se empezaron a utilizar para este fin en Europa en los años 50's, y se desarrolló más tarde en Estados Unidos. Se utiliza para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc.

Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad. Las bentonitas sódicas o cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso.

Los usos en este campo se pueden resumir en:

- Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones.
- Prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de bentonita.
- Protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas.
- En cementos: aumenta su capacidad de ser trabajado y su plasticidad.
- En túneles: Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3-5% de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel). También es

posible el transporte de los materiales excavados en el seno de fluidos bentoníticos por arrastre.

- En tomas de tierra: Proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados.
- Transporte de sólidos en suspensión.

**Alimentación animal:** Una aplicación de las bentonitas que está cobrando importancia en los últimos tiempos es su utilización como ligante en la fabricación de alimentos pelletizados para animales. Se emplea en la alimentación de pollos, cerdos, pavos, cabras, corderos, y ganado vacuno, fundamentalmente. Actúa como ligante y sirve de soporte de vitaminas, sales minerales, antibióticos y de otros aditivos. En 1992 se empezó a fabricar con bentonitas un innovador producto comestible denominado “Repotentiado Bentonite (RB)”. Según estudios del “Poultry Research Institute” el aporte de pequeñas cantidades de bentonitas (1%) a la alimentación de aves de corral reporta importantes beneficios: se incrementa la producción de huevos en un 15%, su tamaño en un 10% y la cáscara se hace más dura.

La bentonita tiene una doble misión: actúa como promotor del crecimiento y como atrapador de toxinas. Esto se debe a que el alimento mezclado con bentonita, debido a su gran capacidad de adsorción, permanece más tiempo en la zona intestinal, la arcilla adsorbe el exceso de agua, y hace que los nutrientes permanezcan más tiempo en el estómago, siendo mayor su rendimiento (mayor producción). Por otro lado adsorben toxinas, no pudiendo éstas, por tanto, atravesar las paredes intestinales. La mayor adsorción de agua de los nutrientes, además, hace que los excrementos sean menos húmedos.

**Catálisis:** El uso de aluminosilicatos en diferentes campos de la catálisis es tan antiguo como el propio concepto de catálisis. Son muchas las aplicaciones de las arcillas como catalizadores o soporte de catalizadores en diferentes procesos químicos. Así, son utilizadas en reacciones de desulfuración de gasolina, isomerización de terpenos, polimerización de olefinas, cracking de petróleo, etc. Las propiedades catalíticas de las bentonitas son resultado directo de su elevada superficie específica y tipo de centros activos.

La polarización consiste en introducir, en el espacio interlaminar de una esmectita, un polícatión muy voluminoso que, tras calcinación, da lugar a un óxido estable que determina una porosidad fija y permanente de tamaño controlado (tamices moleculares).

**Industria farmacéutica:** Desde hace tiempo las arcillas se vienen usando como excipiente por la industria farmacéutica. Debido a que no son tóxicas, ni irritantes, y a que no pueden ser absorbidas por el cuerpo humano se utilizan para la elaboración de preparaciones tanto de uso tópico como oral. Se utiliza como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y como modificador de la viscosidad.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

Su principal uso es la preparación de suspensiones tópicas, geles y soluciones. Cuando se usa como parte de una preparación oral, su naturaleza adsorbente puede enmascarar el sabor de otros ingredientes, o puede realentizar la liberación de ciertos fármacos catiónicos (la hectorita y la saponita se utilizan en fármacos o drogas retardantes).

Como en el resto de los excipientes, las cantidades que se requieren son pequeñas. Generalmente las concentraciones de bentonita como agente de soporte son del 0.5-5 % y del 1-2% cuando se usa como adsorbente.

**Otros usos:** Las posibles aplicaciones de las bentonitas son tan numerosas que es casi imposible citarlas todas. Además de los campos de aplicación industrial indicados anteriormente, las bentonitas se utilizan:

- En la industria de detergentes, como emulsionante y por su poder ablandador del agua, debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico.
- Para la fabricación de pinturas, grasas, lubricantes, plásticos, cosméticos, se utilizan arcillas organofílicas, capaces de hinchar y dispersarse en disolventes orgánicos, y utilizarse, por lo tanto, como agentes gelificantes, tixotrópicos o emulsionantes.
- Para desarrollar el color en leucocolorantes, en papeles autocopiativos, se utilizan bentonitas activadas con ácido.
- En agricultura, para mejorar las propiedades de suelos arenosos o ácidos. Así mismo se utilizan esmectitas sódicas para recubrir ciertos tipos de semillas, de forma que su tamaño aumente, y resulte más fácil su distribución mecánica, a la vez que se mejora la germinación.
- En la obtención de membranas de ósmosis inversa, para la desalinización de aguas.

**Caolín:** Se trata de un mineral muy importante desde el punto de vista industrial. Ha sido utilizado desde la antigüedad para numerosos usos. En el siglo XVI adquirió gran fama entre la nobleza la porcelana fabricada a base de pastas cerámicas ricas en caolín. Los principales usos a los que se destina en la actualidad son:

**Fabricación de papel:** El principal consumidor de caolín es la industria papelería, utilizando más del 50% de la producción. En esta industria se usa tanto como carga, como para proporcionarle al papel el acabado superficial o estucado. Para que pueda ser destinado a este uso las especificaciones de calidad requeridas son muy estrictas, tanto en pureza como en color o tamaño de grano.

**Cerámica y refractarios:** También es importante el uso del caolín en la fabricación de materiales cerámicos (porcelana, gres, loza sanitaria o de mesa, electrocerámica) y de refractarios (aislantes térmicos y cementos).

Al igual que en el caso del papel las especificaciones requeridas para el uso de caolines en cerámica y refractarios son estrictas en cuanto a pureza y tamaño de grano.

**Otros usos:** Se utilizan caolines, en menores proporciones, en otras industrias como carga más económica sustituyendo a las resinas en; pinturas, aislantes, caucho. También como carga de abonos, pesticidas y alimentos de animales.

La industria química consume cantidades importantes de caolín en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de aluminio, así como para la fabricación de zeolitas sintéticas. A partir del caolín calcinado se obtienen catalizadores y fibras de vidrio.

La industria farmacéutica utiliza caolín como elemento inerte en cosméticos y como elemento activo en absorbentes estomacales.

### **Las zeolitas y sus aplicaciones**

**Tamices moleculares:** Es obvio que si un gas o un líquido están compuestos por dos tipos de moléculas, unas más grandes que las otras, y si disponemos de una zeolita cuyos poros o ventanas tengan un tamaño intermedio entre las moléculas pequeñas y las grandes, sólo las primeras entrarán en la zeolita, mientras que las segundas seguirán su camino. Así se habrá separado un componente de otro: la zeolita actúa como un tamiz de moléculas.

Fué McBain quien informó esta propiedad y acuñó de paso el término *tamiz* (o malla) *molecular*, pero fue R.M. Barrer quien en los años 40, en Inglaterra, demostró por primera vez que las zeolitas se comportaban como mallas moleculares.

Con la síntesis de zeolitas en los 50's, las separaciones previamente demostradas en el laboratorio se trasladaron a las fábricas. Así la compañía Unión Carbide lanzó al mercado, a principios del año 1954, adsorbentes a base de zeolitas y, la División Linde, implantó su uso industrial para obtener argón de alta pureza. En efecto, la molécula de argón es ligeramente mayor que el oxígeno y no consigue entrar en la zeolita tipo 4A a baja temperatura. Otra de las primeras separaciones a nivel industrial fue la utilización de zeolita 4A para separar trazas de agua en la sustancia congelante de los refrigeradores caseros, aplicación que aún se mantiene.

En la figura II.12 se presenta los tamaños de poro de zeolitas naturales y sintéticas comparados con los diámetros cinéticos de algunas moléculas.

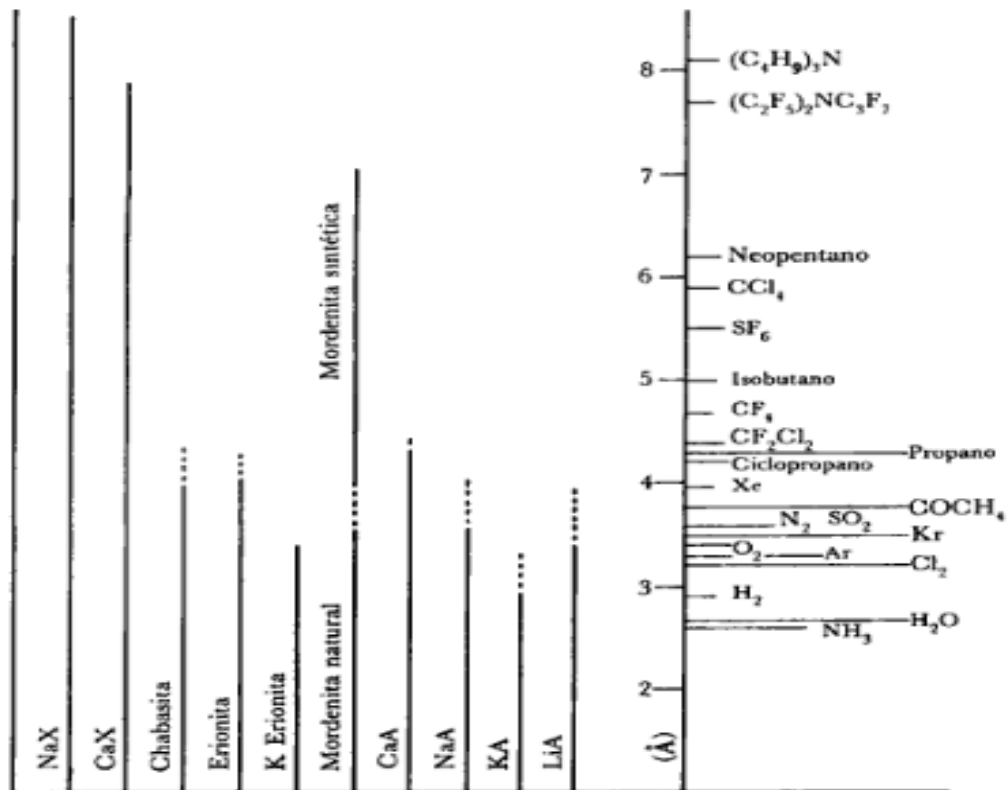


Figura II.12. Tamaños de poro de zeolitas naturales y sintéticas a (-) 77 K y (-) 420 K comparados con los diámetros cinéticos de algunas moléculas. <sup>[45]</sup>

Hoy se insiste con razón en que los términos zeolita y tamiz molecular no son realmente sinónimos. En realidad, para ser tamiz molecular no es necesario que el material sea un aluminosilicato cristalino con una red abierta que permita el intercambio de iones y una deshidratación reversible, como es el caso de la zeolita.

La temperatura debe tomarse en cuenta. En la figura II.12 se comprueba que el tamaño del poro aumenta notablemente entre 77 y 420 K. A temperatura normal, las pequeñas moléculas polares como las del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) no entran en las cavidades sodalitas de las zeolitas A y (X,Y). Sin embargo, el agua ocupa esos huecos a temperatura ambiente. Se ha comprobado que al elevarse la temperatura, el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) se difunde muy lentamente en las cavidades de las zeolitas X y Y.

Así, una zeolita en la que los sodios son intercambiados por potasios disminuye su ventana a un valor de 3 Å en efecto, el ion  $\text{K}^+$  es mayor que el ion  $\text{Na}^+$  y por lo tanto estorba la entrada del poro. Análogamente es posible sustituir los sodios por calcio. El radio iónico del  $\text{Ca}^{++}$  y del  $\text{Na}^+$  es aproximadamente el mismo, pero como sólo se necesita un  $\text{Ca}^{++}$  por cada dos  $\text{Na}^+$  para balancear las cargas de la estructura zeolítica, entonces la abertura del poro está más libre y aumentada.

En la figura II.13 se dan los diámetros cinéticos en angstroms de algunas moléculas y el tamaño de las ventanas de algunas zeolitas. Estos valores no deben tomarse al pie de la letra, ya que el “tamaño” de las moléculas varía dependiendo del método usado para calcularlo. Así mismo se ilustra la forma de algunas moléculas sencillas y el diámetro cinético correspondiente.

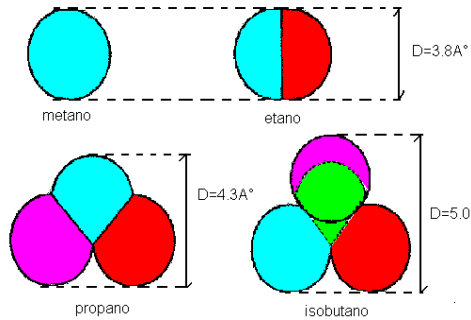


Figura II.13. Forma de algunas moléculas sencillas, D es el diámetro cinético correspondiente.<sup>[45]</sup>

**Secado de gases:** En procesos de refinación del petróleo, el tipo de zeolita a elegir para eliminar agua del hidrocarburo en la producción de etileno, lo primero que se necesita es la información sobre el diámetro cinético del agua y el etileno: 2.65 y 3.9 Å, respectivamente. Por lo tanto, la zeolita A debe tener una abertura de poro alrededor de 2.65 Å. Del análisis de la figura II.13, la zeolita A intercambiada con  $K^+$  cumple con este requisito pues permite la entrada del agua pero no acepta al etileno por tener un tamaño mucho mayor. El problema ha sido resuelto pero queda la duda de por qué la mayoría de los gases industriales se deshidratan y cómo se regeneran las zeolitas llenas de agua en sus cavidades.

La respuesta es simple: el agua a baja temperatura forma hidratos que ocasionan taponamientos en las tuberías, es corrosiva y en procesos petroquímicos catalíticos suele ser veneno para los mismos o promueve reacciones laterales indeseables. Por otra parte, un método usual de regeneración consiste en calentar directamente el reactor que contiene la zeolita A impregnada de agua, entre 200 y 300°C. En la figura II.14, se muestra la capacidad de adsorción del agua de la zeolita A.

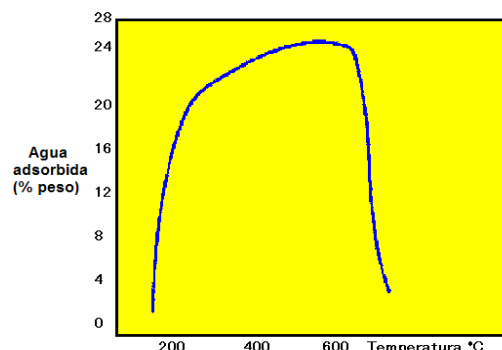


Figura II.14. Capacidad de adsorción de agua de la zeolita A en función de la temperatura de calentamiento.<sup>[45]</sup>

Una de las propiedades más importantes de las zeolitas, que las hace de uso obligado en muchos procesos de deshidratación, es su gran estabilidad térmica y el aumento de su capacidad de adsorción con la temperatura. Para el caso de la zeolita A, se observa que su capacidad de adsorción de agua aumenta sustancialmente al calentarse a 300°C, permanece casi constante hasta los 600°C y decae bruscamente a temperatura más elevada.

**Separación de hidrocarburos:** Si es posible separar moléculas en función de su tamaño usando una zeolita de diámetro apropiado, ¿por qué no intentar separaciones más sutiles?, intuimos que además del tamaño, la forma es característica de las moléculas. Existen moléculas que difieren una de otra sólo por su estructura, aunque la composición sea la misma.

Por ejemplo, el butano tiene como fórmula  $C_4H_{10}$ , o sea que está compuesto por cuatro carbonos y diez hidrógenos que pueden no obstante disponerse en el espacio de dos formas diferentes. El compuesto lineal es llamado butano normal o  $n-C_4H_{10}$  y el ramificado es el isobutano,  $i-C_4H_{10}$ . Se dice que el isobutano y el  $n$ -butano son isómeros. Si el diámetro de poro de la zeolita es exactamente el “ancho” del  $n$ -butano, sólo este compuesto podrá entrar, como si fuera una enorme oruga, mientras que el isobutano, que parece un auto con su antena, no podrá hacerlo. El  $n$ -butano tiene un diámetro cinético de 4.3 Å, mientras que el  $i-C_4H_{10}$  lo tiene de 5 Å. La zeolita indicada entonces en este caso es el Ca-A, ver figura II.15.



Figura II.15. El butano ( $C_4H_{10}$ ) puede ser: (a) butano normal ( $n-C_4H_{10}$ ) o (b) isobutano ( $i-C_4H_{10}$ ).<sup>[45]</sup>

Existen en la actualidad una miriada de procesos que emplean zeolitas para separación y secado de hidrocarburos, estimándose que sólo en EE.UU este rubro representa un consumo anual de 18000 toneladas. En nuestro país, hasta la fecha estos materiales son importados, estimándose un consumo anual de unas 300 toneladas.

**Las zeolitas y los detergentes:** Las zeolitas tienen la propiedad de intercambiar los cationes que mantienen la neutralidad del sistema. Pues bien, esta capacidad del sólido ha permitido cambiar la fórmula de los detergentes de uso común. En EE.UU, del total de la producción de zeolitas, las que se destinan a este uso representan el 81% del total fabricado ¿Qué hacen las zeolitas en las lavadoras?



Como sabemos, los detergentes contienen ingredientes que neutralizan los iones calcio y magnesio presentes en el agua. Tradicionalmente existían en el mercado dos tipos de sustancias que eliminaban los compuestos solubles de esos elementos: los tripolifosfatos (TPF) y el carbonato de sodio. Sin embargo, los fosfatos en particular fueron atacados por los ecologistas quienes atribuyen a estos compuestos efectos nocivos irreversibles en lagos y ríos. El carbonato de sodio presenta la desventaja de que es poco eficiente para eliminar al magnesio presente en el agua debido a que el carbonato de magnesio formado es bastante soluble en solución acuosa. Por lo anterior, las compañías fabricantes de detergentes enfocaron sus estudios hacia los usos potenciales de las zeolitas, en particular la zeolita A.

La eficiencia de un detergente, dicen los especialistas en la materia, está determinada en buena medida por la velocidad con la cual se eliminan los iones en los primeros minutos de la etapa de lavado. En la figura II.16 se muestran resultados de la eliminación del calcio en los tres compuestos que hemos mencionado. Se puede comprobar que efectivamente el TPF elimina más rápidamente al calcio, seguido de la zeolita A y por último del carbonato.

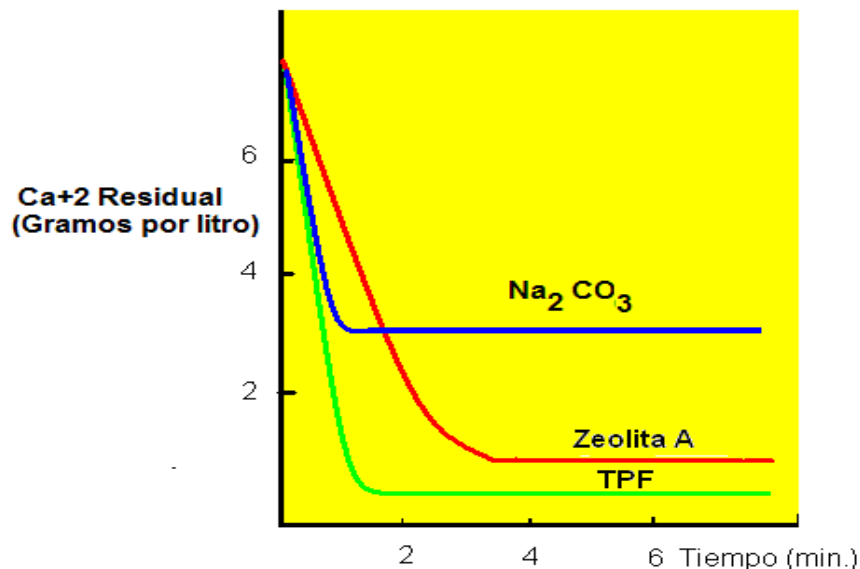


Figura II.16. Velocidad de eliminación de calcio en agua de lavado.<sup>[45]</sup>

En la figura II.17 se presentan resultados de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  remanentes como compuestos solubles a los diez minutos de intercambio, esta vez en función de la concentración de zeolita añadida en la solución. Como se observa, el magnesio no se intercambia apreciablemente con la zeolita durante el ciclo de lavado. Lo anterior es debido en parte a un fenómeno cinético: el intercambio es lento debido a que el ion magnesio hidratado se difunde, por su tamaño, lentamente al interior de la zeolita. La otra causa es que el intercambio de sodio por magnesio es termodinámicamente menos favorable que el de sodio por calcio.

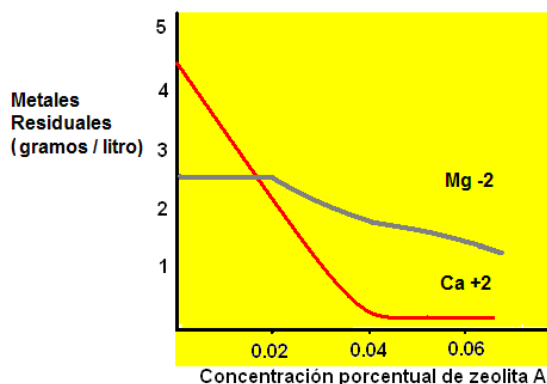


Figura II.17. Cantidad de Ca<sup>++</sup> y Mg<sup>++</sup> residual a los 10 minutos de operación en función de la cantidad de zeolita añadida.<sup>[45]</sup>

Si bien la zeolita A no pudo sustituir totalmente a los fosfatos, sí permitió lograr una reducción sustancial de la concentración de estos últimos en las fórmulas, con la ventaja adicional de que la zeolita se elimina fácilmente por los procesos convencionales de tratamiento de aguas, además de que no se ha comprobado que su presencia ocasione trastornos a los animales de lagos y ríos.

**Catálisis y selectividad de forma:** Hasta ahora nos hemos referido a las aplicaciones de las zeolitas, como la zeolita A, cuyas aberturas son circulares, pero en otros casos pueden ser elípticas, como el caso de la chabasita o heroinita, lo que produce sutiles diferencias en la selección de moléculas, diferencias debidas a un factor de forma. La distorsión de la red aluminosilicato es también un factor importante. Al deshidratarse la chabasita intercambiada con calcio, se distorsiona, y aberturas que eran esencialmente circulares de 3.9 Å de diámetro se transforman en elipsoidales de 3.7 X 4.2 Å.

Se tratará de demostrar que la selectividad debido a la forma de las moléculas desempeña un papel de suma importancia en varias reacciones de hidrocarburos con zeolitas. La ZSM-5 es una zeolita que por su estructura particular tiene una selectividad de forma capaz de discernir diferencias muy pequeñas entre un grupo de moléculas, distinción que para otras zeolitas sería imposible. Presenta canales interconectados más o menos elípticos y con aberturas de 5.3 a 6 Å, o sea que difiere de las zeolitas de poros grandes como las faujasitas o la mordenita así como las de poro pequeño como la heroinita o la zeolita A.

Se puede decir, a manera de resumen, que la selectividad de forma de la ZSM-5 combina dos tipos de efectos: a) el primero relacionado con restricciones estéricas en los sitios activos y b) el segundo debido a la presencia de caminos difusionales preferenciales (que son los canales elípticos y lineales para hidrocarburos aromáticos e isoparafinas, (figura II.20), o los canales en zig-zag, casi circulares (para las moléculas de reactivos más ligeros).

Estructuras típicas de diversos hidrocarburos del petróleo, se presentan en la figura II.18.

