

Investigación

UBICACIÓN DE INSTALACIONES INDUSTRIALES: METODOLOGÍA PARA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Loecelia Ruvalcaba

Licda. en Informática. Master en Ciencias de la Ingeniería Industrial. Doctora en Logística y Dirección de la Cadena de Suministros. Profesor Investigador del Centro de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA).

E-mail: lgruvalcaba@correo.uaa.mx

Gabriel Correa

Licdo. en Informática. Master en Ciencias de la Ingeniería Industrial. Doctor en Logística y Dirección de la Cadena de Suministros. Profesor Investigador del Centro de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA).

E-mail: jgcorrea@correo.uaa.mx

Este proyecto de investigación está inscrito el Centro de Estudios e Investigaciones Socio- Económicas y Políticas(CEISEP) en la Línea de Investigación: Desarrollo Sustentable Regional (DSR) y el Proyecto Desarrollo de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (PDCOLM), adscritos al Programa de Investigación de la Universidad Nacional Experimental "Rafael María Baralt" (UNERMB), Estado Zulia -Venezuela.

Resumen

La creciente preocupación por los temas ambientales y de salud, genera reacciones públicas negativas cuando se anuncia la construcción de una instalación industrial que emite contaminantes a la atmósfera. Este artículo propone una metodología para ubicar instalaciones industriales, que considera la preselección, evaluación y determinación de sitios potenciales. Además, se busca garantizar el cumplimiento de la legislación en materia de recepción de contaminantes mediante la inclusión de parámetros obtenidos previamente con modelos de difusión espacial de contaminantes en modelos multiobjetivo de localización de instalaciones. Se resuelve un caso de aplicación proveniente de un grupo de industrias ladrilleras en Yahualica, Jalisco, México. Los resultados muestran que las configuraciones alternativas obtenidas contribuyen a la factibilidad económica, la justicia social y el cumplimiento de la legislación vigente en materia de recepción de contaminantes.

Palabras clave: ubicación de instalaciones industriales, impacto ambiental, modelos de difusión espacial, modelos multiobjetivo, legislación ambiental.

Recibido: 03-10-2011

Aceptado: 31-10-2011

Abstract

The increasing concern about environmental and health topics generates negative public reaction when the construction of an industrial facility that emits pollutants into the atmosphere is announced. This paper proposes a methodology for industrial facility location. This methodology considers preselection, assessment and establishment of potential sites. In addition, it seeks to ensure compliance with legislation regarding pollution receipt though including parameters previously obtained by spatial diffusion models of contaminants into multiobjective facility location model. An application case from a group of brickwork industries in Yahualica, Jalisco, Mexico is solved. The results show that alternative configurations obtained contribute to economic feasibility, social justice and compliance of pollution parameters which are legally established.

Keywords: Industrial facility location, environmental impact, spacial difussion models, multiobjective models, environmental legislation.

INDUSTRIAL FACILITY LOCATION: A METHODOLOGY FOR ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION

Ruvalcaba Loecelia

BA in Computer Science. Master of Science in Industrial Engineering. PhD in Logistics and Supply Chain Management. Research Professor of the Center for Basic Sciences at the Autonomous University Aguascalientes (UAA).
E-mail: lgruvalcaba@correo.uaa.mx

Gabriel Correa

BA. in Computer Science. Master of Science in Industrial Engineering. Doctor of Logistics and Supply Chain Management. Research Professor of the Center for Basic Sciences at the Autonomous University Aguascalientes (UAA).
E-mail: jgcorrea@correo.uaa.mx.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los temas ambientales han adquirido una gran importancia a nivel internacional, nacional y local. Sin embargo, la contaminación atmosférica es un problema antiguo que se ha agravado como consecuencia del desarrollo industrial y de las actividades urbanas. Todos los países que se han industrializado han experimentado un aumento en la contaminación.

Las etapas iniciales de desarrollo se caracterizan por sacrificar el ambiente en aras de la actividad industrial. Sin embargo, dicho modelo no es ecológicamente sostenible a largo plazo y no ha podido satisfacer las necesidades básicas para toda la humanidad (Panayotou et al., 2003:6). Muestra de ello son la explotación de recursos naturales no renovables; la producción de bienes generando volúmenes exorbitantes de residuos tóxicos y la consiguiente contaminación del agua, aire y suelo; la irreversible extinción de especies; el aumento de la incidencia de enfermedades por causas ambientales y la desaparición de suelos fértiles y productivos dando lugar a enormes desiertos y mayor pobreza.

Estudios que han estimado el costo económico de la contaminación subrayan la necesidad de apoyar los esfuerzos para reducirla. Es responsabilidad de cada país, establecer los mecanismos necesarios para mantener un equilibrio en los costos sociales–privados y la degradación ambiental–reducción de la contaminación. Un problema central del sector privado es el impacto de la regulación ambiental sobre los márgenes de ganancia y la competitividad de la industria.

En México, el desarrollo ambiental desequilibrado es atribuible al crecimiento demográfico e industrial desacelerado, la falta de una planeación integral en el uso de suelo y recursos, así como a diversas variables socioeconómicas que contribuyen al incremento de los niveles de contaminación al permitir su dispersión o la acumulación de agentes contaminantes en un área

(Davydova-Belitskaya et al., 1999:104).

Por lo anterior y con la intención de proteger la salud de la población a través del establecimiento de un margen adecuado de seguridad, en 1994, el gobierno federal establece las normas de concentración de contaminantes atmosféricos. Estas normas, aseguran la calidad del aire mediante el establecimiento de los valores máximos permisibles de concentración de contaminante en áreas urbanas.

Reconociendo además, que la actividad industrial es un motor fundamental de desarrollo para algunas poblaciones, al ser una fuente importante de empleos, se han implementado diversos programas y legislaciones que buscan reducir la contaminación industrial o su impacto en las poblaciones cercanas. Entre las acciones que reducen el impacto en la población, destaca la reubicación (aunque la ubicación de una empresa nueva está sujeta a las mismas condiciones).

La reubicación representa una solución local a corto o mediano plazo que garantiza el cumplimiento de la legislación ambiental en materia de recepción de contaminantes, pero que impacta de forma negativa en factores operativos críticos de la empresa. Esto evidencia que la reubicación industrial es un problema decisional altamente complejo que requiere encontrar un equilibrio entre todos los factores y/o actores que intervienen. Por ello, es imperativo desarrollar herramientas, modelos y metodologías de solución que proporcionen alternativas para hacer frente a este tipo de problemas.

En este trabajo, se propone una metodología para la reubicación de industrias que emiten contaminantes a la atmósfera a través de fuentes fijas. Un caso real proveniente de un grupo de industrias ladrilleras en Yahualica, Jalisco, México, originalmente propuesto por Ruvalcaba et al. (2010a) es utilizado para probar su alcance. Estas industrias ladrilleras han sido absorbidas por la mancha urbana al paso de los años y requieren ser reubicadas, son del mismo tamaño y capacidad, utilizan

un proceso productivo artesanal y emplean gas LP para el horneado de su producto.

Aunque el gas LP es uno de los combustibles autorizados por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en la norma NOM-085-SEMARNAT-1994 (SEMARNAT, 1994), sus emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) se consideran en el problema, el objetivo es evaluar la calidad del aire en las poblaciones que podrían verse afectadas por las nuevas ubicaciones considerando la totalidad de sus emisiones.

Para la reubicación de 2 o 3 industrias ladrilleras, se consideraron 15 sitios candidatos, de los cuales solo 5