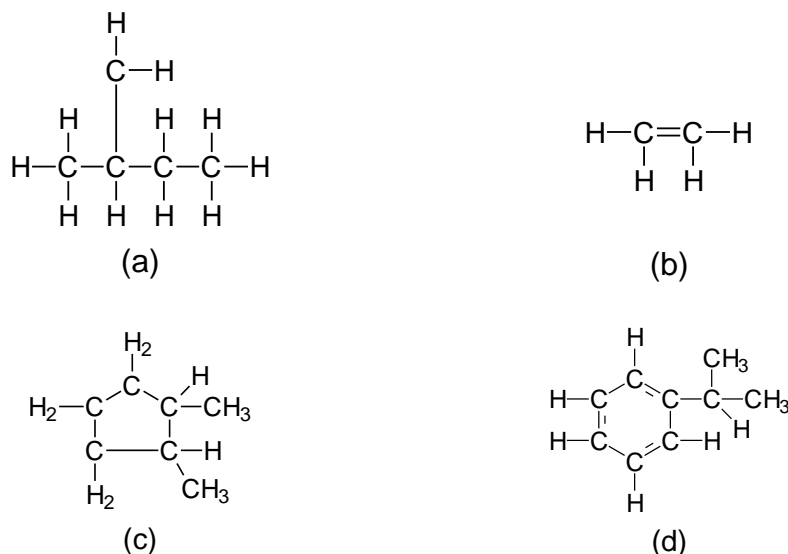


Figura II.18. Hidrocarburos del petróleo: (a) parafina; (b) olefina; (c) nafteno; (d) aromático.<sup>[45]</sup>

Aquí es necesario abrir un paréntesis para explicar brevemente algunos conceptos de nomenclatura de sustancias químicas, ya que de ellas hablaremos a menudo. Existen esencialmente cuatro tipos de hidrocarburos: parafinas, olefinas, naftenos y aromáticos.

1. Parafinas: están compuestas de átomos de carbono conectados por enlaces sencillos, como ya lo vimos cuando hablamos del butano y del isobutano; las parafinas pueden ser lineales o ramificadas.
2. Olefinas: son hidrocarburos cuya cadena abierta contiene un enlace doble (fórmula  $C_nH_{2n}$ ).
3. Naftenos: son simplemente parafinas cíclicas.
4. Aromáticos: están constituidos por una unidad básica que es el anillo de benceno que contiene tres enlaces dobles.

Bien, decíamos que las propiedades expuestas de la zeolita ZSM-5 son una manifestación de la porosidad intracristalina de las zeolitas. El área externa de los cristales es de alrededor de 1% del área superficial equivalente. Tenemos entonces un sólido cuya relación área/volumen es enorme, constituido por túneles tapizados de oxígenos en los cuales los sitios iónicos de aluminio retienen agua.

Por lo tanto, en toda área de la química que se necesite la intervención de una superficie que favorezca la reacción, las zeolitas serán materiales de gran interés.

Esa rama de la química se conoce como “catálisis” y las propiedades catalíticas de las zeolitas son conocidas por todo químico.

Un catalizador es una sustancia que modifica y, muy particularmente, acelera una reacción química, “solamente con su presencia” (actividad catalítica), es decir, que el catalizador se encuentra al final de la reacción idéntico a sí mismo. Dado que cualquier reacción termodinámicamente posible puede ocurrir en un cierto grado a una temperatura elevada, se deduce que el propósito de usar catalizadores es el de proveer la selectividad pertinente para dirigir la transformación por un camino deseado.

Los efectos catalíticos de las zeolitas en algunas reacciones. Poca magia hay en hechos tan insólitos como la transformación del alcohol en gasolina, o bien la obtención de petroquímicos útiles a partir del petróleo; por qué en un caso y en otro son necesarias las zeolitas y, como se trata de la acción de una superficie, empecemos con lo más sencillo: una superficie plana.

En la figura II.18 se ilustra cómo los átomos de la superficie de un cristal se encuentran dispuestos de manera distinta a la de sus vecinos. En efecto, el entorno de los átomos pertenecientes al volumen del sólido es distinto del de los átomos de la superficie. Los del volumen están totalmente rodeados por átomos vecinos y alcanzan el equilibrio eléctrico, al contrario de los de la superficie que, para tender a ese equilibrio, se relajan.

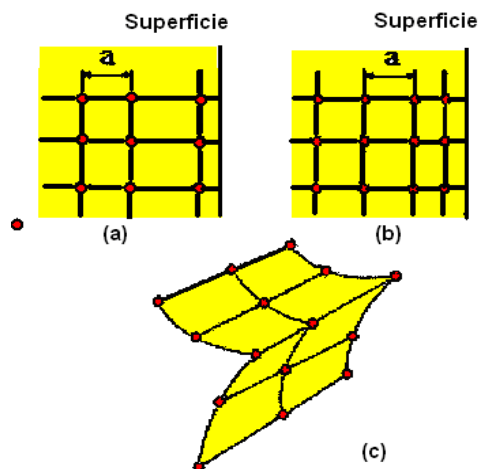


Figura II.19. Diferencia entre los átomos de una superficie y los átomos del volumen de un cristal. En (a) se representa una relajación debida a la interrupción súbita del material, en (b) una contracción y en (c) una relajación tangencial.<sup>[45]</sup>

Por lo que se muestra en la figura II.19, hay entonces en la superficie un desequilibrio que propicia la adsorción de otras moléculas, o sea que los átomos de la superficie retienen moléculas de gas o de sustancias en solución; de hecho está *adsorbida* en la red aluminosilicato de la zeolita. Desde luego, cualquier imperfección en esa superficie altera sus propiedades adsorbentes.

Las imperfecciones pueden ser estructurales (ventanas, túneles, cavidades) o químicas (presencia de otros iones, como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ , etc.). Sin embargo, el descubrimiento de una actividad catalítica asociada con el interior de los aluminosilicatos ha liberado al químico de esta preocupación. Por ejemplo, las zeolitas **X** o **Y** poseen tal estructura que sus espacios intracristalinos permiten la difusión de las moléculas voluminosas. La interfase entre esas moléculas y la zeolita **Y** no es el final abrupto de una estructura sólida tridimensional.<sup>[46]</sup>

## II.5. Adsorbedor y soporte seleccionados<sup>[46,47]</sup>

De una manera general la metodología que se siguió, se representan en la figura II.20.



Figura II.20. Metodología para la selección del adsorbente y soporte.

La zeolita del tipo faujasita es el material adsorbedor, debido a la estructura cúbica constituida por celdas elementales de cerca de 192 tetraedros  $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$ , lo cual le da estabilidad y rigidez a la estructura. De hecho, son las zeolitas más “huecas” de todas pues cerca del 50% del volumen de los cristales deshidratados de las zeolitas faujasitas es espacio vacío. Ese espacio es el que se llena de agua cuando la zeolita se encuentra al aire. Como soporte carbón activado, y el principio del adsorbedor está fundado de la siguiente manera:

Se hizo una caja de lámina de aluminio de  $1\text{ft}^3$  de dimensión, en las partes laterales se utilizó una malla  $300\text{ cm/plg}^2$ , la cual se rellenó hasta el 90% de zeolita faujasita.

La malla se coloca en la parte frontal y laterales con la finalidad de que circule el aire por ella a presión atmosférica (figura II.21).

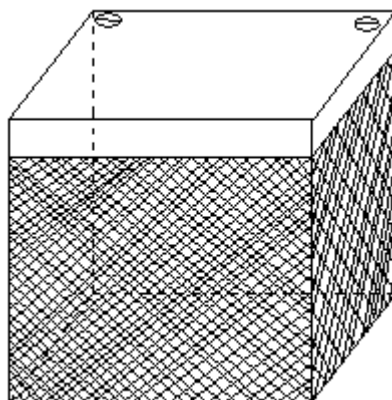


Figura II.21. Diseño del soporte para la zeolita faujasita

De los valores obtenidos tanto del adsorbedor de zeolita faujasita y montmorillonita, se graficaron los datos horas vs ppm (figura II.22).

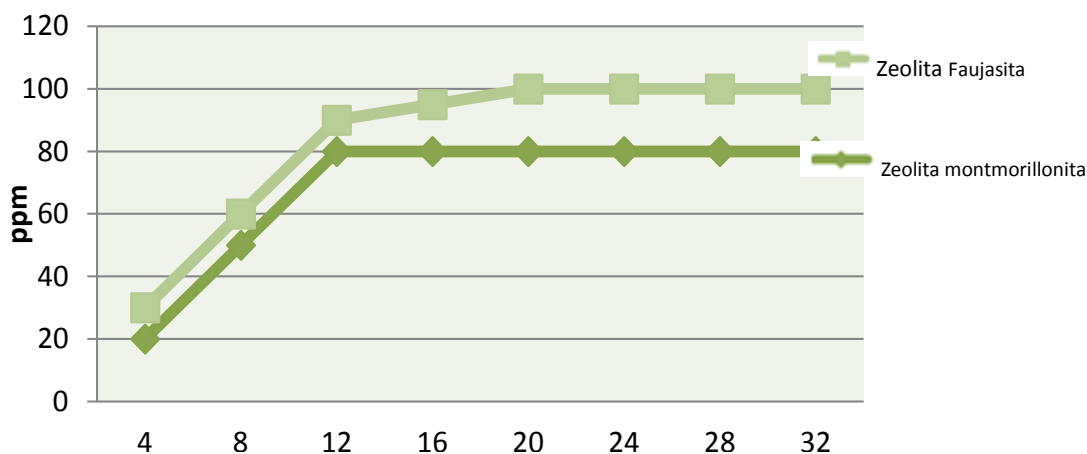


Figura II.22. Horas vs. ppm del adsorbedor de faujasita

Como puede observarse en la figura anterior la mayor cantidad de adsorción corresponde a la zeolita faujasita en un 20% más que la zeolita montmorillonita. Las dos curvas se vuelven asintóticas, lo que demuestra que los contaminantes son limitados y permanecen constantes en el adsorbedor.

# **CAPÍTULO III**

## **DISEÑO DEL ADSORBEDOR**

### **III.1 Principio de adsorción <sup>[48]</sup>**

La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como fuerzas de Van der Waals.

Los experimentos sobre adsorción, que con más frecuencia se realizan, consisten en la medida de la relación de la cantidad de gas o líquido adsorbido, sobre una determinada cantidad de adsorbente. Estas determinaciones se realizan a temperatura constante y los resultados se representan gráficamente en las isotermas de adsorción. Lo que se mide experimentalmente es el volumen del líquido o gas adsorbido por una cantidad de adsorbente, o la variación del peso que experimenta el adsorbente cuando ha estado en contacto con el adsorbato. Esta experimentación llamada “isotermas de adsorción” tiene como objetivos:

1. Estudiar la adsorción sobre zeolita faujasita (X,Y), de un soluto en disolución acuosa.
2. Determinar la relación existente de ácido acético adsorbido por la zeolita faujasita (X,Y) y la concentración de equilibrio del ácido acético en la fase acuosa
3. Determinar el área superficial de la zeolita faujasita (X,Y) aplicando las isotermas de Freundlich, Langmuir y Brunauer-Emmett-Teller (BET).

Las ecuaciones para el cambio iónico tienen en cuenta todos los iones que compiten por los lugares de intercambio.

Para cumplir con los objetivos previamente expuestos, se realizó la parte experimental “Determinación de la isoterma de adsorción”, de la cual se obtuvieron los datos y valores correspondientes para la realización de las gráficas de  **$C/X$  vs  $C$ ,  $\log V$  vs  $\log C$  y  $1/C$  vs  $1/V$ .**

**Donde:**

**$C/X$** = Relación de concentración del ácido acético y conversión en el tiempo dado.

**$C$** = Concentración del ácido acético.

**$X$** = Conversión en el tiempo dado.

**$\log V$** = Logaritmo del volumen de hidróxido de sodio al 0.4M, valores que se utilizan para la gráfica de Langmuir.

**$\log C$** = Logaritmo de la concentración del ácido acético.

**$V$** = Volumen del hidróxido de sodio al 0.4M.

**$1/V$** = Inverso del volumen de hidróxido de sodio al 0.4M.

**$1/C$** = Inverso de la concentración.



### Procesos de adsorción <sup>[49]</sup>

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae material de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase, generalmente sólida; por ello se considera como un fenómeno subsuperficial.

La sustancia que se concentra en la superficie que adsorbe se llama adsorbato y la superficie que la adsorbe se llama adsorbente.

Por el contrario, la absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una solución con esta segunda (figura III.1).

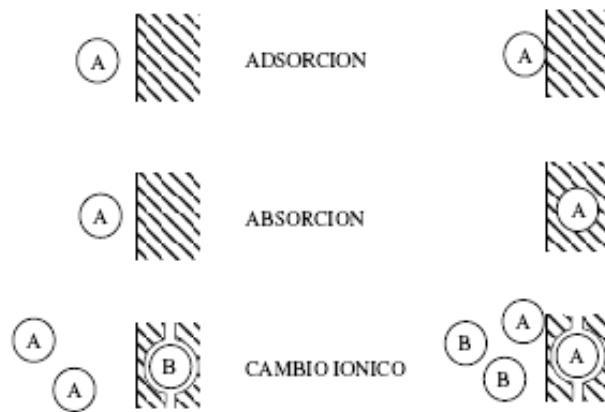


Figura III.1. Diferentes procesos <sup>[49]</sup>

En la figura III.2 se puede observar una representación esquemática de cómo se lleva a cabo el proceso de adsorción.

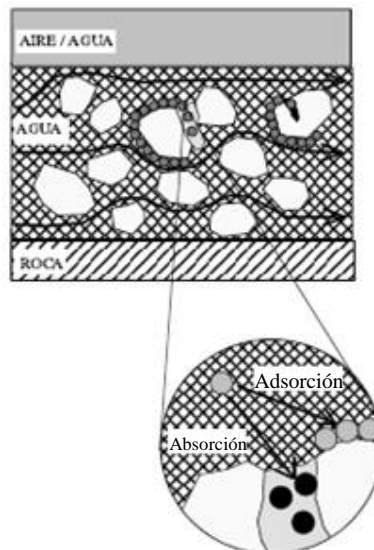


Figura III.2 Representación esquemática del proceso de adsorción. <sup>[49]</sup>

El proceso de cambio iónico supone un intercambio de una sustancia o ión por otro sobre la superficie del sólido.

En la figura III.2, se observan el término sorción que incluye la adsorción y la absorción, siendo una expresión general para un proceso en el cual un componente se mueve desde una fase para acumularse en otra, principalmente en los casos en que la segunda fase es sólida. La principal distinción entre sorción (adsorción y absorción) y cambio iónico, es que las ecuaciones que describen la sorción consideran solamente una especie química, de manera que la distribución del soluto entre la disolución y el sólido responde a una relación simple, lineal o no lineal.

En general, la adsorción desde una disolución a un sólido ocurre como consecuencia del carácter liofóbico (no afinidad) del soluto respecto al disolvente particular, o debido a una afinidad elevada del soluto por el sólido o por la acción combinada de estas dos fuerzas.

El grado de solubilidad de una sustancia disuelta es el factor más importante para determinar la intensidad de las fuerzas impulsoras. Cuanta mayor atracción tiene una sustancia por el disolvente menos posibilidad tiene de trasladarse a la interfase para ser adsorbida.

La sorción y el cambio iónico son procesos de gran interés en hidrogeoquímica ya que regulan de manera notable el transporte de contaminantes químicos en acuíferos y suelos.

### **Tipos de adsorción <sup>[49]</sup>**

Cabe distinguir tres tipos de adsorción según la atracción entre el soluto y el adsorbente sea de tipo eléctrico, de Van der Waals o de naturaleza química.

La adsorción del primer tipo cae de lleno dentro del intercambio iónico y a menudo se le llama adsorción por intercambio, que es un proceso mediante el cual los iones de una sustancia se concentran en una superficie como resultado de la atracción electrostática en los lugares cargados de la superficie. Para dos adsorbatos iónicos posibles, a igualdad de otros factores, la carga del ión es el factor determinante en la adsorción de intercambio. Para iones de igual carga, el tamaño molecular (radio de solvatación) determina el orden de preferencia para la adsorción.

La adsorción que tiene lugar debido a las fuerzas de Van der Waals se llama generalmente adsorción física. En estos casos, la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre de trasladarse dentro de la interfase. Esta adsorción, en general, predomina a temperaturas bajas. La adsorción de la mayoría de las sustancias orgánicas en el agua con carbón activado se considera de naturaleza física.

Si el adsorbato sufre una interacción química con el adsorbente, el fenómeno se llama adsorción química, adsorción activa o quimisorción. Las energías de adsorción son elevadas, del orden de las de un enlace químico, debido a que el adsorbato forma enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente, esta adsorción suele ser favorecida a una temperatura elevada.

La mayor parte de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las tres formas de adsorción, y de hecho, no es fácil distinguir entre adsorción física y química.

### **III.2 Desarrollo experimental. Obtención del adsorbedor zeolita faujasita<sup>[50,51]</sup>**

De las investigaciones realizadas acerca de los contaminantes atmosféricos nocivos para la salud de los seres vivos, se realizó la selección de los materiales adsorbentes como son las arcillas.

Las arcillas o zeolitas comprenden todos aquellos sedimentos o minerales naturales, con tamaño de partícula inferior a 2  $\mu\text{m}$ ; generalmente las arcillas se presentan en forma de roca o polvos blancos, en ocasiones presentan un ligero color rojo, rosa o amarillo con propiedades tixotrópicas y plasticidad. Las arcillas sintéticas deben de prepararse por cualquier proceso que asegure un gran desarrollo superficial mediante una adecuada porosidad. Los adsorbentes naturales arcillas o zeolitas tienen mayor superficie específica, pudiendo llegar a tener entre 1000 y 1500  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Otras características importantes que debe de reunir un buen material adsorbente son las siguientes:

- Debe tener alta capacidad de adsorción. La relación de equilibrio entre las fases influye en la eficacia con la que se alcanza la capacidad final, y en muchos casos, se controla la capacidad real del soluto.

Los mecanismos de unión son muy complejos no se han determinado con precisión aún, no se dispone de una norma satisfactoria mediante la cual puedan preverse:

- Las afinidades relativas entre un material poroso y una sustancia.
- Propiedades físicas y tamaño de partícula adecuados para garantizar la resistencia mecánica y facilidad de manejo, produciendo la menor pérdida de carga posible tanto en lechos fijos como en los móviles o fluidizados.
- Precio bajo, tanto de la materia prima como del proceso de fabricación.
- Fácil regeneración; por desorción especialmente en el caso de los procesos continuos.

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

**Materiales**

Para la selección del adsorbedor a utilizar como medio de purificación del aire de los interiores de casa habitación, oficinas industriales, públicas y laboratorios industriales, se analizó el volumen de poro de las zeolitas y de acuerdo a la tabla III.1.

Tabla III.1 Tipos de zeolitas<sup>[45]</sup>

	<b>Composición</b>	<b>Volumen de poro*</b>
<b>Grupo de las analcimas</b>		
Analcimas	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Wairakita	$\text{Ca}_8 (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Leucita	$\text{K}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$	0
<b>Grupo de las natrolitas</b>		
Natrolita	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.21
Edingtonita	$\text{Ba}_2 (\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}) 6\text{H}_2\text{O}$	0.35
Thomsonita	$\text{Na}_4\text{Ca}_8 (\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.32
<b>Grupo de las filipsitas</b>		
Filipsita	$(\text{K},\text{Na})_5 (\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}) 10\text{H}_2\text{O}$	0.30
Garronita	$\text{NaCa}_{2.5} (\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) 14\text{H}_2\text{O}$	0.41
Gismondina	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.47
<b>Grupo de las heulanditas</b>		
Heulandita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.35
Clinoptilolita	$\text{Na}_6 (\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.34
Estilbita	$\text{Na}_2\text{Ca}_4 (\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}) 32\text{H}_2\text{O}$	0.38
<b>Grupo de las mordenitas</b>		
Mordenita	$\text{Na}_8 (\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.26
Ferrierita	$\text{Na}_{1.5}\text{Mg}_2 (\text{Al}_{5.5}\text{Si}_{30.5}\text{O}_{72}) 18\text{H}_2\text{O}$	0.24
Epistilbita	$\text{Ca}_3 (\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.34
<b>Grupo de las chabasitas</b>		
Chabasita	$\text{Ca}_2 (\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}) 13\text{H}_2\text{O}$	0.48
Erionita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Na},\text{K})_{4.5} (\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 18\text{H}_2\text{O}$	0.36
Zeolita L	$\text{K}_6\text{Na}_3 (\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 21\text{H}_2\text{O}$	0.28
<b>Grupo de las faujasitas</b>		
Faujasitas (X,Y)	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11} (\text{Al}_{59}\text{Si}_{133}\text{O}_{384}) 26\text{H}_2\text{O}$	<b>0.53</b>
Zeolita A	$\text{Na}_{12} (\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}) 27\text{H}_2\text{O}$	0.47
Zeolita ZK-5	$\text{Na}_{30} (\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}) 98\text{H}_2\text{O}$	0.45
<b>Grupo de las laumontitas</b>		
Laumontita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.35
Yugawaralita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{20}\text{O}_{56}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.30
<b>Grupo de las pentasil</b>		
Zeolita ZSM-5 } Zeolita ZSM-11 }	$\text{Na}_n (\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.32

\*  $\text{cm}^3$  de agua/ $\text{cm}^3$  de cristal

Se seleccionó la zeolita del grupo de las faujasitas la (X,Y), puesto que presentan una mayor superficie específica, dado su mayor volumen de poro, y tomando en consideración que el fenómeno de adsorción está en función del área superficial.

### **Obtención de la zeolita (faujasita X, Y) [52,53,54,55]**

De acuerdo a la investigación los costos de las zeolitas y su origen de suministro, resulta elevado el costo por kilogramo de esta zeolita y solamente se puede conseguir a nivel internacional por tonelada, por lo que se optó en este proyecto activar la zeolita en el laboratorio, partiendo de sus componentes que la integran o bien, llevando el proceso a altas temperaturas entre 300 y 350°C para faujasita (X, Y).

El proceso que se desarrolló en el laboratorio fue el siguiente:

- Se utilizó hidróxido de sodio al 55%
- Se utilizó aluminato de sodio y silicato de sodio de alta pureza en soluciones típicas transparentes y fluidas

### **Procedimiento**

Se adicionó al aluminato de sodio el hidróxido de sodio muy lentamente, a goteo, resultando una solución clara pero a medida que se fue adicionando el silicato, la solución resultante se volvió turbia, gelatinosa y viscosa, es decir se formó un gel, lo que en química se conoce como un gel de polimerización o polimerizado hidratado; la composición y estructura del gel están controladas por el tamaño y la estructura de las especies que se polimerizan, por diferencias en la composición química y el peso molecular de las especies iniciales en las soluciones de silicatos, que conducen a diferencias en el gel y por lo tanto a diferencias mayores en las fases zeolíticas producidas.

Los geles típicos se preparan a partir del aluminato de sodio, silicatos de sodio e hidróxido de sodio, porque todos son solubles. Durante la cristalización del gel, los iones de sodio y los componentes aluminato y silicato se acomodan paulatinamente y tienden a la estructura ordenada de un cristal, lo cual se debe a la depolimerización del gel por la presencia de los iones hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) en la mezcla reactiva.

Viene entonces la formación de núcleos, que son pequeños cristales que a su vez sirven de base para que se formen los cristales grandes de zeolitas. Estos núcleos, como en cualquier proceso de este tipo, crecen durante el tiempo de cristalización; como en los geles super saturados se forma un gran número de núcleos cristalinos, y el producto final consiste en un polvo finamente dividido en pequeños cristales usualmente de unas micras.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

En la figura III.3 se presenta el equipo de procesamiento de la zeolita faujasita (X, Y), y los tres tipos de agitación dependiendo de la ubicación del impulsor:

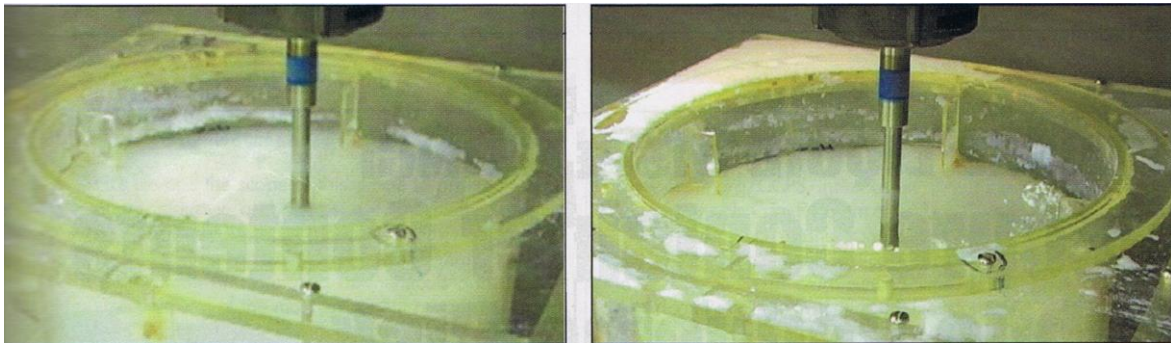
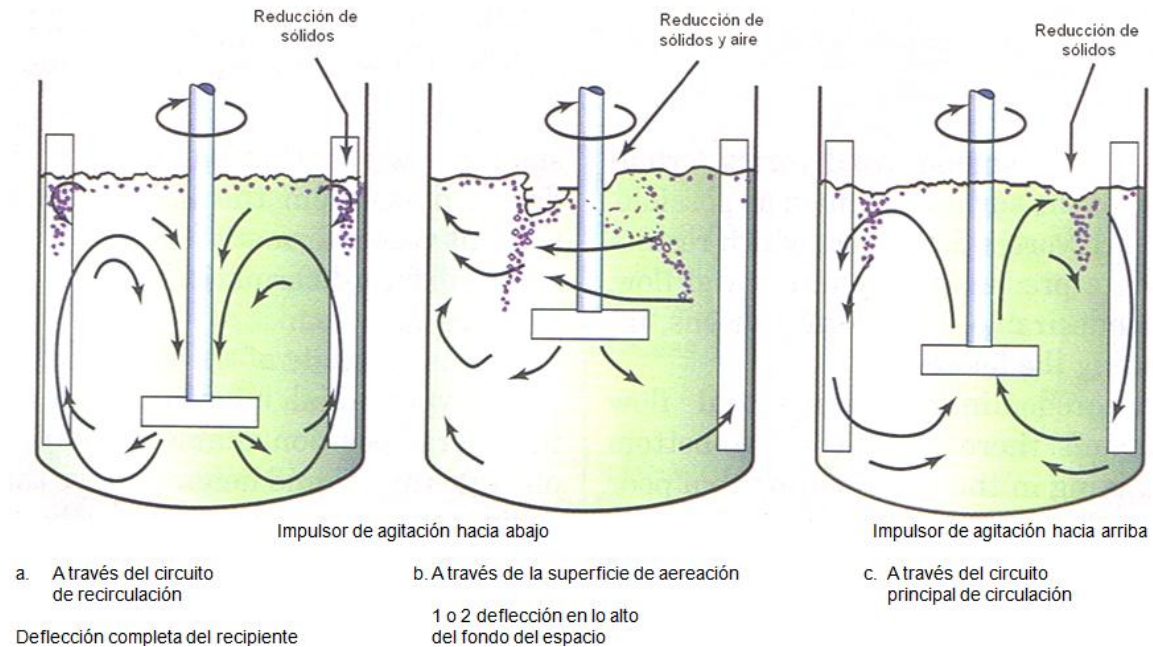


Figura III.3. Equipo de procesamiento de la zeolita faujasita X y Y y tipos de agitación dependiendo de la ubicación del impulsor.<sup>[56,57]</sup>

En la figura III.4 se presenta un diagrama de bloques del proceso de obtención de la zeolita.

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

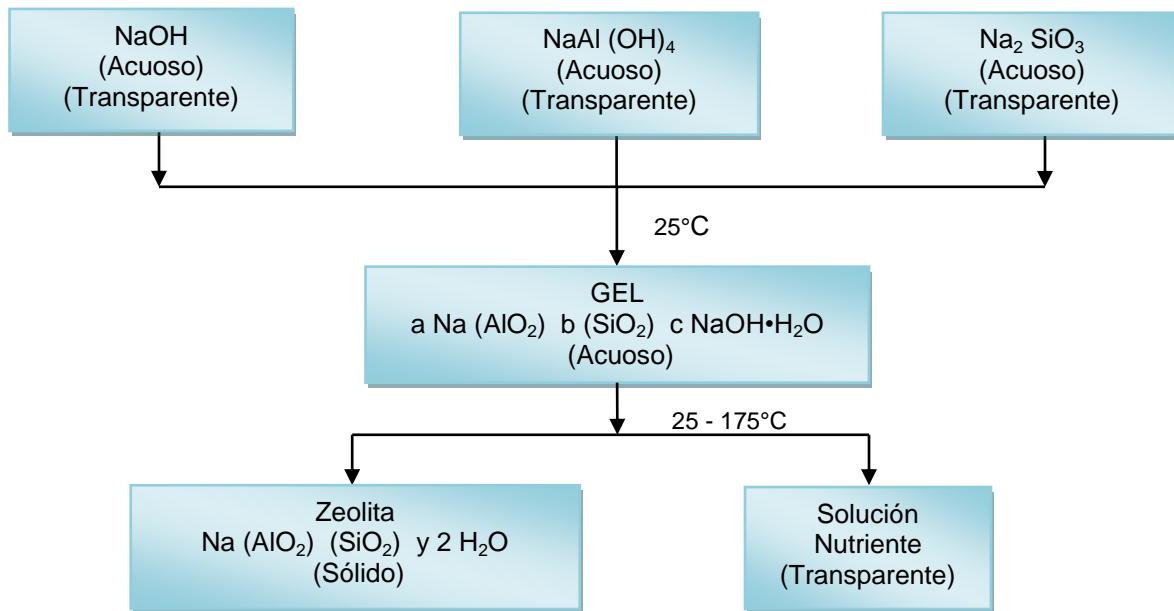


Figura III.4. Diagrama de bloques del proceso de obtención de zeolitas<sup>[45]</sup>

La resina resultante en este proceso fue activada entre 300 y 350°C posteriormente fue empacada en el equipo adsorbedor para llevar a cabo la investigación de su actividad de fisorción y con estos resultados se hace todo el desarrollo de la teoría Langmuir, ver figura III.5.

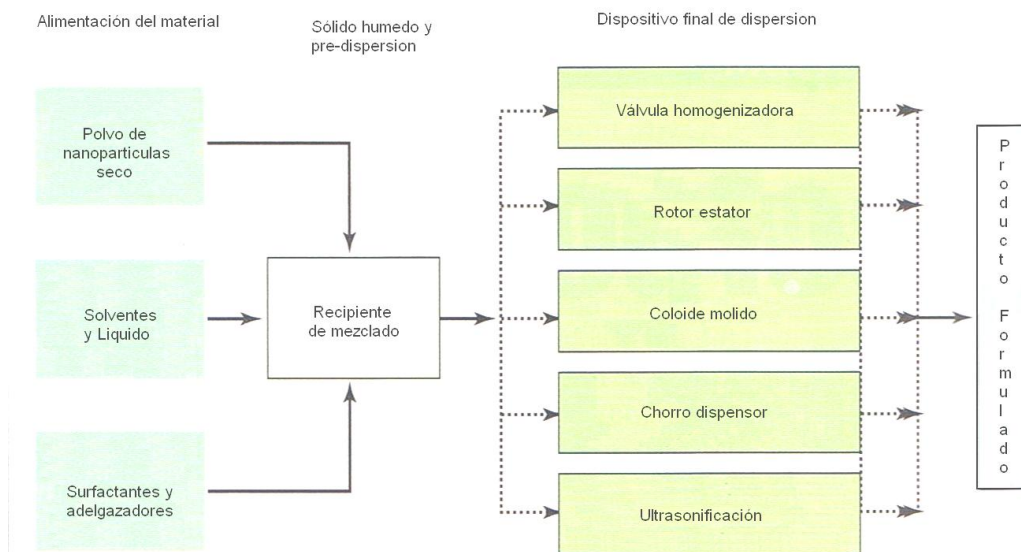


Figura III.5. Diagrama de bloques para la obtención de zeolita faujasita.<sup>[47]</sup>

### **Tipos de poros dentro de las partículas porosas<sup>[58]</sup>**

La clasificación de los poros es de acuerdo a la IUPAC (International Unión de Pure and Applied Chemits) que se basa en el diámetro de los mismos de acuerdo a lo siguiente:

Microporos:	menores a 2	$\mu\text{m}$
Mesoporos:	entre 2 y 50	$\mu\text{m}$
Macroporos:	mayores de 50	$\mu\text{m}$

### **Propiedades y condiciones que afectan la adsorción en un material poroso.<sup>[59]</sup>**

En el caso de que se requiera retener moléculas pequeñas que corresponden a compuestos muy volátiles como los componentes del *smog* es necesario preparar materiales microporosos.

La capacidad de un material poroso para retener una sustancia determinada, no solo está dada por su área superficial, sino por la proporción de poros cuyo tamaño es el adecuado, una a cinco veces el diámetro de la molécula de dicha sustancia

Superficie específica o área superficial de una zeolita se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes por unidad de masa, expresada en  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Las zeolitas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción: sólido – sorbato depende directamente de esta propiedad.

Considerando como material de partida la zeolita faujasita (X,Y)  $60\text{m}^2/\text{g}$ , que está formada por una gran variedad de tamaños de poros, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en poros de adsorción y poros de transporte.

Los primeros consisten en espacios entre placas gráficas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En estos, ambas placas de la zeolita están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza.

Los poros mayores que los de adsorción son los de transporte y tienen un intervalo muy amplio de tamaños, que van hasta el poro de las grietas que están en el límite detectable por la vista y que corresponden a  $0.1 \mu\text{m}$ ; en esta clase de poros, solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hacen con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo; actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en las que hay una atracción mayor.



Por lo tanto, aunque tienen poca influencia en la capacidad de la zeolita faujasita (X,Y), afectan a la cinética ó velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción.

### **III.3 Investigación de la actividad adsorbedora<sup>[60]</sup>**

La actividad adsorbedora se hace sobre zeolita faujasita (X,Y) de un soluto en disolución acuosa, la adsorción en la fase líquida es el resultado de dos fenómenos uno es la adsorción física y la otra la química. La ecuación de Freundlich es útil para predecir el comportamiento de la zeolita en la mayoría de las aplicaciones en la fase líquida, por ello, su gran importancia; cabe aclarar que la isoterma será solo aplicable a las condiciones bajo las cuales se realizó la adsorción, por lo que es preciso:

- Determinar la relación existente de ácido acético adsorbido por zeolita faujasita (X,Y) y la concentración de equilibrio del ácido en la fase acuosa.
- La presencia de carbón activado, se debe a que este se trató con hidróxido de sodio y su reacción con el ácido acético, el sistema solo fue para determinar la cantidad de hidróxido de sodio en el carbón y fue una tentativa para calcular las isotermas de Freundlich y Langmuir, únicamente.

Dado que la mayor parte de los sólidos que se utilizan en los estudios de adsorción son porosos, no será posible medir directamente esta área y por ello se recurre a la isoterma B.E.T. En la tabla III.2 se muestran los materiales y reactivos para la determinación de la isoterma de adsorción.<sup>[61]</sup>

Tabla III.2. Materiales y reactivos para la determinación de la isoterma de adsorción

Materiales	Reactivos
3 Buretas	Agua destilada
9 Matraces Erlenmeyers de 250 mL	
6 Embudos de filtración	Ácido acético glacial, CH <sub>3</sub> COOH
6 Tapones de vidrio	
Agitador de vidrio	Carbón Activado pulverizado
Termómetro de -10 a 250 °C	
Espátula	Hidróxido de sodio, NaOH 0.4 M
Vasos de precipitados	
Papel filtro	
Pipetas aforadas de 5 y 10 mL	Fenolftaleína

### **Equilibrio de adsorción e isothermas de adsorción <sup>[49]</sup>**

La adsorción, de una especie química presente en la solución del suelo (adsorbato), por los constituyentes de la fase sólida del suelo (adsorbente), ocurre debido a las interacciones entre la superficie activa de las partículas sólidas y el adsorbato. La cantidad adsorbida de una determinada especie depende no sólo de la composición del suelo sino también de la especie química de la que trata y de su concentración en la solución.

Para estudiar la adsorción de un compuesto químico sobre un suelo pueden ser usadas dos técnicas de laboratorio: experiencias en reactor "batch" o intermitente y experiencias con columnas empacadas.

Las experiencias en reactores batch consisten en mezclar y agitar una cantidad determinada de suelo con disoluciones de diferentes concentraciones del soluto estudiado, por ejemplo, un metal pesado. Previamente, se tiene que determinar la concentración de ese metal en el suelo.<sup>[62]</sup>

La gráfica que representa la concentración del metal adsorbido (**C<sub>s</sub>**), en función de la concentración de la disolución (**C<sub>m</sub>**), es la isoterma de adsorción, cuya expresión general es:

$$C_s = K_d C_m$$

Donde:

**K<sub>d</sub>** = Es la constante de adsorción, coeficiente de distribución o coeficiente de partición.

Cuando la isoterma no es lineal, hay otras aproximaciones para determinar la distribución en la disolución. Las más utilizadas son las de Freundlich y Langmuir. Fig.III.6

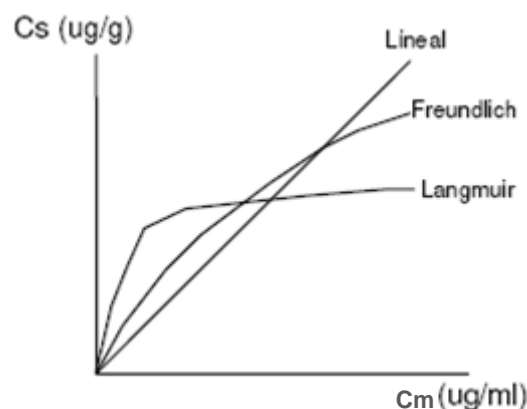


Figura III.6. Isothermas de Freundlich y Langmuir<sup>[49]</sup>

La ecuación general de la isoterma de Freundlich es:

$$C_s = K * C_m^n$$

Donde:

**K** = constante de adsorción.

**n** = constante cuyo valor varía entre 0 y 1.

La forma lineal es:

$$\log C_s = \log K + n * \log C_m$$

**log Cs** = logaritmo de base 10 del metal adsorbido.

**log K** = logaritmo de base 10 de la constante de adsorción.

**log Cm** = logaritmo de base 10 de la concentración de la disolución.

Por otra parte, la isoterma de Langmuir tiene la expresión:

$$C_s = \frac{a * C_m}{1 + b * C_m}$$

Donde:

**a y b** = Son constantes que dependen del tipo de suelo y del tipo de especie química.

La forma lineal es:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{a} * \frac{1}{C_m} + \frac{b}{a}$$

Donde:

**b/a** = Es una nueva constante

Por lo que la ecuación final es:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{K_m} * \frac{1}{C_m} + A \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

La constante **a** es **K<sub>m</sub>**, que representa la máxima capacidad de adsorción.

**A** = Está relacionada con la energía de adsorción.

Las experiencias en reactores tipo batch no son totalmente representativas de las condiciones naturales, ya que ofrecen una gran superficie específica y, por lo tanto, la máxima posibilidad de adsorción. Además, se puede considerar que el flujo es nulo.<sup>[62]</sup>

Las experiencias en columna reflejan mejor las condiciones de campo, ya que permiten controlar la velocidad de flujo y obtener de este modo coeficientes de

distribución más realistas como los que se presentan en la distribución de contaminantes orgánicos.

### **Coefficientes de distribución para contaminantes orgánicos<sup>[49]</sup>**

Muchos contaminantes orgánicos son hidrofóbicos, lo que significa que tienen baja afinidad para solubilizarse en agua, ya que la cadena hidrocarbonada es larga, mientras que para hacerlo en líquidos no polares la cadena o el campo hidrofílico se encuentra donde están los iones hidrofílicos o polares. Estos contaminantes son fácilmente adsorbidos en la materia orgánica de los sedimentos. El coeficiente de distribución de estos compuestos químicos está relacionado con el coeficiente de distribución del compuesto entre el agua y un líquido apolar, como el octanol.<sup>[62]</sup>

Este último es llamado también constante de partición o coeficiente de extracción, que puede ser calculado en un embudo de separación con agua y octanol, en el que se introduce el compuesto; después de agitar se toman separadas las fases y se analiza la concentración en cada una de ellas, **C<sub>w</sub>** y **C<sub>o</sub>**, obteniéndose el coeficiente de distribución **K<sub>ow</sub>=C<sub>o</sub>/C<sub>w</sub>**. Este coeficiente está relacionado con el coeficiente de distribución entre el carbono orgánico y el agua (**K<sub>oc</sub>**), según la ecuación:<sup>[63]</sup>

$$\log K_{oc} = a \log K_{ow} + b \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

- log K<sub>oc</sub>** = Partición entre el agua y una fase 100% de carbono orgánico.
- a y b** = Coeficientes de distribución para contaminantes orgánicos.
- K<sub>ow</sub>** = Relación que existe entre la concentración del compuesto en octanol (C<sub>o</sub>) y la concentración del compuesto en agua (C<sub>w</sub>).

En la tabla III.3 se presentan valores de coeficientes de distribución para contaminantes orgánicos.

Tabla III.3. Coeficientes de distribución para contaminantes orgánicos <sup>[62]</sup>

Tipo de sustancia	a	b
Sustancias para agricultura	0.544	1.337
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	1.000	-0.21
Triacinas, nitroanilinas	0.0937	-0.006
Herbicidas, insecticidas	1.029	-0.18
Compuestos heterocíclicos aromáticos	1.00.	-0.317
Hidrocarburos clorados alquibencenicos	0.72	0.49
Fenilureas sustituidas y alquil-N fenil carbamatos	0.52	0.64

a y b = son constantes que dependen del tipo de suelo y del tipo de especie química.

Dado que puede variar la naturaleza de la materia orgánica presente en el agua y en el sedimento, es preferible utilizar el **K<sub>ow</sub>** como primera aproximación al **K<sub>oc</sub>**, excepto que se tenga datos experimentales de él.

El log **K<sub>oc</sub>** se refiere a la partición entre el agua y una fase 100% de carbono orgánico; el coeficiente de distribución real para el sedimento se obtiene como:

$$K_{ow}=K_{oc}.$$

Donde **K<sub>oc</sub>** es la fracción de carbono orgánico. Esta relación es válida para **K<sub>oc</sub>** mayor de 0.001, ya que de lo contrario la adsorción sobre compuestos no orgánicos puede ser relativamente importante.

### **Intercambio iónico<sup>[49]</sup>**

En el transcurso del trayecto subterráneo, las aguas entran en contacto con diferentes sustancias minerales, algunas de las cuales tienen la propiedad de intercambiar ciertos iones con otros contenidos en el agua, fenómeno que tiene una particular relevancia en la química del agua subterránea.

Determinados sólidos tienen su superficie cargada eléctricamente y, cuando están en contacto con las aguas naturales, su carga provoca que iones de carga opuesta, presentes en el agua se concentren en la interfase solución-sólido. La causa del intercambio obedece a que los iones adsorbidos en la superficie lo están muy débilmente (iones lábiles) de modo que pueden ser fácilmente reemplazados por otros iones, conservándose la carga. Se trata de un fenómeno regulado por un equilibrio dinámico entre los iones adsorbidos y los del agua.

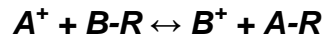
Todos los minerales tienen cierta capacidad de intercambio de cargas, pero sólo la presentan de forma acentuada algunas especies minerales, entre las que destaca el grupo de las zeolitas.

Las zeolitas, a valores de pH normales, están cargadas negativamente. El hecho de que sus cargas negativas libres de superficie sean compensadas por la adsorción de cationes, hace que habitualmente el fenómeno sea conocido como intercambio catiónico o de bases.<sup>[62]</sup>

La fuerza de enlace de los cationes depende de su valencia, tamaño efectivo e hidratación, y de las características del adsorbente. En principio, los iones de igual carga son adsorbidos con igual fuerza sobre la superficie sólida cargada; en la práctica, sin embargo, el ión hidratado determina la fuerza de adsorción, siendo más fuertemente retenidos los de menor ión hidratado. Hay que tener en cuenta que la hidratación es directamente proporcional a la carga del ión e inversamente proporcional al radio iónico.

Por otra parte, los iones multivalentes se concentran en la doble capa preferentemente sobre los monovalentes. Es decir, los iones divalentes son adsorbidos más fuertemente que los monovalentes. Esta selectividad, que favorece la adsorción de cationes de mayor carga, decrece con el incremento de la fuerza iónica en la solución, mientras que la dilución favorece la retención de los iones de mayor carga. Todo ello puede condicionar de manera importante el proceso de intercambio iónico en un agua salinizada.<sup>[62]</sup>

Si se considera la reacción de cambio binario entre dos cationes monovalentes  $A^+$  y  $B^+$  (*intercambio monovalente*), se tiene:



Donde:

R = representa la partícula sólida adsorbente.

Por consiguiente al alcanzar el equilibrio, la ecuación es la siguiente:

$$K_{A/B} = \frac{[B^+](A)}{[A^+](B)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$[A^+]$  y  $[B^+]$  = Actividades respectivas de los iones en la solución.

$A$  y  $B$  = Fracciones molares de los iones adsorbidos por la fase sólida o las fracciones equivalentes del ión en el cambiador.

Los valores  $A$  y  $B$  para el medio de intercambio son, en cualquier instante, función de las reacciones de equilibrio químico entre el medio litológico y las aguas circulantes.

$K_{A/B}$  = Constante o coeficiente de selectividad que expresa la fuerza de enlace de un cambiador en relación a dos cationes.

Los procesos de cambio iónico involucran principalmente al  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ , si bien, los procesos de intercambio  $Ca^{2+}$  por  $Na^+$  son, seguramente, los más comunes dentro de los sistemas naturales y el proceso de intercambio más común es el que implica a estos dos cationes  $Na^+$  y  $Ca^{2+}$ . El que la reacción se produzca en una u otra dirección dependerá de las características del material de intercambio y, sobre todo, de la composición química de la solución en contacto.

En acuíferos sedimentarios de origen marino, las zeolitas están saturadas en sodio por la alta relación  $Na^+/Ca^{2+}$  en el agua de mar; mientras que la química catiónica de las aguas está usualmente dominada por el calcio y magnesio. Así, una zeolita formada en ambiente de agua marina tendrá la mayoría de sus

valencias libres, compensadas con sodio, mientras que en ambiente de agua dulce el calcio y, en ocasiones magnesio, serán los cationes predominantes.

Si una zeolita de ambiente sódico entra en contacto con una solución donde el calcio es el catión dominante, cada par de iones sodio que pase a solución, será remplazado por un calcio adsorbido, de modo que la disolución perderá calcio y ganará sodio, hasta que el incremento del contenido de iones  $\text{Na}^+$  en la solución permita alcanzar el equilibrio. Este tipo de reacción, concordante con el carácter ión selectivo de la adsorción, es conocido como intercambio directo.<sup>[62]</sup>

En ciertos casos puede suceder que la dirección de las reacciones de intercambio sea aparentemente anormal, como ocurre cuando el  $\text{Ca}^{2+}$  adsorbido en la fase zeolítica, es cedido a la solución a cambio del  $\text{Na}^+$  disuelto, ya que es sabido que el calcio tiene una gran afinidad por la adsorción y, por consiguiente, tiene aparentemente dificultad para ser cedido a la solución. Por este motivo, las reacciones en que el suelo cede calcio a cambio de sodio, son referidas como reacciones de intercambio inverso.

El cambio de bases modifica algunas relaciones entre cationes, si bien el indicador más simple de intercambio iónico es la relación  $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$ . También es de gran interés el denominado índice de cambio de bases (**icb**):

$$\text{icb} = r\text{Cl} - r(\text{Na} + \text{K}) / r\text{Cl}$$

Donde:

**icb** = índice de cambio de bases.

**rCl** = iones cambiados de cloro.

**r(Na+K)** = intercambio iónico entre sodio y potasio.

Es la relación entre los iones cambiados y los iones de la misma naturaleza, primitivamente existentes, si se admite que en las aguas primitivas había tanto **rCl** como **r(Na+K)** y que hay un intercambio de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  del agua, contra los alcalinotérreos de las permutitas. Debe tenerse en cuenta que el cambio de bases no viene definido por un valor determinado, sino por una variación.<sup>[62]</sup>

El intercambio iónico es en sí un proceso rápido, si el material con el que se efectúa el intercambio presenta suficiente superficie de contacto, que no altera el total de meq/L de iones disueltos.

### **Factores que influyen en la adsorción e intercambio iónicos**

La adsorción depende de las concentraciones respectivas del catión en el adsorbente y el líquido. La fuerza iónica de la solución determina la intensidad de la adsorción, pues la adsorción relativa es proporcionalmente más intensa en soluciones diluidas que concentradas. Cuando se incrementa la fuerza iónica de la solución en contacto con la zeolita, la capa difusa se comprime y el potencial eléctrico decae más rápidamente con la distancia a la superficie. Por consiguiente,

la superficie potencial variará en función de la concentración de electrolito y del tipo de carga de la superficie de las partículas (constante o dependiente del pH). Para una superficie dependiente del pH, un incremento en la concentración de electrolito generará un descenso de potencial al producirse un aumento de la distancia a la partícula.

La temperatura influye en la medida que las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas y por tanto, el grado de adsorción será presumiblemente mayor, al disminuir la temperatura, aunque las variaciones normales de temperatura sólo tienen pequeños efectos sobre el proceso de adsorción.<sup>[62]</sup>

La fuerza de enlace con que los iones son retenidos o adsorbidos en los lugares de cambio depende, así mismo, de otros factores, entre los cuales cabe citar los siguientes:

- Valencia y tamaño del ión
- Densidad de carga, estructura y superficie específica del material de intercambio
- Concentración relativa de los cationes presentes
- Contenido de agua en el sistema (efecto dilución)

La capacidad de intercambio varía, para un determinado tipo de zeolita, con el tamaño de la partícula, siendo más elevado en tamaños finos, por ser mayor su superficie específica. Para zeolitas diferentes, la capacidad depende de la estructura; así, por ejemplo, en el caso de la montmorillonita, todos los cationes situados dentro de la estructura son intercambiables, mientras que los cationes intercapa de la motmorillita no son tan fácilmente cedidos porque forman parte de la red.

La teoría de Gouy-Chapman predice que los iones de igual carga son adsorbidos con igual fuerza sobre la superficie sólida cargada; en la práctica, sin embargo, el ión hidratado, o bien la polarización del ión, determinan la fuerza de adsorción, siendo más fuertemente retenidos los de menor hidratación.

La hidratación es directamente proporcional a la carga del ión e inversamente proporcional al radio iónico. Supone un incremento del tamaño del ión y por tanto reduce su movilidad. Los radios iónicos hidratados determinan la movilidad en el filtro de arcilla y, por consiguiente, la concentración relativa de los metales en las aguas.<sup>[62]</sup>

Si se asume que las fuerzas de enlace en la adsorción, son esencialmente electrostáticas y que bajo condiciones ordinarias los iones adsorbidos están hidratados, los cationes hidratados con radios más pequeños se acercarán a los lugares de carga negativa más fácilmente y serán retenidos con más fuerza que el



## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

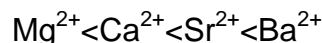
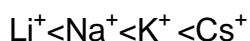
cación hidratado de mayor radio. Según esto, el  $\text{Ca}^{2+}$  será más fuertemente adsorbido que el  $\text{Mg}^{2+}$ .<sup>[62]</sup>

La teoría de Gouy establece también que los iones multivalentes se concentran en la doble capa preferentemente sobre los monovalentes. Es decir, los iones divalentes son adsorbidos más fuertemente que los monovalentes.

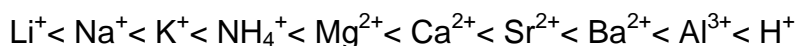
Consecuentemente, la relación  $[M^{2+}]/[M^+]$  es mucho menor conforme aumenta la distancia a la superficie de adsorción. Dicha selectividad, que favorece la adsorción de cationes de mayor carga, decrece con el incremento de la fuerza iónica en la solución, mientras que la dilución favorece la retención de los iones de mayor carga. Todo ello puede condicionar de manera importante el proceso de intercambio iónico en un agua salinizada.<sup>[62]</sup>

Algunos cationes pueden ser fijados irreversiblemente en las zeolitas. Tal es el caso de los cationes de gran tamaño no hidratado  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$ , del  $\text{Li}^+$ , por su pequeño radio fuertemente hidratado y del  $\text{Mg}^{2+}$ , que forma parte de la red mineral. La adsorción irreversible tiende a ocurrir cuando hay fuertes interacciones químicas entre el adsorbente y el adsorbato.

La adsorción es, por tanto, ión selectivo. Las series respectivas, para iones mono y divalentes, ordenadas atendiendo al tamaño de los iones son las siguientes:



No existe unanimidad entre los autores a la hora de establecer un orden prioritario de adsorción, entre los diferentes cationes. La serie liotrópica o de Hofmeister es la siguiente:



La posición de los iones monovalentes y divalentes en una serie combinada tiende a variar con la naturaleza del material de cambio (composición, estructura y distribución de carga) y con la concentración y características de la solución en contacto. Schachtschabel (1940) (in Nommik and Vahtras, 1982), estudiando el papel del  $\text{NH}_4^+$  en los ácidos húmicos y varios minerales, observó la secuencia siguiente para el poder relativo de reemplazamiento de cationes:

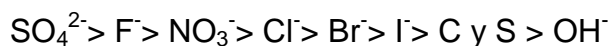
- Caolinita  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$
- Montmorillonita  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{H}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$
- Moscovita  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{K}^+ < \text{H}^+$
- Ácidos húmicos  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{H}^+$

Estas series pueden considerarse como de orden normal; sin embargo, en muchos casos puede ocurrir una selección o adsorción preferente de cationes que

la teoría de la hidratación no puede explicar. La polarización y parcial deshidratación de cationes están consideradas como las principales causas para justificar las desviaciones del "orden normal" de afinidad de intercambio, sin olvidar la concentración iónica relativa de la solución y las características del material de cambio. [62]

También debe tomarse en cuenta el efecto que puede tener la adsorción de aniones sobre los procesos de cambio. La adsorción específica de aniones incrementa la carga negativa de la partícula sólida. Experiencias sobre el efecto de los iones  $\text{Cl}^-$  en las reacciones de intercambio Na-Ca y Na-Mg, en la montmorillonita, han puesto de manifiesto que la exclusión de aniones en el estudio del intercambio puede conducir a errores más o menos significativos. Los aniones asociados con los cationes adsorbidos pueden afectar a la extensión del cambio catiónico, ya que la adsorción de cationes se incrementa cuando lo hace la fuerza de adsorción del anión de la sal.

La serie de Hofmeister de aniones, en orden decreciente de adsorción, es la siguiente: [14]



La incorporación de sólidos flotantes en líquidos, es un desafío común en las industrias de proceso químicos (CPI), en las operaciones que van desde reacciones de la polimerización hasta el tratamiento de aguas y proceso de fermentación. Sin embargo este aspecto ha recibido mucho menos atención que los procesos que implican sólidos pesados.

Las recomendaciones establecidas y recientemente probadas del diseño para incorporar diversos tipos de partículas flotantes en líquidos, presentan varios desafíos. De manera similar a los sólidos pesados, los sólidos flotantes de proceso pueden implicar una reacción entre las diversas fases, en este caso el objetivo principal es incorporar los sólidos en las fases líquidas; de forma que todos los sólidos ocupen la superficie disponible para la transferencia total del sólido-líquido, para obtener una reacción sólido-líquido razonablemente alta, mientras se asegura que el proceso está funcionado económicamente.

El aumento de la entrada de energía más allá de estas condiciones traerá pequeñas mejoras en términos de transferencia de masa en el sólido-líquido. En estos casos se recomienda un diseño que permita reducir partículas flotantes en la entrada más baja del reactor.

Etchells, proporciona un acercamiento práctico en clasificar partículas flotantes por diferencia de densidades; algunas partículas tienden a flotar en la superficie líquida porque son difícil de ser humedecidas o por tener una naturaleza porosa, que al ser llevada a una densidad a granel tienden a dejar de flotar.

Un ejemplo en el cual las partículas flotan en la superficie a pesar de ser más densas que la fase líquida, son las del politetrafluoroetileno en agua y silicona.

En otros casos, el producto final de la dispersión de partículas debe alcanzar un cierto grado de homogeneidad. Esto requiere a menudo alcanzar las características deseadas del producto, puesto que la homogeneidad se mejora con el aumento de entrada de energía. Si las partículas son polvos finos a escala micrones o nano, hay una tendencia a formar racimos a macroescala. El proceso requerirá la ruptura de estos grandes racimos, e incluso se podrán incorporar las partículas en la fase líquida.

Las limitaciones en el arrastre del vapor y la deformación de la superficie, se presenta en una amplia gama de usos industriales. Hay numerosos ejemplos prácticos que pueden sustentar el diseño del proceso. Para ciertos productos, es esencial que el gas o el vapor no se arrastren en el espacio libre, por lo tanto el diseño debe evitar la formación del vórtice en la superficie tanto cuanto sea posible.

De hecho, la formación del vórtice, que resulta de un flujo predominante tangencial, es indeseable por varias razones, incluyendo el siguiente. Los medios de un flujo predominante tangencial son la mezcla de los flujos superior e inferior que da lugar a una poca homogeneidad del producto.

La formación intermitente de los vórtices de inestabilidades superficiales del flujo son las causas de las inestabilidades mecánicas. Si el vórtice alcanza de vez en cuando al impulsor, éste dará lugar a fluctuaciones serias del esfuerzo de torsión durante el proceso.

Con algunos productos, se tiende a ensuciar las paredes del reactor, por las deformaciones superficiales de este, provocado por las ondas de agitación y por ello el salpicado en las paredes del recipiente, y en el caso de las partículas que disuelven, la dispersión puede cambiar perceptiblemente a través del proceso.

A menudo, el nivel líquido varía perceptiblemente a través del proceso. Para esos casos, los deflectores de la superficie no deben ser considerados, y es esencial asegurar que la colocación del impulsor sea siempre por debajo del nivel líquido.

El índice de reducción de partículas ligeras puede ser preocupante, debido a que en el vórtice superficial permanecen flotando en la parte inferior del tanque, y se ha demostrado recientemente que pueden ser extraídas por abajo de la superficie líquida sin la formación del vórtice, aunque se observen deformaciones y ondulaciones superficiales serias, mediante la inyección de aire.

Un estudio amplio sobre los efectos de los impulsores de flujo del tipo radial, mezclado o axial, la posición, diámetro, número de deflectores y altura líquida, demuestra que el flujo radial que descarga tiene un mayor poder para controlar el índice de reducción.

De hecho, estudios recientes han demostrado que los recipientes a nivel de flujo no lineal permanecen estables linealmente. La formación del vórtice, que no es deseable por las razones anteriormente mencionadas se pueden evitar, y en su lugar se asegura una operación más flexible con respecto a un número reducido de deflectores o deflectores parciales (hasta una altura media del recipiente) para los procesos en los que el nivel líquido varía.

Para alcanzar la reducción de sólidos flotantes es importante asegurarse que la descarga del impulsor, sea donde están las velocidades y turbulencias más altas, está lo más cercana a la superficie líquida.

Por lo tanto, el funcionamiento en el modo de agitación ascendente requiere menos entrada de energía ( $P_{JD}$ ) para la reducción de la superficie de una manera similar, mientras que los impulsores a nivel bajo de agitación se recomiendan para suspender los sólidos pesados en la base del recipiente.

Por la misma razón, la entrada de energía ( $P_{JD}$ ) es más baja con los hidrodenslizadores estrechos que proporcionan un flujo axial, que se caracteriza por un “flujo mezclado”, es decir, un flujo predominante axial con un componente radial, aumentando el diámetro del impulsor  $D=T/3$ . También realza el componente radial del flujo, dando por resultado los flujos de la descarga que son dirigidos hacia las esquinas de la superficie y los aumentos de energía.

De acuerdo con los resultados experimentales, el escalamiento crítico para tales sistemas se puede proponer de hecho para los impulsores ascendentes y de bajo-bombeo.

Los polvos a micro y nano-escala se presentan cuando las partículas de tamaño micrón o submicrón, se introducen en un líquido y tienden a formar racimos a macroescala. Debido al aire encerrado en estos racimos, que da lugar a una densidad al parecer baja, flotará aunque las partículas sean más densas que la fase líquida. Un estudio recientemente realizado, ha demostrado que las recomendaciones del diseño desarrollado para los sólidos ligeros son también válidas para la incorporación de tales racimos del polvo fino; los hidrodenslizadores estrechos que bombean hacia arriba requieren energía baja para la reducción.

El diseño para tales casos necesita más atención; sin embargo, una vez que las partículas están en la fase líquida, se resuelve debido a la colocación del

impulsor por la alta densidad. Alternativamente un impulsor adicional puede ser necesario para que la suspensión alcance el fondo, éste segundo impulsor bombea hacia abajo, lo más cercano a la base del recipiente.

Al realizar la última agitación en el proceso de micro- y nano-escala, donde se genera una dispersión fina, los racimos grandes deben ser llevados de una forma ascendente para que éstos rompan. Durante la agitación en el reactor, donde se lleva a cabo el proceso de pre-dispersión, se requiere de una mayor energía para que esta rompa hacia la parte superior.

El funcionamiento del dispositivo intensivo en energía depende de la finura en la pre-dispersión. A menudo, cierto grado se rompe hacia arriba, tiene que ser alcanzado antes de que tal dispositivo se pueda utilizar para evitar funcionar con el dispositivo intensivo en energía por largos periodos o para prevenir obstrucciones potenciales. La dispersión en el reactor se utiliza no sólo para generar una suspensión, si no para la reducción de tamaño inicial. Un impulsor tipo diente de sierra o un rotor-estator del reactor se puede utilizar, puesto que ambos generan niveles de energía de disipación local, conjuntamente con un impulsor de flujo axial para asegurar suficiente flujo dentro de la masa. Alternativamente, un rotor-estator en línea se puede emplear con este fin.

La disolución de partículas en la fase líquida o aún la presencia de partículas finas pueden alterar la reología de la dispersión. Esto necesita atención adicional puesto que el aumento en la viscosidad en la entrada de energía para la reducción de partícula, otros cambios en la reología pueden alterar substancialmente el flujo dentro del dispositivo de proceso. Puede ser posible cambiar las adiciones durante el proceso para reducir al mínimo algunas de las complicaciones. Si esto no es posible, un buen conocimiento de cómo se desarrolla la reología de la dispersión por fuera del proceso, es importante para replantear el diseño.

Como las partículas son muy difíciles de humedecer, aunque se alcance la reducción bajo ciertas condiciones, tan pronto como se apague el impulsor o la velocidad disminuya levemente, las partículas pueden ir a la superficie. Mientras que el uso de un humidificante apropiado facilitará la incorporación de la partícula, al proceso simultáneamente. De esta manera, la fragmentación de los racimos de partículas puede alcanzar la fase líquida.

Se requiere una combinación de dispositivos de proceso, por ejemplo, además de la agitación mecánica, el reactor se puede equipar de un dispositivo ultrasónico para propulsar las partículas hacia arriba. Otros dispositivos en el mercado que funcionen bajo condiciones de flujo continuo permitirán la adición de líquidos y de sólidos a vacío.

### III.4 Propuesta del purificador

Se ejemplifica una forma dinámica para reducir los óxidos de nitrógeno (NOx) y estar en los límites para la exposición máxima permisible, con la incorporación de nuevos ciclones, rejillas de aire en la parte media y baja, así como la sustitución del distribuidor del catalizador en la recirculación del aire a través de tubos verticales en un reactor largo con calefactor de aire (figura III.7).

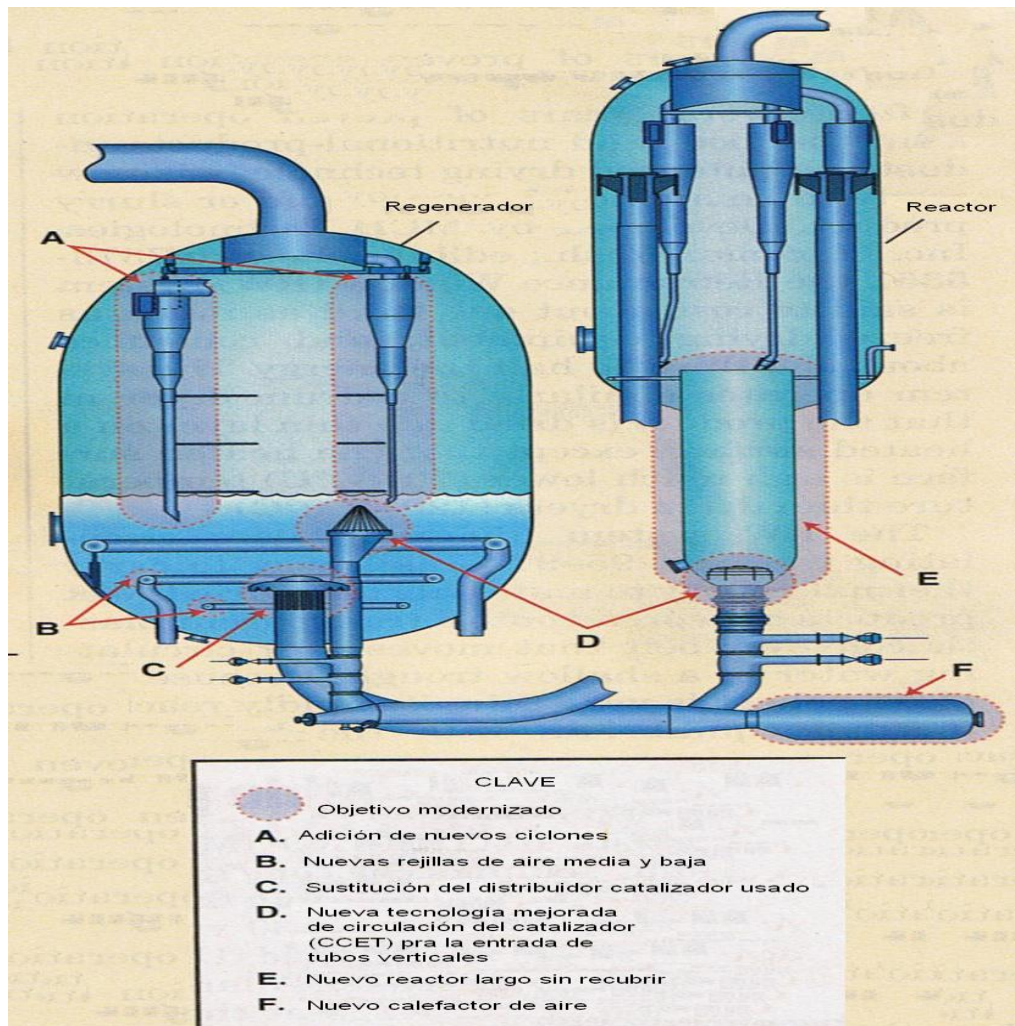


Figura III.7. Forma dinámica para reducir NOx. [64]

La propuesta para el diseño del purificador de aire, es la siguiente: se hacen pasar los gases de CO y NO<sub>2</sub> del aire contaminado a través de un ventilador o soplador- compresor al equipo de adsorción y soporte de carbón activado para tratar el aire con la zeolita faujasita (X, Y). Este registro fue tomado en los días en que los IMECAS estaban al máximo (CO de 27.5 ppm y NO<sub>2</sub> de 0.525ppm); correspondiendo estos valores a 250 IMECAS, llegándose a la reducción de hasta

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

100 puntos IMECAS, que son los permitidos en las Normas Oficiales Mexicanas (tabla III.4).

Tabla III.4 Concentraciones que equivale a los 100 puntos IMECAS<sup>[65]</sup>

Contaminante		Norma	Concentración	Tiempo de exposición en (horas)
Monóxido de Carbono	CO	NOM-021-SSAI-1993	11.0 ppm	8
Bióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	NOM-022-SSAI-1993	0.13 ppm	24
Ozono	O <sub>3</sub>	NOM-020-SSAI-1993	0.11 ppm	1
Bióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>	NOM-023-SSAI-1993	0.21 ppm	1
Partículas Menores a 10 Micras	PM 10	NOM-025-SSAI-1993	120 µg/m <sup>3</sup>	24
Partículas Menores a 10 Micras	PM 10	NOM-025-SSAI-1993	50 µg/m <sup>3</sup>	promedio anual
Partículas Menores a 2.5 Micras	PM 2.5	NOM-025-SSAI-1993	65 µg/m <sup>3</sup>	24
Partículas Menores a 2.5 Micras	PM 2.5	NOM-025-SSAI-1993	15 µg/m <sup>3</sup>	promedio anual
Partículas suspendida totales	-----	NOM-025-SSAI-1993	210 µg/m <sup>3</sup>	24

Esto significa que probablemente se bajo al 50%, pero a medida que el purificador esté continuamente en funcionamiento puede bajar aún más, para esto se hace uso de un programa de cómputo que registra las partes por millón de los gases de entrada y salida del purificador (figura III.8).

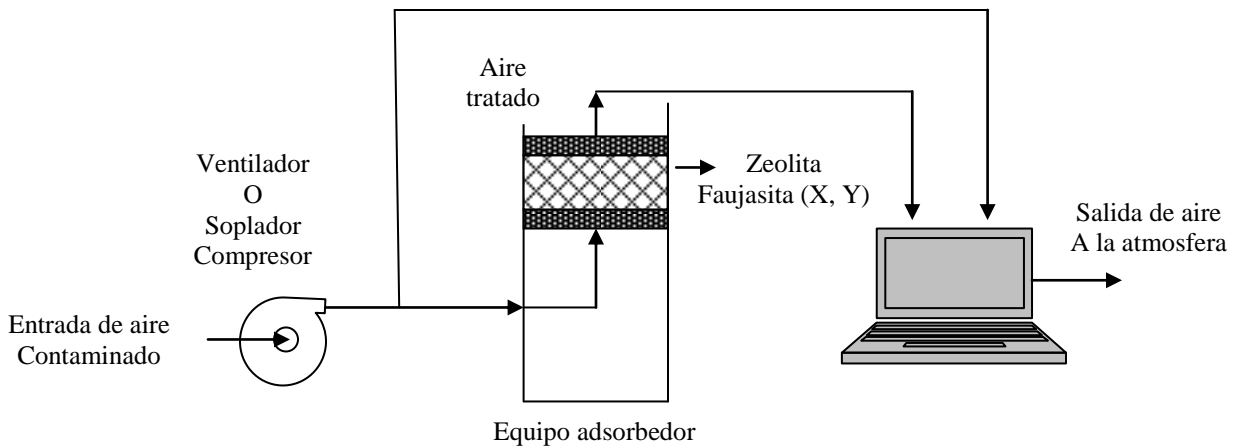


Figura III.8. Propuesta del proceso de limpieza del aire contaminado

**Isoterma de Langmuir <sup>[66]</sup>**

Siempre que un gas esté en contacto con un sólido en donde se establezca un equilibrio entre las moléculas en la fase gaseosa y las especies adsorbentes correspondientes (moléculas o átomos) las cuales son depositadas en la superficie del sólido.

Igual que en el equilibrio químico, la composición del equilibrio de adsorción dependerá de un número de factores;

1. Las relativas estabildades del adsorbente y las especies de la fase gaseosa involucrada.
2. La temperatura del sistema, ambos, del gas y superficie; aunque estas son normalmente las mismas.
3. La presión del gas por encima de la superficie.

En general, los factores 2 y 3 hacen un esfuerzo opuesto sobre la concentración de las especies del adsorbente, es decir, que la superficie cubierta aumenta por el incremento de la presión del gas; podría ser reducida si la temperatura de la superficie se aumenta.

La isoterma de Langmuir fue desarrollada por Irving Langmuir en 1916, para describir la dependencia de la superficie cubierta por un gas adsorbido sobre la presión de gas arriba de la superficie a una temperatura fija, hay muchos otros tipos de isotermas como las de Temkin y Freundlich, las cuales difieren una de otra de las derivadas del manejo de la expresión para la superficie cubierta; en particular, ellos tratan la dependencia de la entalpía de adsorción mientras que la isoterma de Langmuir es una de las más simples, facilita una comprensión útil de la dependencia de la presión que ejerce la extensión de la superficie de adsorción.

### **Superficie cubierta y la isoterma de Langmuir**

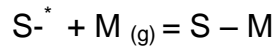
Cuando la isoterma de la adsorción es convencional se toma por definición la superficie cubierta ( $\theta$ ), la cual expresa la máxima saturación en la superficie de un adsorbente. Casi siempre será la unidad, por ejemplo  $\theta_{max}=1$ .

Este valor define la superficie cubierta, en donde la práctica más común es que  $\theta$  se iguale con relación a los diferentes adsorbentes en los que los átomos de la superficie son casi siempre constantes, es decir menor a la unidad cuando se logra la saturación.

### **Derivación de la Isoterma de Langmuir. Tomando en cuenta las consideraciones de equilibrio.<sup>[67]</sup>**

Se puede derivar la isoterma de Langmuir, tratando el proceso de adsorción desde otro proceso en equilibrio en el que las moléculas en fase gaseosa  $M_{(g)}$ , están también en equilibrio junto con los sitios vacios de la superficie, y las especies adsorbidas en la superficie en estos términos, para una molécula no disociada. En el proceso de adsorción se considera la siguiente ecuación:





Donde:

$S^{-*}$ , Representa un sitio vacío de la superficie

$M_{(g)}$ , Moléculas en fase gaseosa

$S-M$ , Complejo de adsorción

En la expresión de esta experimentación se está haciendo una suposición que hay un número de sitios localizados en la superficie. Esta es la primera mejor suposición de la isoterma de Langmuir.

Se puede definir ahora una constante de equilibrio ( $K$ ) en términos de la concentración de los reactivos y productos

$$K = \frac{[S-M]}{[S^{-*}][M]} \quad \text{Ec. (4)}$$

Se puede observar que:

$[S-M]$  Es proporcional a las moléculas adsorbidas sobre la superficie del adsorbente, ejemplo proporcional a  $\theta$ .

$[S^{-*}]$  Es proporcional al número de sitios vacantes, por ejemplo es proporcional a  $(1-\theta)$ .

$[M]$  Es proporcional a la presión del gas ( $P$ ).

Por lo tanto, es posible definir otra constante de equilibrio,  $b$  como se describe en seguida:

$$b = \frac{\theta}{[1-\theta][P]} \quad \text{Ec. (5)}$$

Deducción matemática para el cálculo de  $\theta$ :

Paso 1.  $(1-\theta) * P = P - P\theta$

Paso 2. Sustituyendo en Ec. (5):

$$b = \frac{\theta}{P - P\theta}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} b*(P-P\theta) &= \theta \\ bP &= \theta + bP\theta \end{aligned}$$

Paso 3. Simplificando se obtiene:

$$bP = \theta(1+bP)$$

Paso 4. Despejando a  $\theta$ :

$$\theta = \frac{bP}{(1+bP)} \quad \text{Ec. (6)}$$

Esta expresión es la forma usual de la isoterma de Langmuir.

En todas las reacciones químicas, la constante de equilibrio  $b$ , es dependiente de la temperatura y de la energía libre de Gibbs y por lo tanto del cambio de entalpía para el proceso.

En la ecuación (6),  $b$  es solamente una constante, independiente de  $\theta$ , si la entalpía de adsorción es independiente de la extensión de la superficie cubierta. Esta es la segunda mejor suposición de la isoterma de Langmuir.

### **Isotermas de Langmuir. Consideraciones desde la derivación cinética. [68]**

El equilibrio que puede existir entre el gas adsorbido sobre una superficie y las moléculas en la fase gaseosa es un estado dinámico, es decir, el equilibrio entre la velocidad de adsorción de las moléculas en la superficie y la velocidad de desorción de las moléculas que regresan a la fase gaseosa.

Es posible obtener una isoterma para el proceso de adsorción simplemente considerando e igualando las velocidades de estos dos procesos.

Han sido derivadas las expresiones para la velocidad de adsorción y velocidad de desorción.

**Para la adsorción se tiene: [68]**

$$R_{ads} = \frac{f(\theta)P}{\sqrt{2 * \Pi * M * K * T}} \exp\left(-E_a^{ads} / RT\right)$$

La velocidad de adsorción  $R_{ads}$ , de una molécula en una superficie puede expresarse de la misma manera que cualquier proceso cinético. Por ejemplo, cuando se expresa en términos de la presión parcial de la molécula en la fase gaseosa por encima de la superficie: [69]

$$R_{ads} = k P^x$$

Donde:

$x$  = Orden de la cinética

$k$  = Constante de velocidad

$P$  = Presión parcial

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

Si la constante de velocidad se expresa en una forma de Arrhenius, obtenemos una ecuación cinética de la siguiente forma:

$$R_{\text{ads}} = A \exp(-E_a / RT) \cdot P^x$$

Donde:

$E_a$  = Energía de activación para la adsorción

$A$  = Pre-exponencial de los factores (frecuencia)

$R$  = Constante de los gases ideales

$T$  = Temperatura [K]

Es mucho más informativo, sin embargo, tener en cuenta los factores que controlan este proceso a nivel molecular.

La velocidad de adsorción se rige por:

1. La velocidad de llegada de las moléculas en la superficie
2. La proporción de moléculas incidentes que se someten a la adsorción

Es decir, podemos expresar la tasa de adsorción (área por unidad de superficie) como un producto del flujo incidente molecular ( $F$ ), y la probabilidad de adherencia ( $S$ ).

$$R_{\text{ads}} = S_{\text{ads}} * F \quad [\text{moléculas m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$$

El flujo de moléculas incidente está dado por la ecuación de Hertz-Knudsen

$$\text{Flux o flujo, } F = P / (2\pi m k T)^{1/2} \quad [\text{moléculas m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$$

Donde:

$P$  = Presión del gas [ $\text{Nm}^{-2}$ ]

$M$  = Masa de una molécula [kg]

$T$  = Temperatura [K]

El conflicto de la probabilidad es claramente una propiedad del sistema **adsorbato/sustrato**, bajo la consideración de que el intervalo debe ser  $0 < S < 1$ , ya que depende de varios factores. Entre estos están la superficie cubierta por las especies adsorbidas ( $\theta$ ) y la presencia de cualquier barrera de activación de la adsorción. Por lo tanto;

$$S = f(\theta) \cdot \exp(-E_a / RT) \exp(-E_a / RT)$$

Donde

$E_a$  = Energía de activación para la adsorción

$f(\theta)$  = Es una función no determinada de la superficie existente de especies adsorbidas.

De la combinación de las ecuaciones de  $S$  y  $F$ , se obtiene la siguiente expresión para la velocidad de absorción:

$$R = \frac{f(\theta).P}{\sqrt{2\pi * m * k * T}} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad \text{Ec. (7)}$$

**Para el proceso de la desorción se tiene:**<sup>[70]</sup>

$$R_{des} = V * f'(\theta) * \exp\left(-E_a^{des} / RT\right)$$

Donde:

- V** = Frecuencia  
 **$E_a^{des}$**  = Energía de activación para la desorción  
 **$f(\theta)$  y  $f'(\theta)$**  = Superficie cubierta por la velocidad de adsorción y desorción respectivamente.

Una especie adsorbida presente en una superficie a temperaturas bajas puede permanecer indefinidamente en ese estado. A medida que la temperatura de la superficie es mayor; sin embargo, llegará un punto en el que la energía térmica de las especies adsorbidas es tal que una de varias cosas puede ocurrir:

1. Una especie molecular se puede descomponer para producir cualquiera de los productos en fase gaseosa o de otras especies de superficie.
2. Un adsorbato atómico puede reaccionar con el sustrato para producir un compuesto de superficie específica, o difundir la mayor parte en la fase sólida.
3. La especie puede volver de la fase sólida a la fase gaseosa, por efecto de la desorción.

La última de estas opciones es el proceso de desorción. En ausencia de la descomposición de las especies de desorción en general será la misma que se adsorbe, pero esto no es necesariamente siempre el caso.

Un ejemplo donde no se encuentran algunos metales alcalinos, es la adsorción sobre sustratos metálicos, en los que se presenta una alta eficiencia, con superficies cubiertas bajas, las especies desorbidas son los iones metálicos alcalinos en oposición al átomo neutro. Otros ejemplos podrían incluir ciertas reacciones de isomerización.

### **Cinética de la desorción**

La velocidad de desorción ( $R_{des}$ ), de un adsorbato de la superficie se puede expresar en la forma general:

$$R_{des} = k \theta^x$$

Donde:

- x** = Orden de la cinética de desorción  
**k** = Constante de velocidad para el proceso de desorción  
 **$\theta$**  = Concentración en la superficie de las especies adsorbidas

El orden de desorción puede predecirse, porque específicamente nos interesan las etapas elementales de una "reacción".

La constante de velocidad para el proceso de desorción se puede expresar en una forma de Arrhenius,

$$k_{des} = A \exp(-E_a^{des} / RT)$$

**Donde:**

$E_a^{des}$  = Es la energía de activación para la desorción.

$A$  = Es el factor pre-exponencial, lo que también puede ser considerado como el "intento de frecuencia",  $\nu$ , para superar la barrera de desorción.

Entonces la velocidad de desorción esta dada por la siguiente expresión general: [67]

$$R_{des} = V * f'(\theta) * \exp(-E_a^{des} / RT) \quad \text{Ec. (8)}$$

Igualando estas dos velocidades (Ec. 7 y 8) resulta una ecuación de la forma:

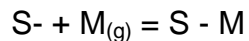
$$\frac{P * f(\theta)}{f'(\theta)} = C(T) \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde los términos  $f(\theta)$  y  $f'(\theta)$  contienen la dependencia de la superficie cubierta por la velocidad de adsorción y desorción respectivamente, y otros factores que han sido tomados a una temperatura constante ( $T$ ), que son características particulares del proceso de adsorción y se representan por  $C(T)$ .

Ahora se requiere hacer alguna suposición de simplificación:

La primera suposición es que la adsorción toma lugar solamente en sitios específicos localizados sobre la superficie, y la saturación de superficie cubierta corresponde a una ocupación completa de dichos sitios.

Esto permite realizar una consideración más simple del caso de adsorción molecular reversible:



Donde:

$S-$ , Representa un centro vacío de la superficie

$S-M$ , Complejo de adsorción

Bajo estas circunstancias es razonable asumir las dependencias de la superficie cubierta de las velocidades de los dos procesos en la forma siguiente.

Adsorción,  $f(\theta) = c(1-\theta)$  Es proporcional a la fracción de sitios que están desocupados.

Desorción,  $f'(\theta) = c'\theta$  Es proporcional a la fracción de los sitios que son ocupados por moléculas adsorbidas.

$\theta =$  Fracción de los sitios ocupados en el equilibrio.

La superficie cubierta de estas dependencias es exactamente para señalar que los procesos de avance y retroceso son pasos elementales de la reacción, en cuyo caso se sigue la teoría cinética química estándar que:

1. El proceso de adsorción inicial muestra que la cinética tiene una dependencia de primer orden en la concentración de los sitios vacíos de la superficie.
2. El proceso de desorción es lo inverso, muestra que la cinética tiene una dependencia de primer orden respecto a la concentración de las moléculas adsorbidas.

Sustituyendo en la Ec. (9) se tiene:

$$\frac{P(1-\theta)}{\theta} = B(T) \quad \text{Ec.(10)}$$

Donde

$$B(T) = (c'/c) \times C(T)$$

Sustituyendo la anterior expresión en la ecuación (10), se tiene la isoterma de Langmuir para la superficie cubierta, que corresponda a la Ec. (6):

$$\theta = \frac{bP}{1+bP}$$

Donde:

$b = (1/B(T))$ , Es función de la temperatura y contiene un término exponencial de la forma:

$$b = \text{Exp}^{\left[ \left( \frac{E_a^{des} - E_a^{ads}}{RT} \right) \right]} = \text{Exp} \left[ -\Delta H_{ads} / RT \right] \quad \text{Ec. (11)}$$

En consecuencia ( $b$ ), sólo puede ser considerada como una constante con respecto a la superficie cubierta si la entalpía de adsorción es en sí mismo independiente de la superficie cubierta. Esto es la segunda mejor suposición de la isoterma de Langmuir.

### Variación de la superficie cubierta por la temperatura y presión <sup>[71]</sup>

Una aplicación de la primera y segunda suposición de la isoterma de Langmuir, conduce a expresiones fácilmente derivables de la dependencia de la presión de la superficie cubierta. En el caso simple la expresión para el proceso de adsorción molecular reversible es expresada por la Ec. (6):

$$\theta = \frac{bP}{1+bP}$$

Donde:

$$b = b(T)$$

Para el caso de la zeolitas-faujasita (X, Y), en la figura III.9, se muestran las variaciones de la isoterma de Langmuir de la superficie cubierta vs presión para la adsorción molecular.

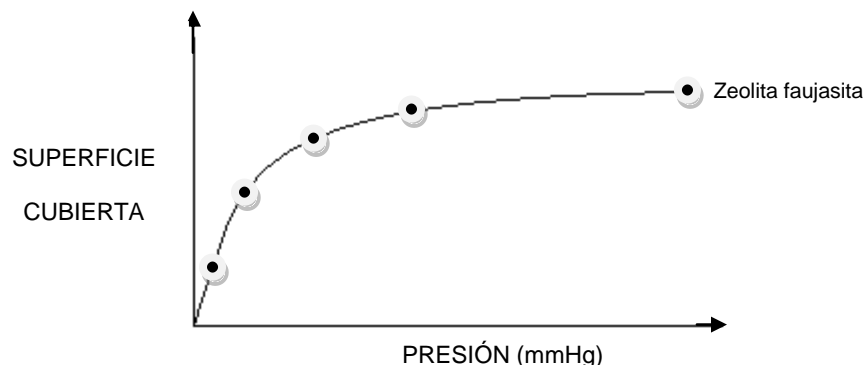


Figura III.9. Zeolita faujasita con una actividad de 50%

Se debe notar que:

1.  $\theta \rightarrow bP$  A bajas presiones
2.  $\theta \rightarrow 1$  A altas presiones

A una presión dada, la extensión de adsorción es determinada por el valor de (**b**); esto es dependiente sobre ambas, la temperatura (**T**) y la entalpía de adsorción, es una magnitud negativa y refleja la fuerza del enlace del adsorbato al sustrato (figura III.10).

El valor de **b** es incrementado por:

- Una reducción de la temperatura en el sistema.
- Un incremento de la potencia de adsorción.

Por lo tanto en la figura III.10 se presenta el conjunto de curvas de entalpía de adsorción y el sistema de adsorción.

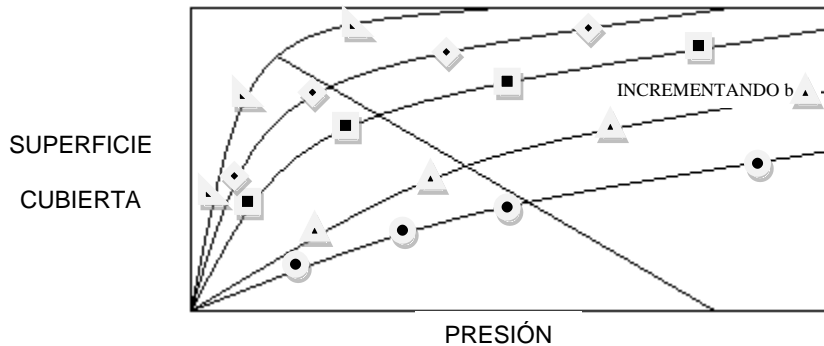


Figura III.10. Demostración de los efectos de (1) crecimiento de la magnitud de la entalpía de adsorción a una temperatura fija, o (2), la temperatura decreciente para un sistema de adsorción dado.

El cubrimiento de una superficie en equilibrio dado podría ser realizable en varias combinaciones de presión y temperatura, de alta o baja. Una señal de que la temperatura es baja, la presión requerida disminuye, decrece la superficie cubierta a un determinado equilibrio (figura III.11).

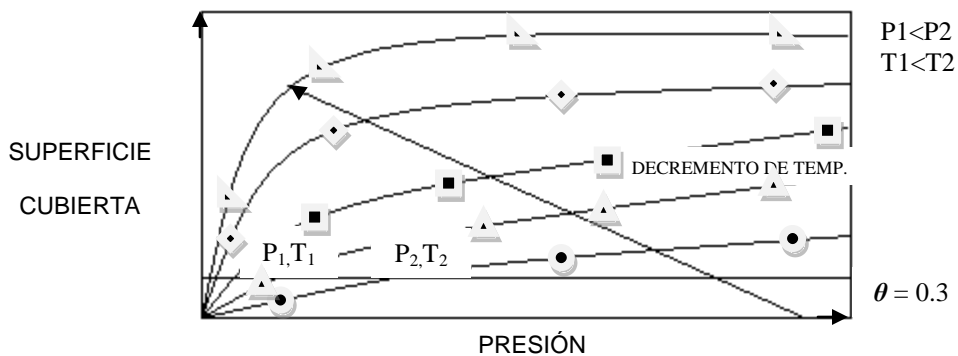


Figura III.11. Demostración de los efectos de la presión y temperatura sobre las superficies cubiertas a un determinado equilibrio.

### Determinación de la entalpía de adsorción

El valor de  $b$  depende de la entalpía de adsorción. También ha sido sólo demostrado cómo el valor de  $b$  influye en la presión/temperatura ( $P-T$ ) depende de la superficie cubierta.

Varios métodos basados en esta idea se han desarrollado para la determinación de entalpías de adsorción. Un método es el que se describe en la figura III.11, donde la línea recta es la entalpía o el valor de  $b$  bajo la curva de entalpía de adsorción.



**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

---

Etapa 1: Comprende la determinación de las isothermas de adsorción, donde una sola isoterma es la curva expresa la superficie cubierta vs la presión a una temperatura estable (figura III.12).

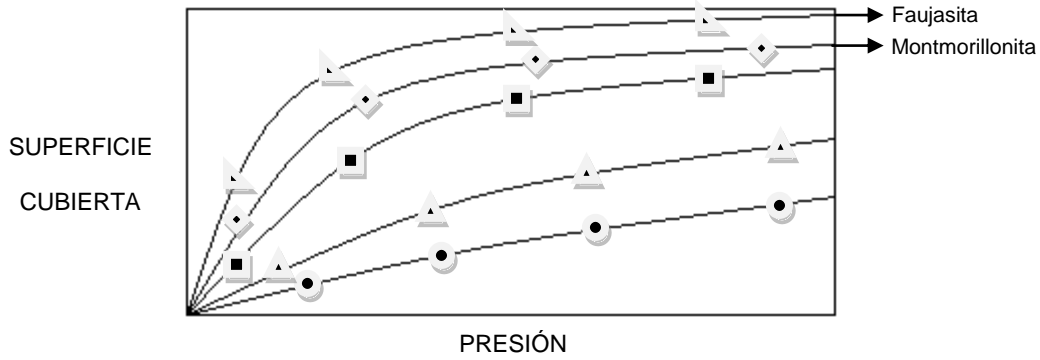


Figura III.12. Demostración de la etapa 1.

Etapa 2: Descifrar de un par de valores, presión y temperatura, el que represente la superficie cubierta (figura III.13).

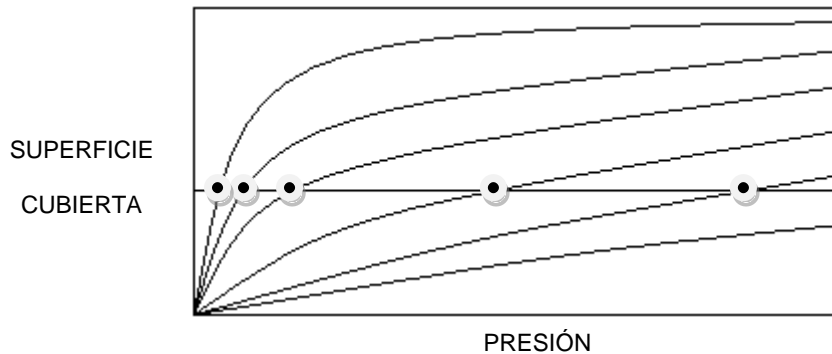


Figura III.13. Demostración de la etapa 2.

Etapa 3: La ecuación de Clausius Clapeyron:

$$\left( \frac{\partial \ln P}{\partial \frac{1}{T}} \right)_{const\theta} = \frac{\Delta H_{ads}}{R} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

- $\ln P$**  = Logaritmo natural de la presión
- $1/T$**  = La inversa de la temperatura
- $\Delta H_{ads}$**  = Entalpia de adsorción

Podría ser entonces aplicada a un conjunto de datos y trazos (***P-T***) y una representación gráfica de ***lnP*** vs ***1/T*** dando una línea recta; la pendiente de esta recta representa la entalpía de adsorción (figura III.14).

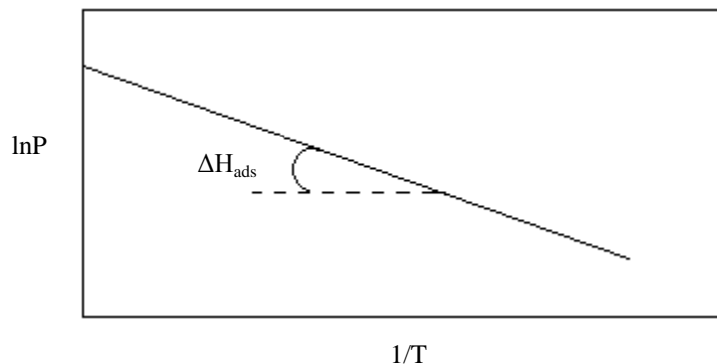


Figura III.14. Obtención del valor de entalpía de adsorción <sup>[71]</sup>

El valor obtenido para la entalpía de adsorción, es el que pertenece a la superficie cubierta para la cual el dato ***P-T*** fue obtenido, pero las etapas 2 y 3 pueden ser representadas por diferentes superficies cubiertas que permitan la obtención de la entalpía de adsorción entre un intervalo.

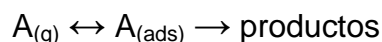
Este método es aplicable solamente cuando el proceso de adsorción es termodinámicamente reversible.

### **Aplicaciones: Cinética de las reacciones catalíticas <sup>[72]</sup>**

Una de las aplicaciones es predecir como la cinética de ciertas reacciones heterogéneamente catalizadas podrían variar con la presión parcial de los gases reactantes sobre la superficie catalítica, usando la expresión de equilibrio de la isoterma de Langmuir para el equilibrio de las superficies cubiertas.

#### **Ejemplo 1. Descomposición unimolecular:**

Al considerar la descomposición de la superficie de una molécula (***A<sub>ads</sub>***), el proceso sería:



Se supone que:

1. La reacción de descomposición ocurre uniformemente a través de los sitios de la superficie en los cuales la molécula ***A*** podría ser adsorbida y no es restringida a un número limitado de sitios especiales.
2. Los productos están débilmente unidos a la superficie y una vez formados son rápidamente desorbidos.

3. La etapa determinante de la velocidad (ads) es la etapa de descomposición en la superficie.

Bajo estas circunstancias la molécula de  $A_{(ads)}$  sobre la superficie está en equilibrio con la molécula en  $A_{(g)}$  y se puede predecir la concentración de la superficie de  $A$  por la isoterma de Langmuir, utilizando la Ec. (6):

$$\theta = \frac{bP}{(1+bP)}$$

La velocidad de descomposición de la superficie, está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Velocidad} = k \theta$$

En este caso se está asumiendo que la descomposición de  $A_{(ads)}$  ocurre en una etapa de reacción unimolecular elemental y que la cinética es de primer orden con respecto a la concentración de la superficie de este intermedio adsorbido.

Sustituyendo para la superficie cubierta,  $\theta$ , da la expresión requerida para la velocidad en términos de la presión del gas sobre la superficie.

$$\text{Velocidad} / k = \theta$$

Por lo tanto:

$$\text{velocidad} = \frac{kbP}{(1+bP)} \quad \text{Ec. (13)}$$

Es útil considerar dos límites extremos:

Límite 1:  $bP \ll 1$ ; entonces  
 $(1+bP) \sim 1$  y la velocidad  $\sim kbP$ .

Por ejemplo, una reacción de primer orden (con respecto a la presión parcial de  $A$ ) con una constante de velocidad aparente de primer orden,  $k' = kb$ .

Esto es el límite de baja presión (o unión débil, por ejemplo,  $b$  pequeña); bajo estas condiciones de la superficie cubierta en estado estable ( $\theta$ ), de la molécula reactante es muy pequeña.

Por lo tanto la velocidad de adsorción es:

$$V_1 = k_1 (1-\theta) P \quad \text{Ec. (14)}$$

Limite 2:  $bP \gg 1$ ; entonces  
 $(1+bP) \sim bP$  y la velocidad  $\sim k$ .

Por ejemplo, una reacción de orden cero (con respecto a la presión parcial de **A**).

Esto es un límite de alta presión o unión fuerte por ejemplo **b**; bajo estas condiciones la superficie cubierta de la molécula reactante está en estado estable,  $\theta$ , y cerca de la unidad.

Por lo tanto la velocidad de desorción es:

$$V_2 = k_2 \theta \quad \text{Ec. (15)}$$

En realidad, la velocidad demuestra la misma variación de presión mientras se cubre la superficie, lo que no es de sorprender, puesto que es directamente proporcional a  $\theta$  (figura III.15).

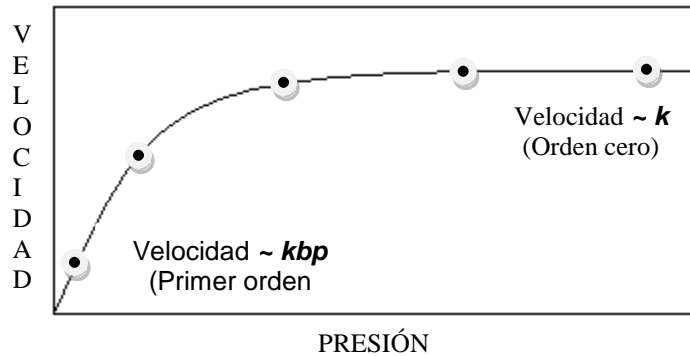
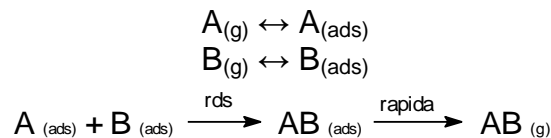


Figura III.15. Demostración de variación de presión. [72]

En la figura III.15, se muestra que la reacción superficial entre las dos especies adsorbidas es la etapa determinante de la velocidad.

**Ejemplo 2: Reacción bimolecular entre adsorbatos moleculares:**

Se debe considerar una reacción Langmuir-Hinshelwood del tipo siguiente:



Si las dos moléculas son adsorbidas sobre la superficie y se mezclan libremente, entonces la velocidad de la reacción, será dada por la etapa de combinación de la superficie bimolecular.

$$\text{Velocidad} = k \theta_A \theta_B$$

Para un solo adsorbente molecular la superficie cubierta (como la dada por las isotermas de Langmuir) es la Ec. (6):

$$\theta = \frac{bP}{(1+bP)}$$

Donde dos moléculas (A y B) están compitiendo por los mismos sitios de adsorción, donde las expresiones relevantes son las siguientes:

$$\theta_A = \frac{b_A P_A}{1+b_A P_A + b_B P_B} \quad \text{y} \quad \theta_B = \frac{b_B P_B}{1+b_A P_A + b_B P_B} \quad \text{Ec. (16)}$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la expresión de velocidad:

$$\text{Velocidad} = k \theta_A \theta_B = \frac{k b_A P_A b_B P_B}{(1+b_A P_A + b_B P_B)^2} \quad \text{Ec. (17)}$$

Es interesante ver varios límites extremos:

Límite 1:  $b_A P_A \ll 1$  y  $b_B P_B \ll 1$

En este límite  $\theta_A$  y  $\theta_B$  ambos son muy bajos y por lo tanto:

$$\text{Velocidad} \rightarrow k b_A P_A b_B P_B = k' P_A P_B$$

Es un ejemplo de primer orden en ambos reactantes.

Límite 2:  $b_A P_A \ll 1 \ll b_B P_B$

En este límite  $\theta_A \rightarrow 0$ ,  $\theta_B \rightarrow 1$ , por lo tanto

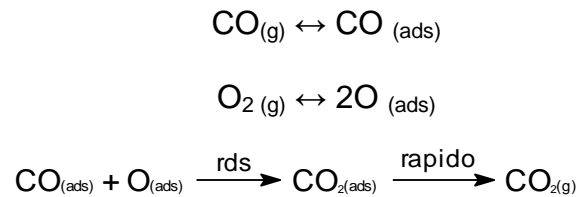
$$\text{Velocidad} \rightarrow k b_A P_A / (b_B P_B) = k' P_A / P_B$$

Es un ejemplo de primer orden en **A**, pero de primer orden negativo para **B**.

De lo anterior se deduce que, dependiendo de la presión parcial y la fuerza de enlace de los reactantes, se dará un modelo para el esquema de reacción que aumenta una variedad de cinéticas aparentes: estos ponen de relieve los peligros inherentes en los procesos inversos. <sup>[72]</sup>

### **Ejemplo 3: Reacción de oxidación de CO**

Sobre superficies de metales preciosos, como el Pt, la reacción de oxidación de CO se lleva a cabo por un mecanismo de Langmuir – Hinshelwood, del siguiente tipo:



Como el CO<sub>2</sub> es comparativamente débil en su unión sobre la superficie, la desorción de esta molécula, es relativamente rápida y en muchas circunstancias ésta es la reacción entre la superficie y las dos especies adsorbidas que es la etapa determinante de la velocidad.

Si dos moléculas adsorbidas, suponiendo que estas se mueven sobre la superficie y libremente se mezclan, entonces la velocidad de la reacción será dada por la siguiente expresión de velocidad, y representa la etapa de combinación bimolecular en la superficie.

$$\text{Velocidad} = k \theta_{co} \theta_o \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde las dos especies, una de las cuales esta molecularmente adsorbida y la otra disociadamente adsorbida, están compitiendo por los mismos sitios de adsorción, entonces las expresiones relevantes son:

$$\theta_{co} = \frac{b_{co}P_{co}}{(1 + \sqrt{b_o P_{o_2}} + b_{co}P_{co})} \quad \text{y} \quad \theta_o = \frac{\sqrt{b_o P_{o_2}}}{1 + \sqrt{b_o P_{o_2}} + b_{co}P_{co}}$$

Sustituyendo estas expresiones en la expresión de velocidad da:

$$\text{Velocidad} = k \theta_{co} \theta_o = \frac{k b_{co} P_{co} \sqrt{b_o P_{o_2}}}{(1 + \sqrt{b_o P_{o_2}} + b_{co} P_{co})^2}$$

Es interesante para determinar ciertos límites en los que CO tiene una mayor unión sobre la superficie tal que:

$$b_{co}P_{co} \gg (1 + \sqrt{(b_{co}P_{O_2})})$$

Entonces:

$$(1 + \sqrt{(b_{co}P_{O_2})}) + b_{co} \frac{P_{co}}{P_{co}} \cong b_{co} \frac{P_{co}}{P_{co}}$$

Entonces la ecuación de velocidad simplificada se representa:

$$Velocidad \approx \frac{k \sqrt{b_{co}P_{O_2}}}{b_{co} \frac{P_{co}}{P_{co}}} = k \frac{P_{O_2}^{1/2}}{P_{co}} \quad Ec. (19)$$

En este límite, la cinética es de medio orden con respecto a la presión de la fase gaseosa de la molécula de oxígeno, pero de orden negativo con respecto a la presión parcial de CO, por ejemplo, el CO actúa como un veneno e incrementa su presión lentamente disminuyendo la reacción. Esto es porque el CO está fuertemente unido a la superficie, lo que bloquea a la adsorción del oxígeno, y sin suficientes átomos de oxígeno sobre la superficie la velocidad de la reacción se reduce.<sup>[71]</sup>

Langmuir derivó una relación para  $q$  y  $C$  basado sobre algunas suposiciones completamente razonables, estas son: una superficie uniforme, una sola capa de material adsorbente y temperatura constante. La velocidad de unión a la superficie será proporcional al tiempo, fuerza impulsora y área-fuerza impulsora de la concentración del fluido, el área es la cantidad de superficie limpia. Si la fracción de superficie cubierta es  $\phi$ , la velocidad por unidad de área será:

$$Velocidad \text{ de entrada} = k_1 c (1-\phi)$$

La evaporación de la superficie es proporcional a la cantidad de superficie cubierta

$$Velocidad \text{ salida} = k_2 \phi$$

Donde:

$k_1$  y  $k_2$  = Son las constantes de velocidad de reacción de concentración en el fluido.

$\phi$  = Fracción de la superficie cubierta

De acuerdo con el equilibrio, las dos velocidades son iguales y se observa que:

$$\phi = \frac{k_1 C}{1 + k_2 C}$$

Dividiendo el numerador y denominador por  $k_1$  y haciendo uso del hecho que  $q$  será proporcional a  $\phi$ , la forma útil de la ecuación es:

$$q = \frac{qm k_A C}{1 + k_a C} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

$qm = q$  para una mono capa completa

$k_A =$  coeficiente de la concentración

Tomando el recíproco y re-arreglando:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{qm} + \frac{1}{k_a qm C}$$

$$\frac{1}{q} \text{ contra } \frac{1}{c} \quad \frac{1}{k_a qm} \quad \frac{1}{qm}$$

La gráfica  $1/q$  vs  $1/c$ , indicará una línea recta dependiente  $1/k_a qm$  y una intercepción de  $1/qm$ . La gráfica muestra los puntos de la línea para ambas ecuaciones de Freundlich y Langmuir.

La ecuación graficada con los datos se presenta en las figuras III.16 y III.17.

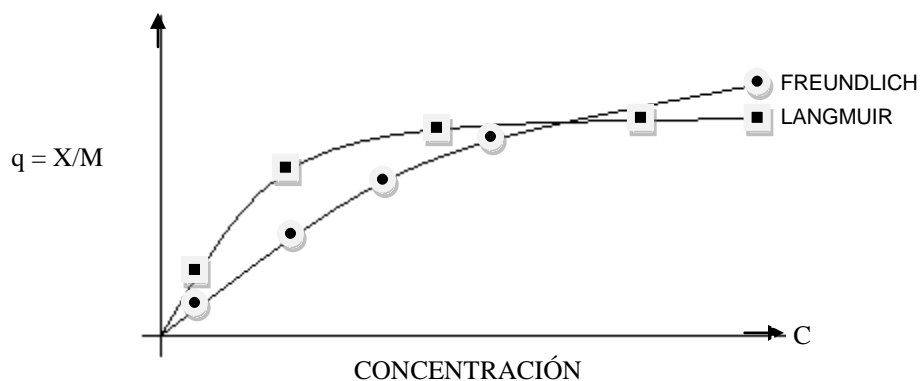


Figura III.16. Curvas de Freundlich y Langmuir <sup>[71]</sup>

Trazar las gráficas es sencillo, ya que las ecuaciones son manejadas por separado. El concepto es imaginar un conjunto de datos y observar que cualquier ecuación puede ser usualmente utilizada (figura III.17).



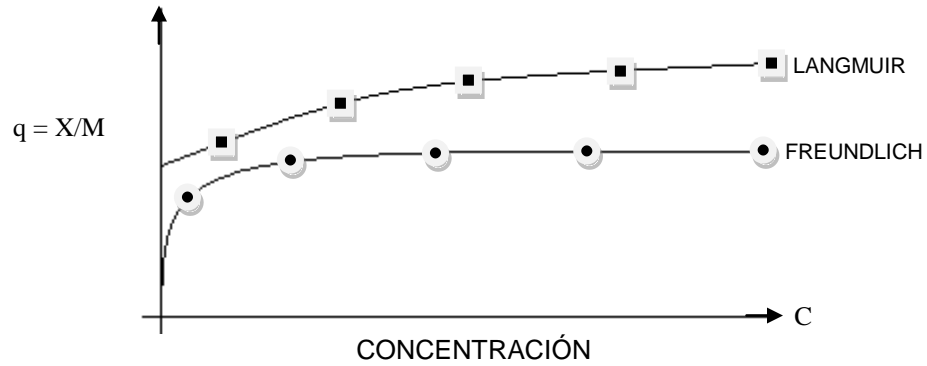


Figura III.17. Curvas de concentración de Freundlich y Langmuir

La tendencia de las curvas de concentración, principalmente la curva de Langmuir, es más uniforme con respecto a la concentración.

# **CAPÍTULO IV**

## **PRUEBAS DE CAMPO**

## IV.1 Descripción de las pruebas

Se realizó tratamiento a la zeolita faujasita (X,Y) en el laboratorio, para posteriormente realizar las pruebas correspondientes, siguiendo los pasos que a continuación se describen:

1. Se lavó la zeolita dos veces con agua destilada a una temperatura de 180°C con agitación constante. Por un tiempo de 72 h, posteriormente se enfrió a una temperatura de 22°C, con el fin de quitar impurezas.
2. Se secó la zeolita sobre una malla de 300 que corresponde a 50  $\mu\text{m}$ , a una temperatura de 200°C por 120 minutos en una estufa de convección.
3. Para el control de secado, se realizaron pruebas de humedad, en la resina por el método de Karl-Fisher y un medio de piridina, dicho análisis determinó que aun tenía agua, por lo que nuevamente se sometió a secado a una temperatura de 300°C por 120 minutos; condiciones con las que se logró eliminar el agua de la resina.
4. Se empacó un dispositivo de aluminio de 1.0  $\text{ft}^3$  de capacidad con la zeolita-faujasita provisto de una malla de 300 que corresponde a 50  $\mu\text{m}$ . Esta malla se colocó en las cuatro partes laterales con la finalidad de que circule el aire por ella a presión atmosférica, y en la parte superior e inferior del dispositivo se colocó fibra de vidrio, para evitar que el adsorbente se fugue (figura IV.1).

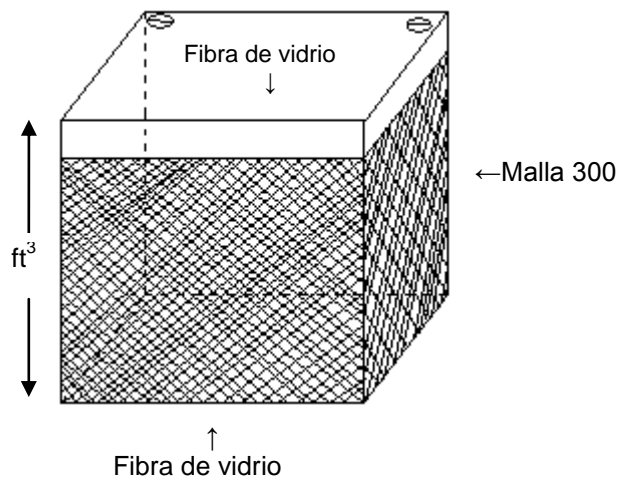


Figura IV.1 Dispositivo de aluminio de 1 $\text{ft}^3$

5. El ensayo experimental se realizó en la Cd. de México. Se procedió a poner en operación el equipo de laboratorio (figura IV.2), que consiste en un soplador conectado a la atmósfera contaminada, y se mantuvo por 32h la adsorción del aire sobre el dispositivo de adsorción, pasando la corriente a través del analizador de gases, en donde se registraba cada 4h la actividad del adsorbente.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

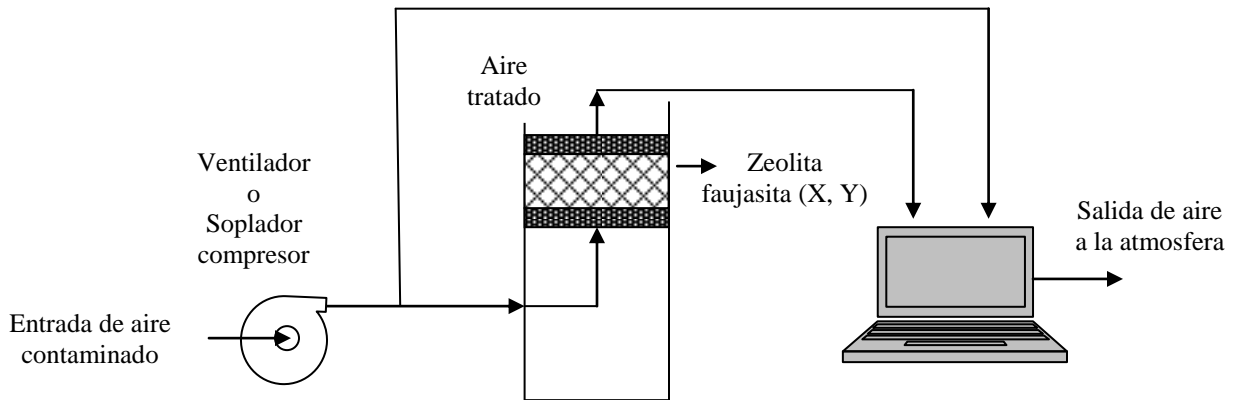


Figura IV.2. Equipo de laboratorio

6. Los resultados obtenidos durante la experimentación se muestran en la figura IV.3, donde podemos observar que la isoterma se vuelve asintótica en un tiempo de 20h.

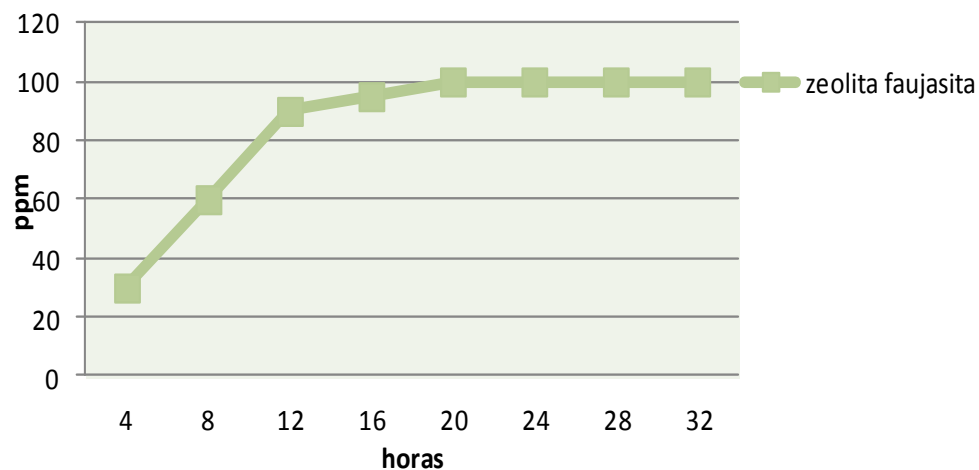


Figura IV.3. Gráfica de la adsorción de la faujasita

7. Se siguió tomando muestras, siempre y cuando la concentración de aire contaminado en la Ciudad de México, estuviera en 27.5 ppm de CO y 0.525 ppm de NO<sub>2</sub>. El periodo de análisis fue de cuatro meses (Septiembre a Diciembre), durante los cuales se supone un periodo de inversión térmica. Con estas pruebas se logró una concentración de CO de 11.0 ppm y de NO<sub>2</sub> de 0.21 ppm, que corresponden a 100 puntos IMECA.

La reacción entre la trimetilamina y el bromuro de n-propilo en fase gas-líquido, ha sido estudiada por Winkler y Hinshelwood.<sup>[63]</sup> Las soluciones iniciales de trimetilamina y bromuro n-propilo se mezclan con benceno al 0.2 molar en un matraz Erlenmeyer de boca esmerilada, y se coloca en un baño María a una temperatura constante de 139°C.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

El matraz Erlenmeyer de boca esmerilada se enfrió en cada intervalo de tiempo para detener la reacción, y analizar los contenidos. El análisis depende del hecho de que el producto, una sal de amonio cuaternaria, esté completamente ionizada. Por lo tanto la concentración de iones bromuro puede ser estimado por titulación. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla IV.1.

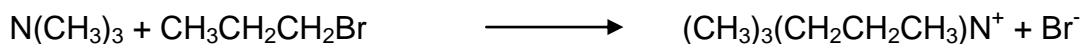
Tabla IV.1. Por ciento de conversión de iones bromuro

Muestra	Tiempo minutos	Conversión %
1	13	46.67
2	34	83.98
3	59	92.85
4	120	97.55

Estos resultados son representativos para la investigación de descontaminación del aire en lugares cerrados, ya que representan una reacción de primer orden en donde los reactivos de trimetilamina y el bromuro de n-propilo se consideran como reactivos adsorbentes en la zeolita-faujasita (X, Y). El bromuro de n-propilo se adsorbe en la zeolita, y es el que va a reaccionar formando el trimetil propilamonio de acuerdo al grupo adsorbido y a la velocidad de reacción de este producto.

Y a partir de esta información se determina la velocidad de reacción específica de primer y segundo orden,  $k_1$  y  $k_2$ , suponiendo que la reacción es irreversible sobre el intervalo de conversión. Utilizando tanto el método diferencial e integral y comparando los resultados, surge la pregunta ¿Qué ecuación de velocidad se adapta mejor a los datos experimentales?

Para responder a lo anterior se realizan las siguientes consideraciones:



Dado que las concentraciones de los reactivos y productos son pequeñas y la temperatura es constante, la densidad también se puede suponer que es constante, sin error. Entonces, las ecuaciones de velocidad de primer y segundo orden, en función de la concentración de iones bromuro  $C_B$ , se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\frac{dC_B}{d\theta} = k_1 C_T \quad \text{Ec. (21)}$$

$$\frac{dC_B}{d\theta} = k_2 C_T C_P \quad \text{Ec. (22)}$$

Donde:

$C_T$  = Concentración de trimetilamina, g mol/L

$C_P$  = Concentración de bromuro de n-propilo, g mol/L

Método de integración global. Para integrar las ecuaciones de velocidad, la concentración de la trimetilamina puede ser expresada en términos de su concentración inicial  $C_{To}$ , por lo tanto, la concentración de iones bromo se expresa de la siguiente manera:

$$C_T = C_{To} - C_B$$

Del mismo modo,

$$C_P = C_{Po} - C_B$$

Para el caso de primer orden

$$\frac{dC_B}{d\theta} = k_1 (C_{To} - C_B)$$

Integrando, y teniendo en cuenta que  $\theta = 0$ ,  $C_B = 0$ , se tiene:

$$\ln \frac{C_{To}}{C_{To} - C_B} = k_1 \theta \quad \text{Ec. (23)}$$

Para el caso de segundo orden:

$$\frac{dC_B}{d\theta} = k_2 (C_{To} - C_B)(C_{Po} - C_B)$$

e integrando, resulta la ecuación:

$$\frac{1}{C_{To} - C_{Po}} \ln \frac{(C_{To} - C_B)C_{Po}}{(C_{Po} - C_B)C_{To}} = k_2 \theta \quad \text{Ec. (24)}$$

Las ecuaciones (23) y (24) dan las expresiones para las concentraciones de iones bromo en cualquier momento y  $\theta$  son adecuados para cualquier reacción irreversible por lotes de primer y de segundo orden, siempre y cuando las concentraciones iniciales de los productos sean cero. La expresión de segundo

orden tiene otra restricción, que las concentraciones de reactivos iniciales no son iguales, ya que bajo estas circunstancias la ecuación (24) se indefine en la reacción de este ejemplo,  $C_{To} = C_{Po} = 0.1$ , por lo que la ecuación (24) no es aplicable. Sin embargo, la ecuación diferencial se puede escribir:

$$\frac{dC_B}{d\theta} = k_2(C_o - C_B)^2$$

$$C_{To} = C_{Po} = C_o$$

E integrando la ecuación diferencial da una expresión adecuada para  $C_B$  en términos de  $\theta$ :

$$\frac{C_B}{C_o(C_o - C_B)} = k_2\theta \quad \text{Ec. (25)}$$

La conversión puede ser expresada en términos de la concentración del ión bromuro como  $C_B = 0.1x$ , ya que la concentración máxima de iones de bromuro, corresponde a una reacción completa de 0.1 molar.

La evaluación de  $k_1$  y  $k_2$ , con la primera muestra, fue la siguiente:

$$\begin{aligned} C_B &= 0.1 \times 0.4667 = 0.0466 \\ \theta &= 13 \times 60 = 780 \text{ segundos} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación. (23), se obtiene **segundos<sup>-1</sup>**:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{1}{\theta} \ln \frac{C_{To}}{C_{To} - C_B} = \frac{1}{780} \ln \frac{0.1}{0.1 - 0.0466} \\ &= 8.04 \times 10^{-4} \text{ segundos}^{-1} \end{aligned}$$

Del mismo modo, a partir de la ecuación (25), se obtienen **L/(gmol)(segundo)**

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{1}{\theta} \frac{C_B}{C_o(C_o - C_B)} = \frac{1}{780} \frac{0.0466}{0.1(0.1 - 0.04662)} \\ &= 0.01121 \text{ L/(gmol)(segundo)} \end{aligned}$$

La tabla IV.2 resume los resultados obtenidos de una manera similar para las cuatro muestras.

**DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES**

Tabla IV.2. Tasas específicas de reacción para trimetilamina y el bromuro de n-propilo

Muestra	Tiempo (segundos)	Concentración $C_B$ (g mol/L)	$k_1 \times 10^{-4}$ segundos <sup>-1</sup>	$k_2$ L/(gmol)(segundo)
1	780	0.0466	8.04	0.0112
2	2,040	0.0839	8.95	0.0257
3	3,540	0.0928	7.45	0.0367
4	7,200	0.0975	5.12	0.0552

Los valores de  $k_1$ , no muestran una tendencia definida, de lo cual se deduce que la reacción no es de primer orden, sin embargo, los valores de  $k_2$ , son del mismo orden de magnitud, mostrando una tendencia definida, por lo tanto se ajusta a un modelo de segundo orden.

Método diferencial. En la figura IV.4 la concentración de iones bromo en función del tiempo de reacción, la pendiente de la curva en cualquier punto,  $dC_B/d\theta$ , es igual a  $r$ , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$r = -\frac{dC_T}{d\theta} = \frac{dC_B}{d\theta} \quad \text{Ec. (26)}$$

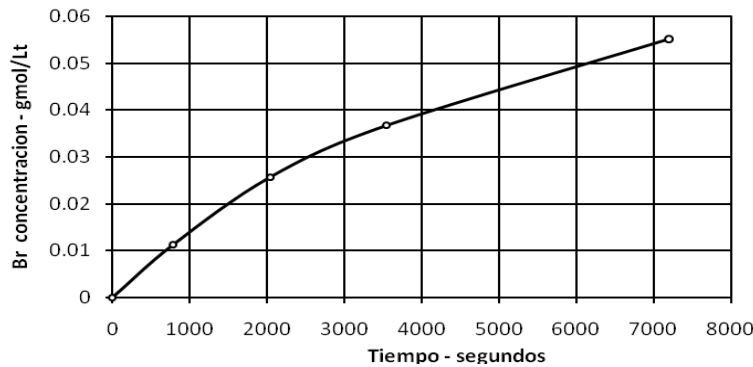


Figura IV.4 Concentración de iones bromo vs. Tiempo

La evaluación gráfica de la pendiente en una serie de concentraciones vs tiempo, se puede hacer mediante la tangente de la curva. Los resultados se muestran en la tabla IV.3.

Tabla IV.3. Evaluación gráfica de la pendiente de la curva

Concentración, g mol/L		Velocidad, $-dC_T/d\theta$ gmol/(L)(segundo)
Br	Trimetilamina	
0.0	0.10	$1.58 \times 10^{-5}$
0.01	0.09	$1.38 \times 10^{-5}$
0.02	0.08	$1.14 \times 10^{-5}$
0.03	0.07	$0.79 \times 10^{-5}$
0.04	0.06	$0.64 \times 10^{-5}$
0.05	0.05	$0.45 \times 10^{-5}$



## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

Se determina la equivalencia de los resultados de la reacción, contra los resultados de la zeolita faujasita (X,Y), hecho en un tubo con hidróxido de sodio y titulada con ácido acético como se muestra en la figura IV.5.



Figura IV.5. Muestra de zeolita faujasita (X,Y) en hidróxido de sodio para titulación

La tabla IV.4 resume los resultados obtenidos de una manera similar para las cuatro muestras, con concentraciones específicas de hidróxido de sodio y ácido acético.

Tabla IV.4. Concentraciones específicas de hidróxido de sodio y ácido acético

Muestra	Tiempo (segundos)	Concentración $C_B$ (g mol/L)	$k_1 \times 10^{-4}$ segundos $^{-1}$	$k_2$ L/(g mol)(segundo)
1	780	0.0111	1.51	0.00160
2	2,040	0.0256	1.45	0.00169
3	3,540	0.0366	1.29	0.00163
4	7,200	0.0551	1.11	0.00170

Los valores de  $k_1$  para el sistema de reacción de hidróxido de sodio y ácido acético, muestran una tendencia definida con el tiempo, y por lo tanto queda demostrado que la reacción de primer orden no explica satisfactoriamente los datos cinéticos, contrario al caso de  $k_1$  en trimetilamina y el bromuro de n-propilo.

Los valores de  $k_2$ , son casi idénticos, pero las variaciones no muestran una tendencia definida.

La figura IV.6 muestra los resultados gráficos obtenidos de las cuatro muestras.

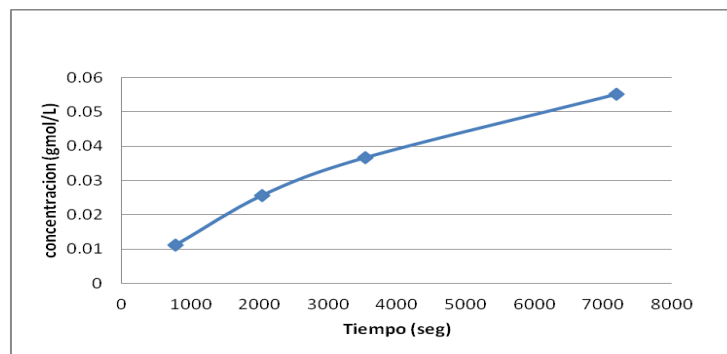


Figura IV.6. Concentración vs. Tiempo

Existe un punto el cual corresponde al volumen necesario adsorbido, para dar una capa monomolecular del líquido en la superficie. De allí, que el área del sólido para un peso definido de zeolita faujasita (X,Y) de 1.99g, sea de 119.4 m<sup>2</sup> (área de carbón), es decir 60 m<sup>2</sup>/g.

## IV. 2. Presentación de resultados

### Método experimental

Experimento: “Determinación de la Isotherma de Adsorción”

Se realizaron las pruebas utilizando hidróxido de sodio para titulación y ácido acético para la adsorción del contaminante.

### Datos experimentales

#### Cálculos previos:

Obtención de solución de hidróxido de sodio 0.4 M:

$$[\text{NaOH}] = n \text{ NaOH} / \text{Vsl}'n$$

Donde Vsl'n = 1 L, despejando nNaOH

$$n\text{NaOH} = [\text{NaOH}] * \text{Vsl}'n = 0.4 \text{ mol/L} * 1\text{L} = 0.4 \text{ mol}$$

Entonces:

$$m\text{NaOH} = n\text{NaOH} * \text{PMNaOH} = 0.4 \text{ mol} * 39.996\text{g/mol} = 15.9984 \sim 16\text{g}$$

Esto significa que para obtener una solución de hidróxido de sodio al 0.4M es necesario diluir 16g del mismo en un litro de agua destilada.

En la tabla IV.5 se observa los datos de la zeolita faujasita (X,Y) en gramos y los mililitros de hidróxido de sodio en el que se disolvió la muestra.

## DISEÑO DE UN PURIFICADOR DE AIRE, PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN INTERIORES

---

Tabla IV.5. Determinación de la isoterma de adsorción

<b>Tubo</b>	<b>Zeolita faujasita (X, Y) g</b>	<b>NaOH (mL) adsorbido</b>
1	2.00	142.25
2	2.00	95.2
3	2.00	93.25
4	2.00	82.1

En cuatro matraces Erlenmeyer se pusieron 2g de zeolita faujasita (X,Y) en cada uno y se titularon con hidróxido de sodio 0.4M valorado previamente con la finalidad de cuantificar el contenido de ácido acético.

Los resultados que se obtuvieron en la muestra con zeolita faujasita (X,Y) y ácido acético fueron buenos, porque se obtuvieron los valores requeridos de hidróxido de sodio totalmente adsorbido de la muestra en zeolita faujasita(X;Y), para titular por la solución de ácido acético.

Los datos obtenidos se utilizaron para graficar la isoterma de Langmuir. Se considera que sale solamente un fragmento y posiblemente sea por falta de temperatura.

Se hizo pasar aire contaminado con gases de NO<sub>x</sub> del a través de una lluvia de agua purificada al equipo de adsorción y soporte seleccionado, para tratar el aire con la zeolita faujasita (X,Y).

Por otro lado, el resultado de campo obtenido mediante varias muestras que se hicieron durante el tiempo en que se estaba con la atmosfera altamente contaminada; se analizaron paralelamente por medio del equipo y se encontraron los datos que corresponden al máximo de la gráfica de Langmuir, por lo que se consideró obtener la máxima eficiencia y resultados satisfactorios.

En la tabla IV.6 se resumen los resultados de la concentración en moles de ácido acético para cada uno de los cuatro matraces que se utilizaron en la experimentación.

Tabla IV.6. Resumen de resultados

<b>Erlenmeyers</b>	<b>[s'ñ](mol/l)</b>	<b>moles iniciales</b>	<b>moles finales</b>	<b>masa<sub>ads</sub></b>
1	17.4	1.740	0.057	27.1512
2	13.92	1.392	0.038	18.13636
3	10.44	1.044	0.037	17.2398
4	6.96	0.696	0.033	14.4880

Para la predicción del comportamiento de la zeolita faujasita (X,Y) se utilizaron los datos que se muestran en la tabla IV.7 y con ellos se trazó la isoterma.

Tabla IV.7. Datos para predicción del comportamiento de la zeolita faujasita (X, Y) activado y trazo de la isoterma.

<b>c/x</b>	<b>1/V</b>	<b>1/C</b>	<b>log V</b>	<b>log C</b>
0.841	0.007	0.044	2.153	1.357
0.680	0.010	0.066	1.979	1.183
0.506	0.011	0.134	1.969	0.873
0.332	0.012	0.152	1.914	0.817

### IV.3 Análisis y discusión de resultados

La relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la presión o concentración de equilibrio a una temperatura constante se denomina isoterma de adsorción.

Al graficar  $\log v$  vs  $\log c$ , dió como resultado una línea recta cuya pendiente positiva es igual a  $1/n$  que es una constante. Esta isoterma es útil para predecir el comportamiento de la zeolita faujasita (X,Y) en la mayoría de las aplicaciones en fase líquida, evidenciando que a medida que aumenta la concentración del ácido acético en la solución, aumenta la cantidad o el volumen de la base titulante, retardando la llegada al equilibrio (figura IV.7).

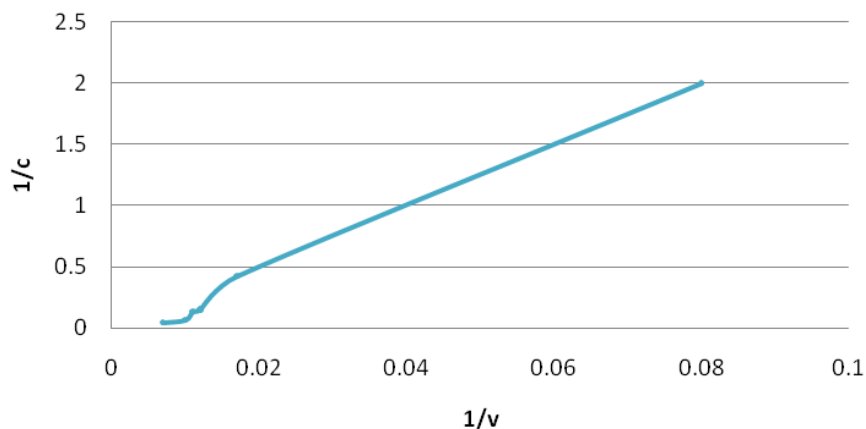


Figura IV.7 Ecuación de Langmuir  $1/c$  vs  $1/v$

En la figura anterior, se puede observar que la recta  $1/c$  vs  $1/v$ , es un modelo sencillo del comportamiento del fenómeno de adsorción. Su magnitud depende de la temperatura.

Una vez que se han adsorbido los gases de CO y NO<sub>2</sub> en el equipo, después de un tiempo largo son removidos de la columna por medio de calentamiento a altas temperaturas, se va el CO y NO<sub>2</sub>; si se requiere se hace un tratamiento fuera del equipo.

En la investigación se empleó como soporte el carbón activado y como adsorbente la zeolita faujasita (X,Y). Los dos materiales son adsorbentes y para diferenciar cada uno de estos materiales se hace por el área de adsorción que ocupa cada uno: el carbón activado tiene 80m<sup>2</sup>/g y la zeolita faujasita (X,Y) tiene 60m<sup>2</sup>/g, lo que da una diferencia de 20m<sup>2</sup>/g en el área de adsorción. Para que se iguale el área de adsorción se puso menor cantidad de carbón activado e igualar la capacidad de adsorción de la zeolita faujasita (X,Y).

La adsorción es un intercambio iónico, si la zeolita faujasita (X,Y) tiene un ión más a tractor de contaminantes y mayor volumen de poro (0.53 cm<sup>3</sup> de agua/cm<sup>3</sup> de cristal), será este en donde se tenga la mayor adsorción.

Las isotermas de adsorción tanto de Freundlich como de Langmuir son específicas para cada compuesto; en consecuencia los cálculos para la isoterma de Langmuir de la adsorción del contaminante de monóxido de carbono (CO) se realizan a partir de la masa de CO por la diferencia entre la masa inicial y la masa final.

Así, utilizando la expresión de Langmuir:

$$q = \frac{x}{M} = \frac{y_m bp}{1 + bp} \quad \text{Ec. (27)}$$

Donde:

- y<sub>m</sub>** = Masa adsorbida
- b** = Constante = 1.
- P** = Concentración

Sustituyendo los valores de la tabla IV.6 en la ecuación (27), se calcula la expresión de Langmuir (**q**).

$$q_1 = \frac{27.1512 * 1 * 0.0111}{1 + (1 * 0.0111)} = 0.29807$$

Los valores de la isoterma de adsorción de Langmuir (**q**) se presentan en la tabla IV.8.

Tabla IV. 8 Valores de la isoterma de adsorción

$Y_m = m_{ads}$	$P = C_B$	$q$
27.1512	0.0111	0.29807
18.1363	0.0256	0.4527
17.2398	0.0366	0.6087
14.4880	0.0551	0.7566

Con los datos de la tabla anterior se grafican los valores de concentración para dar la isoterma de Langmuir (figura IV.8.)

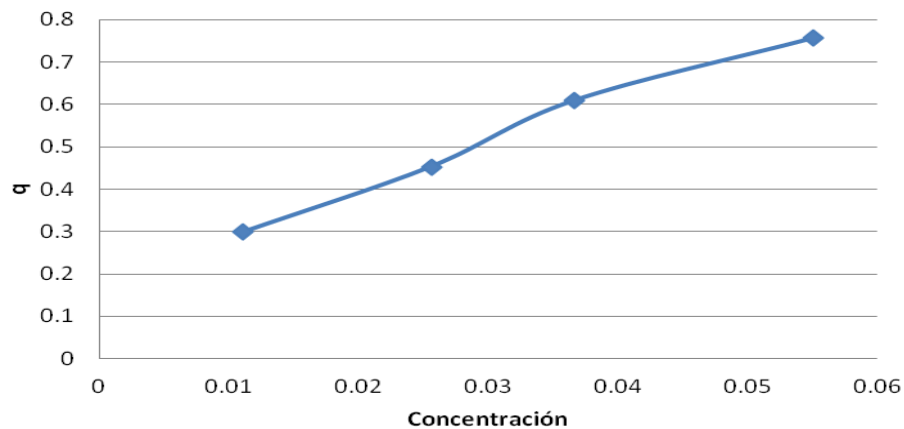


Figura IV. 8 Isoterma de Langmuir  $q$  vs  $C$

Realizando la regresión lineal para ajustar la gráfica  $q$  vs  $C$ , se tienen los valores de a, b y  $R^2$  (tabla IV.9).

Tabla IV.9 Valores obtenidos a partir de la regresión lineal

a =	10.5955
b =	0.1889
$R^2 =$	0.9879

Con los valores obtenidos se ajusta la grafica de la isoterma de Langmuir de adsorción (fig. IV.9).

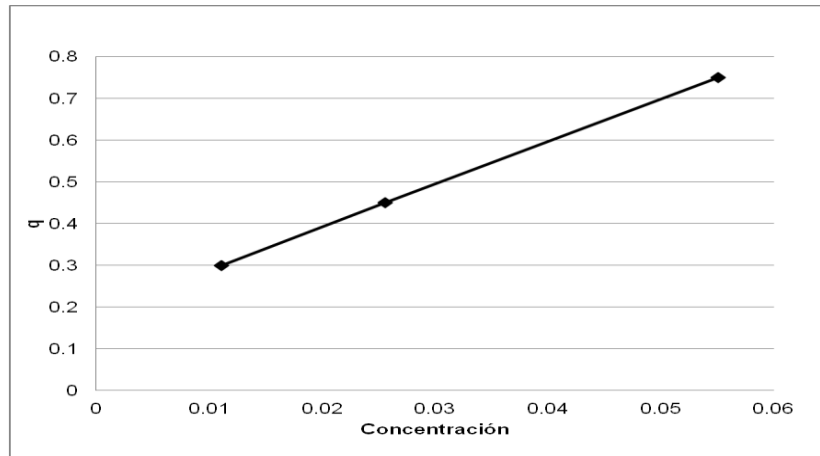


Figura IV. 9 Representación de la regresión lineal de la isoterma de Langmuir

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## **CONCLUSIONES**

- A medida que aumenta la concentración del adsorbato, aumenta la relación entre la cantidad adsorbida por gramo de zeolita faujasita (X,Y).
- La zeolita faujasita (X,Y) proporciona datos de adsorción de manera eficiente y rápida, debido a la velocidad con que llega al equilibrio.
- Los soportes más utilizados fueron el caolín y el carbón activado en los que se adsorbieron las zeolitas activadas.
- Los elementos a considerar son los soportes en el que van los adsorbedores impregnados de caolín. El soporte es inerte ante la zeolita.
- El adsorbedor seleccionado fue la faujasita y se soporto en carbón activado o caolín.
- Los elementos a considerar son los soportes en el que van los adsorbedores impregnados de caolín. El soporte es inerte ante la zeolita.
- El adsorbedor seleccionado fue la faujasita y se soportó en carbón activado o caolín.
- Aunque el tamaño de las partículas del faujasita (X,Y) no influye directamente en la adsorción, tal como lo reporta la literatura, para disminuir el tiempo de contacto, es necesario que ocurra la adsorción de manera apreciable.
- Cuando se emplea carbón activado pulverizado en los procesos de adsorción es recomendable el empleo de filtros especiales para obtener mayor eficiencia en la operación de filtración.

## **APORTACIONES**

- Aplicar la ingeniería ambiental para eliminación de contaminantes del aire en interiores
- Contribuir al aumento de la calidad de vida en México.
- Proponer un desarrollo tecnológico con base en zeolitas
- Aportar los elementos para que en un futuro próximo se pueda incluir un purificador de agua y aire en el diseño de una casa sustentable.

## RECOMENDACIONES

- Se puede realizar esta experiencia práctica con carbón granular durante el mismo tiempo de agitación para establecer comparaciones con los resultados obtenidos con el carbón pulverizado.
- Debido a las dificultades para determinar experimentalmente las temperaturas de adsorción, se puede recomendar aplicar las ecuaciones de Van't Hoff.
- A partir de la determinación de las presiones necesarias para la adsorción a dos temperaturas diferentes, se pueden estudiar las películas superficiales empleando un equipo que se conoce como balanza superficial.
- Continuar con el estudio de las zeolitas para la purificación ambiental.
- Investigar de qué forma contamina la quema de carbón y leña en las zonas rurales.
- Realizar estudios de las proporciones de gas Radón dentro de los hogares, debido a su presencia geológica natural.

➤ **REFERENCIAS**

1. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Obtenida en Mayo 2011, de <http://www.inegi.gob.mx/>
2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (sin fecha). *Mapa Digital de México V5*. Obtenida en abril 2011, de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.htm/>.
3. García, A. (2011). *Distrito Federal y sus Delegaciones*. Obtenida el 25 marzo de 2011, de [http://www.alaingarcia.net/conozca/df\\_delegaciones.htm/](http://www.alaingarcia.net/conozca/df_delegaciones.htm/)
4. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). *Marco Geoestadístico*. Obtenida el 15 de noviembre de 2010, de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M\\_Geoestadistico](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M_Geoestadistico).
5. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2011). *Superficie de la República Mexicana por Estados*. Obtenida el 03 febrero de 2011, de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>.
6. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). *XII Censo General de Población y Vivienda INEGI 2010*. Obtenida el 27 de noviembre de 2010, de [http://buscador.inegi.org.mx/search?q=censo+general+de+poblacion+y+vivienda+2010+&site=default\\_collection&btnG=Buscar&tx=superficie\\_de\\_la\\_republica&CboBuscador=default\\_collection&client=frontend\\_1&output=xml\\_no\\_dtd&proxystylesheet=frontend\\_1&getfields=\\*&entsp=a\\_\\_inegi\\_politica&Proxyreload=1&numgm=5&oe=UTF-8&ie=UTF-8&ud=1&exclude\\_apps=1&tlen=900](http://buscador.inegi.org.mx/search?q=censo+general+de+poblacion+y+vivienda+2010+&site=default_collection&btnG=Buscar&tx=superficie_de_la_republica&CboBuscador=default_collection&client=frontend_1&output=xml_no_dtd&proxystylesheet=frontend_1&getfields=*&entsp=a__inegi_politica&Proxyreload=1&numgm=5&oe=UTF-8&ie=UTF-8&ud=1&exclude_apps=1&tlen=900)
7. Quadri de la Torre, G., y Sánchez Cataño, L. R. (1994). *La Ciudad de México y la Contaminación Atmosférica*. México: Limusa.
8. Morales R. G. E. (Ed.). (2006). *Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la Ciudad de Santiago*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, S.A.
9. López Acuña, D., González de León, D., y Moreno Sánchez, A. R. (2008). *La salud ambiental en México*. Volumen 4 de Colección Medio ambiente: Temas. México: Fundación Mexicana para la Restauración Ambiental, A.C.
10. *Contaminación en la Ciudad de México*. (2011). Obtenida de: <http://www.ecologiaverde.com/?s=contaminacion+en+la+ciudad+de+mexico>

11. Waller, A. E., Baker, S.P., and Szocka A. (1989). *Childhood injury deaths: national analysis and geographic variations*. Am J Public Health; 79:310315.
12. Cortez Lugo, M., Mercado García, A., Hernández Ávila, M., Meneses González, F., y Palazuelos Rendón, E. (1998), *Evaluación de la calidad del aire interior y exterior en un jardín de niños de la Ciudad de México*. Salud pública de México / vol.40, No 5:415-420, septiembre-octubre.
13. Environmental Protection Agency. (2008). *Emissions of key pollutants in the air outside the United States*. Obtenida el 29 de julio de 2009, de [http://www.epa.gov/gasstar/documents/workshops/buenosaires2008/hb\\_peumatic\\_devices.pdf](http://www.epa.gov/gasstar/documents/workshops/buenosaires2008/hb_peumatic_devices.pdf)
14. Solórzano del Río, H. E. (2011, 26 de abril). *Su casa puede ser un riesgo para la salud*. Comunidad Biointensiva. Granja Ecológica Nuevo Sol, León, Guanajuato, México.
15. Baird, C. (2004). *Química Ambiental* (Reimpresión). Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
16. Tyler Miller, G., Jr. (1994). *Ecología y medio ambiente: Introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la ciencia de conservación del planeta Tierra*. México: Grupo Editorial Iberoamérica.
17. González Loncon, J. I. (2005) *Obtención, recepción, manejo y consumo de combustibles a bordo*, p.159. Tesis LCI-FCI-UAC. Chile: Universidad Austral de Chile.
18. Figueruelo-Alejano, J.E., y Marino-Dávila, M. (Ed.). (2004). *Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales*. Barcelona: Reverté S.A.
19. Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México: Reverté Ediciones.
20. Guardino Solá, X. (2001). *Calidad del aire interior: Introducción*. En la Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo (Tomo 2, p. 44.2). España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
21. Rey Martínez, F. J., y Velasco Gómez, E. (2007). *Calidad de ambientes interiores*. España: Editorial Paraninfo S.A.
22. Berenguer, M. J. (2001). *Reglamentos, recomendaciones, normas y patrones*. En la Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo (Tomo 2, p. 44.28). España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

23. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo IV, Instrumentos de la Política Ambiental, Sección I Planeación Ambiental*. (1996, 13 de Diciembre). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
24. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo IV, Instrumentos de la Política Ambiental, Sección I Planeación Ambiental*. (2003, 13 de Junio). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
25. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo IV, Instrumentos de la Política Ambiental, Sección II Ordenamiento Ecológico del Territorio*. (1996, 13 de Diciembre). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
26. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo IV, Instrumentos de la Política Ambiental, Sección II Ordenamiento Ecológico del Territorio*. (2007, 12 de Febrero). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
27. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo IV, Instrumentos de la Política Ambiental, Sección III Instrumentos Económicos*. (1996, 13 de Diciembre). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
28. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo II, Distribución de Competencias y Coordinación*. (2003, 25 de Febrero). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
29. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo II, Distribución de Competencias y Coordinación*. (2011, 28 de Enero). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
30. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo II, Distribución de Competencias y Coordinación*. (2006, 23 de Mayo). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
31. México. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, *Capítulo II, Distribución de Competencias y Coordinación*. (1996, 13 de Diciembre). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.
32. Arrieta, G. (1996). *La Descentralización o Federalización en materia Ambiental en México*. N.d. Obtenida de: [http://www.ceja.org.mx/articulo.php?id\\_rubrique=22&id\\_article=159](http://www.ceja.org.mx/articulo.php?id_rubrique=22&id_article=159).

33. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (sin fecha). *Límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible. Norma Oficial Mexicana. NOM-041-SEMARNAT-2006*, Obtenida el 30 de Abril de 2011, de <http://www.dof.gob.mx/documentos/1880/SEMARNA/SEMARNA.htm>
34. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos. Norma Oficial Mexicana. NOM-042-SEMARNAT-2003*, Obtenida el 30 de Abril de 2011, de <http://www.dof.gob.mx/documentos/1880/SEMARNA/SEMARNA.htm>
35. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipadas con este tipo de motores. Norma Oficial Mexicana. NOM-044-SEMARNAT-2006*, Obtenida el 30 de Abril de 2011, de <http://www.dof.gob.mx/documentos/1880/SEMARNA/SEMARNA.htm>
36. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos. Norma Oficial Mexicana. NOM-047-SEMARNAT-1999*. Obtenida el 30 de Abril de 2011, de <http://www.dof.gob.mx/documentos/1880/SEMARNA/SEMARNA.htm>
37. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico. Norma Oficial Mexicana. NOM-039-SEMARNAT-1993*. Obtenida

el 30 de Abril de 2011, de <http://www.dof.gob.mx/documentos/1880/SEMARNA/SEMARNA.htm>

38. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas. Norma Oficial Mexicana. NOM-043-SEMARNAT-1993*. Obtenida el 30 de Abril de 2011, de <http://www.dof.gob.mx/documentos/1880/SEMARNA/SEMARNA.htm>
39. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. (2000). *Atribuciones administrativas del gobierno Federal y de las entidades locales en el control de la contaminación del aire*. México: Gaceta ecológica Número 54-61.
40. Godínez Enciso, J. A. (2011). *Desarrollo económico y deterioro ambiental: una visión de conjunto y aproximaciones al caso mexicano*. Obtenido el 30 de abril de 2011, Obtenida de:  
<http://www.azc.uam.mx/publicaciones/gestion/num7/art6.htm>
41. *Prevention of Air Pollution and Control*/Obtenida el 27 de marzo de 2011, de <http://www.epa.gov/air/caa/>
42. *Adsorción de gases por sólidos*. (sin fecha). Consultados el 27 de septiembre de 2011, de [http://www.uco.es/~iq2sagri/TranspAds\\_Gases.pdf](http://www.uco.es/~iq2sagri/TranspAds_Gases.pdf)
43. Romero García, E., Barrios Suarez M. *Las arcillas: propiedades y usos* (2010). (sin fecha). Obtenida de:  
<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm/>
44. Jiménez Salas, J.A., y Justo J.L. (1975). Geotecnia y Cimientos. *Propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Rueda, 466p.
45. Bosch, P., Schifter, I. (2003). *LA ZEOLITA. Una piedra que hierve*. (3ra ed.). p 84. México: Fondo de cultura económica.
46. *Usos de las Zeolitas*. (2010). (sin fecha). Obtenido de:  
[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec\\_5.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_5.html)
47. Fuentes, S., Díaz, G. (2003). *CATALIZADORES ¿La piedra filosofal del siglo XX?* (p. 95). México: Fondo de cultura económica.
48. Cruz-Guzmán Alcalá, M. C. (2007). *La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales*. España: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

49. Procesos de adsorción. (sin fecha). *Tipos de adsorción. Isotermas de adsorción. Intercambio. Modelo de la doble capa. Factores que influyen en la adsorción e intercambio iónico. Efecto del intercambio catiónico. Experiencias de laboratorio.* Obtenida el 27 de septiembre de 2011, de <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>.
50. Castellanos Solís, A., Leyva Ramos, R. (2006). *Memorias del XVI Verano de la Investigación Científica 2006 (p. 48-52)*. Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
51. Clean Air Technology Center. (1999) *Seleccionando un sistema de adsorción para COV: ¿carbón, zeolita, o polímeros?* E.U. Environmental Protection Agency.
52. Subhash, B. Zeolite. (1990). *Catalysis: Principles and Applications*. Boca Ratón: Florida: CRC Press, Inc.
53. Herreros, B. (2010). *The X-Ray Diffraction Zeolite Database*. Obtenido de: <http://www.personal.utulsa.edu/~geoffrey-price/zeolite/fau.htm/>
54. Ribeiro, F, R. (1984). *Zeolites: Science and Technology*. Holanda: Martinus Nijhoff Publishers, The Hague.
55. Meier, W. T. (sin fecha). *El Atlas de los tipos de estructura de la zeolita*. Obtenido de: <http://www.personal.utulsa.edu/~geoffrey-price/zeolite/fau.htm/>
56. Avecillas Briones, H. M. (2008). *Modelamiento de la Respuesta mecánica del cemento puzolánico mediante la adición de 15% de zeolita y curado al aire, p. 143*. Tesis IM- FIMCP-ESPL. Ecuador: Guayaquil.
57. Vicente Ferrer, R. (2010). *Eliminación de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> Mediante Materiales Zeolíticos Preparados a Partir de Cenizas Volantes, p. 125*. Tesis IQ- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. España: Universidad de Zaragoza.
58. García Lovera, R. (2010). *Caracterización Textural de Adsorbentes*. Obtenido de: [http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cyted/publicaciones/cyted%20librotallerV%201.3%20Rafael%20Garcia\(PDF\).pdf](http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cyted/publicaciones/cyted%20librotallerV%201.3%20Rafael%20Garcia(PDF).pdf)
59. *Adsorción Física y Química*. (sin fecha). Obtenido el 30 de octubre de 2010, de: [www.fcyt.umss.edu.bo/docentes/29/documentos/adsorcion.pdf](http://www.fcyt.umss.edu.bo/docentes/29/documentos/adsorcion.pdf)
60. Ángeles Ramírez, C. E. (2010). *Separación de la mezcla Teg-Agua generada del proceso de deshidratación de gases en la industria petrolera mediante el uso de sales iónicas, p.36*. Tesis, IQP-UNACAR: Venezuela.



61. Carballo Suárez, L. M. (2002). *Introducción a la Catálisis Heterogénea*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
62. Lección 17. *Procesos de adsorción*. (sin fecha).  
<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>
63. Neff, J. (2004). *Effect of Contaminants from Oil Well Produced Water (Second impression)*. London Elsevier.
64. Startin, A., Elliott, G. (2009). *Controlling Emissions With Ceramic Filters*. Chemical Engineering. (v.116, núm.1). Bimestral.
65. IMECA-Gobierno del Estado de Nuevo León, México. (sin fecha). *Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, IMECA*. Obtenido el 04 de octubre de 2011, de [http://www.nl.gob.mx/?P=med\\_amb\\_mej\\_amb\\_sima\\_imeca](http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima_imeca).
66. *Isoterma de Langmuir*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3\\_1.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3_1.htm)
67. *Derivación de la Isoterma de Langmuir. Tomando en cuenta las consideraciones de equilibrio*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3\\_2.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3_2.htm)
68. *Isotermas de Langmuir. Consideraciones desde la derivación cinética*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3\\_3.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3_3.htm)
69. *Cinética de Adsorción. La velocidad de adsorción*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat2\\_3.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat2_3.htm)
70. *Cinética de Desorción*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat2\\_6.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat2_6.htm)
71. *Variación del recubrimiento la superficie con temperatura y presión*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3\\_4.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3_4.htm)
72. *Aplicaciones: Cinética de las reacciones catalíticas*. (sin fecha). Obtenido el 30 de septiembre de 2011, de [http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3\\_5.htm](http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3_5.htm)

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**ADSORBENTE.** Penetración superficial de un gas o un líquido en un sólido.

**ADSORCIÓN.** Retención de las moléculas de un gas o de una sustancia en solución o en suspensión sobre la superficie de un sólido.

**AGUA:** Es el líquido más abundante y común de la tierra, sin olor, color ni sabor, constituido por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $H_2O$ ). Sus principales características son: punto de fusión a  $0^{\circ}C$ , punto de ebullición a  $100^{\circ}C$  y densidad de  $1g/mL$  (a  $4^{\circ}C$ ). Sus moléculas se enlazan mediante puentes de hidrógeno.

**AIRE.** Mezcla de gases que rodea a la tierra. Su composición es:

Nitrógeno	78.08%
Oxígeno	20.95%
Argón	0.93%
Dióxido de carbono	0.03%
Neón	0.0018%
Helio	0.0005%
Criptón	0.0001%
Xenón	0.00001%

Los demás elementos que contiene están en muchas más pequeñas cantidades.

Reacciona con una gran cantidad de sustancias formando ácidos y bases.

**ALCANOS.** Hidrocarburos de cadena abierta, sin enlaces dobles o triples y saturados. Su constitución se da por la fórmula  $C_nH_{2n+2}$

Los primeros alcanos son:

$CH_4$	Metano	$C_5H_{12}$	pentano
$C_2H_6$	Etano	$C_6H_{14}$	hexano
$C_3H_8$	Propano	$C_7H_{16}$	heptano
$C_4H_{10}$	Butano	$C_8H_{18}$	octano

**ALCOHOL.** Compuesto orgánico no aromático cuyas moléculas contiene uno o más grupos OH. Su fórmula general es  $R - OH$ , como el  $CH_3-CH_2-OH$  (alcohol etílico o etanol).

**AMONIACO.** Gas incoloro de olor agrio, su fórmula es  $NH_3$ .

**ANIÓN.** Átomo o molécula con carga negativa por que ha ganado electrones.

**ARCILLA.** Sustancia mineral, empapada en agua, impermeable y plástica, formada principalmente por silicato y aluminio. (Se distinguen la arcilla verde o figulina, que sirve para la alfarería común, y la arcilla blanca o caolín, usada para fabricar la porcelana.)

**ÁREA SUPERFICIAL:** extensión de la superficie total determinada por un determinado método en unas condiciones establecidas.

**ÁTOMO** La parte más pequeña de un elemento que puede intervenir en una reacción química. Consta de una parte central cargada positivamente: el núcleo, rodeado de una o varias partículas de carga negativa, los electrones. Casi toda la masa del átomo está contenida en el núcleo, el cual está compuesto de dos tipos de partículas diferentes, de masa casi idéntica: el protón, con carga positiva, y el neutrón, que no tiene carga

**CALCIO** Del grupo de los metales, es moderadamente blando y con bajo punto de fusión. Es el tercer elemento del grupo II de la tabla periódica, su símbolo es Ca. Es el tercer elemento más abundante, ya que está distribuido ampliamente en la corteza terrestre. El calcio es un elemento fundamental en la estructura ósea de los animales vertebrados.

**CATÁLISIS.** El estudio termodinámico de una reacción química no solamente suministra información sobre la viabilidad de la misma, sino que aporta datos de gran interés para el conocimiento general del sistema. La determinación del calor de reacción y de la conversión de equilibrio son etapas previas fundamentales en cualquier estudio de una reacción química.

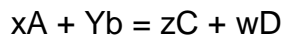
**CATALIZADOR.** Un catalizador es una entidad que cambia la velocidad de una reacción química, tomando parte íntimamente en ella, pero sin llegar a ser un producto.

**CATIÓN** Átomo o molécula con carga positiva porque ha perdido electrones.

**COLORO.** Elemento del grupo VII de la tabla periódica, perteneciente a los halógenos; es verde, gaseoso y reactivo, su símbolo es Cl. El cloro se usa, como elemento, para la producción de solventes orgánicos clorados; para la producción de PVC, un polímero termoplástico muy usado en varias industrias como blanqueador cuando se encuentra formando parte de hipoclorito, y muchas veces como desinfectante o purificador.

**COLORURO.** Cuando los haluros reaccionan con los metales, se les coloca la terminación -uro; en este caso, el cloro pasa a ser cloruro. Por ejemplo NaCl cloruro de sodio (sal), KCl cloruro de potasio.

**CONSTANTE DE EQUILIBRIO.** En una reacción química del tipo:



Donde las letras minúsculas indican los números de balance de la reacción, la expresión que denota la constante de equilibrio es:

$$K_c = [\text{C}]^z[\text{D}]^w / [\text{A}]^x [\text{B}]^y$$

Los corchetes indican concentraciones

**CONVERTIDOR CATALÍTICO.** Es un dispositivo, que actualmente transforma los contaminantes de CO, NO<sub>x</sub> y HC, en bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), y nitrógeno gas (N<sub>2</sub>). Los cuales son menos nocivos, para la salud de las personas.

**DENSIDAD.** Es una magnitud que relaciona la cantidad de masa con la cantidad de volumen de un determinado cuerpo. Sus unidades, en el Sistema Internacional, son Kg / cm<sup>3</sup> aunque también es habitual verlo en g/cm<sup>3</sup>. Para pasar de una a otra basta con dividir entre 1000.

**DIFUSIÓN.** Propagación de las partículas de un fluido al penetrar en un sólido (o en un líquido más denso); propagación que tiende a una distribución homogénea del fluido en el sólido.

**DISOLVENTE.** Sustancia que se encuentra en mayor cantidad en una solución.

**DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE POROS.** Representado por las derivadas (dA<sub>p</sub>/dr<sub>p</sub>) o (dV<sub>p</sub>/dr<sub>p</sub>), como una función de r<sub>p</sub> donde A<sub>p</sub>, V<sub>p</sub> y r<sub>p</sub>, son el área de las paredes de los poros, el volumen y el radio de los poros.

**ELECTROLITO.** Sustancia que, al disolverse en agua, produce una solución que puede conducir la electricidad debido a la formación de iones.

**ESMECTITAS.** Son un conjunto de minerales que se dividen en dos grupos, distinguiéndose:

Las dioctaédricas (alumínicas), tales como:

**Montmorillonita** ((Na,Ca)<sub>0.3</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O),

**Beidellita** ((Na,Ca<sub>0.5</sub>)<sub>0.3</sub>Al<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O),

**Nontronita** (Na<sub>0.3</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O).

Las trioctaédricas (magnésicas), tales como:

**Saponita** ((Ca/2,Na)<sub>0.3</sub>(Mg,Fe<sup>2+</sup>)<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O) o

**Hectorita** (Na<sub>0.3</sub>(Mg,Li)<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(F,OH)<sub>2</sub>).

Suelen presentarse en agregados laminares o en masas suaves y blandas.

**FISISORCIÓN.** En química se denomina adsorción al acúmulo o depósito de material (adsorbato) en un plano o superficie (a diferencia de la absorción que es un proceso volumétrico).

**FUERZAS DE VAN DER WAALS.** Fuerza de atracción entre moléculas apolares o poco polares.

**GAS.** Uno de los tres estados de la materia, caracterizado por su poder de compresión y expansión.

**HIDROCARBUROS.** Compuestos orgánicos formados únicamente por carbono e hidrogeno.

**HISTÉRESIS.** El término histéresis se emplea genéricamente para describir ciertos comportamientos de materiales o aparatos de muy variada índole, pero que en todo caso responden a un retraso entre una causa externa y un efecto en sus propiedades.

**LITOLÓGICO.** Es la parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas.

**MAGNESIO** Elemento que pertenece al grupo II A de la tabla periódica; es un elemento de transición. Su símbolo es Mg.

**MERCURIO.** Elemento que pertenece al grupo II B de la tabla periódica, su vapor es muy venenoso y su símbolo es Hg Se utiliza en termómetros, amalgamas de uso dental y aparatos científicos.

**MEZCLA.** Es un sistema material formado por dos o más sustancias puras pero no combinadas químicamente. En una mezcla no ocurre una reacción química y cada uno de sus componentes mantiene su identidad y propiedades químicas. Los componentes de una mezcla pueden separarse por medios físicos como destilación, disolución, separación magnética, flotación, filtración, decantación o centrifugación. Las mezclas se clasifican en homogéneas y heterogéneas. Los componentes de una mezcla pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos.

**MOL.** Unidad química que representa la cantidad de  $6.02 \times 10^{23}$  unidades de átomos, moléculas u otras partículas.

**MOLÉCULA POLAR.** Molécula que posee un momento eléctrico (formación de dipolo).

**NITRÓGENO.** Elemento no metálico que pertenece al grupo V A su símbolo es N.

**pH.** Forma de medir la concentración de protones ( $H^+$ ) en una solución. Es un coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una sustancia.

**PLOMO.** Elemento de los metales normales que pertenece al grupo IV A; metal muy pesado, su símbolo es Pb. Se usa principalmente como aislante de la radioactividad.

**POLÍMERO.** Sustancia que se forma por moléculas grandes compuestas de unidades iguales repetidas.

**POSITIVA.** Carga eléctrica. Se considera que está en el protón.

**POTASIO.** Elemento metálico normal que pertenece el grupo I A; su símbolo es K.

**PRODUCTOS.** En una reacción química, son las sustancias que se forman.

**PROPIEDADES FÍSICAS.** Características que determinan cualidades de la materia sin que existan cambios en su composición.

**PROPIEDADES QUÍMICAS.** Características que determinan cualidades de la materia con cambios en su composición.

**PROTEÍNAS.** Polímeros naturales formados por aminoácidos como unidades básicas. Los elementos que los conforman son estructuras de carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON).

**PROTÓN.** Partícula con carga positiva que está localizada en el núcleo del átomo. Descubierta por Rutherford en 1920. Su masa es de  $1.67 \times 10^{-24}g$ .

**PUNTO DE EBULLICIÓN.** Temperatura en la cual un líquido comienza su cambio de estado sólido.

**PUNTO DE FUSIÓN.** Temperatura en la cual un sólido comienza su cambio de estado líquido.

**QUIMISORCIÓN.** Ocurre cuando un enlace químico, definido en este caso como un intercambio de electrones, se forma. El grado de intercambio y lo simétrico que sea dependen de los materiales involucrados.

**RADICAL.** Átomo o grupo de átomos que se comportan como una unidad en una reacción química y que son la parte negativa de algunas moléculas, como el  $Cl^-$  o el  $SO_4^{-2}$

**RADÓN.** Elemento que pertenece al grupo de los gases nobles; su símbolo es Rn y su configuración electrónica:  $4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$ .

**REACCIÓN DE DESCOMPOSICIÓN.** Es aquella en la que se forman varias moléculas más simples a partir de un reactivo.

**REACCIÓN QUÍMICA.** Proceso que comienza con unos reactivos cuyo acomodo atómico está perfectamente definido y finaliza después de la reacción con los llamados productos, cuyo acomodo atómico es diferente al de los reactivos. Los átomos iniciales son los mismos que los finales, pero se forman nuevos compuestos.

**REACTANTES.** Son los reactivos, sustancias que se encuentran presentes antes de llevarse a cabo la reacción química.

**REACTOR.** Recipiente en el cual se lleva a cabo una reacción química.

**REDUCCIÓN.** Cuando un elemento gana electrones.

**REGENERACIÓN.** Proceso para quemar cuidadosamente el carbón depositado en el catalizador después de una reacción, evitando el sobrecalentamiento que podría dañar la estructura.

**REPULSIÓN.** Acción o efecto de repeler o de rechazar.

**SATURADA.** Solución que no puede disolver más soluto en el solvente sin que se empiece a precipitar.

**SELECTIVIDAD.** Medida del grado al que un catalizador orienta una reacción hacia los productos deseados.

**SILICIO.** Elemento de los no metales que pertenece al grupo IV A; su símbolo es Si.

**SINTÉTICO.** Productos fabricados por procedimientos industriales o por síntesis química.

**SMOG.** Es una palabra inglesa que significa humo y niebla respectivamente: smoke y fog., que sirve para definir un tipo de contaminación asociado con los asentamientos de niebla y el humo emitido por las industrias.

**SODIO.** Elemento de los metales que pertenece al grupo I A; su símbolo es Na. Este elemento reacciona con el cloro para formar cloruro de sodio.

**SÓLIDO.** Cuerpo que posee volumen y forma definidos; no es compresible. Aquel cuyas moléculas tienen entre sí mayor cohesión que los líquidos.

**SÓLIDO POROSO.** Es un sólido con poros, esto es cavidades, canales e intersticios, que son más profundos que anchos.

**SOLUBILIDAD.** Medida de la capacidad de una sustancia para disolverse en otra.

**SOLUCIÓN.** Mezcla homogénea formada por soluto y solvente; éstos pueden separarse por medios físicos, como cambios de estado.

**SOLUCIÓN SATURADA.** Aquella en la que se encuentra la máxima cantidad de soluto posible, que puede ser disuelto en una determinada cantidad de solvente a una temperatura y una presión dadas.

**SOLUTO.** Aquel componente de una solución que se encuentra en una cantidad menor, siendo éste el que se disuelve.

**SOLVATACIÓN.** Dícese de la solución en la que el solvente no es agua; cuando es agua se dice hidratación.

**SOLVENTE.** Componente de una solución que está en mayor cantidad y disuelve al soluto.

**SUSPENSIÓN.** Mezcla heterogénea en la que sus componentes se distinguen a simple vista, encontrándose éstos en estado sólido y líquido.

**SUSTANCIAS PURAS.** Son aquellas que no se pueden descomponer en otras más simples mediante métodos físicos. Se pueden identificar porque poseen propiedades características, como la densidad, la temperatura de ebullición, de fusión, etcétera.

**TAMAÑO DE PORO.** Distancia entre dos paredes opuestas del poro.

**TEMPERATURA.** Grado de calor que posee un cuerpo.

**TERMODINÁMICA.** Parte de la física que se encarga del estudio de la transferencia del calor y sus conversiones en otros tipos de energía.

**VALENCIA.** Capacidad de combinación de los elementos que se manifiesta en ceder o aceptar los electrones en el último nivel, el más externo, de energía.

**VOLÁTILES:** Sustancias que se transforman fácilmente de sólidos o líquidos al estado gaseoso.

**VOLUMEN DE POROS ( $V_p$ ).** Volumen de los poros medido por un determinado método.

**XENÓN.** Elemento que pertenece al grupo de los gases nobles de la tabla periódica; su símbolo es Xe.



**YACIMIENTO.** Disposición de las capas minerales en el seno de la tierra o masa mineral extensa.

**ZEOLITA.** Mineral, Silicato natural que se encuentra en ciertas rocas volcánicas.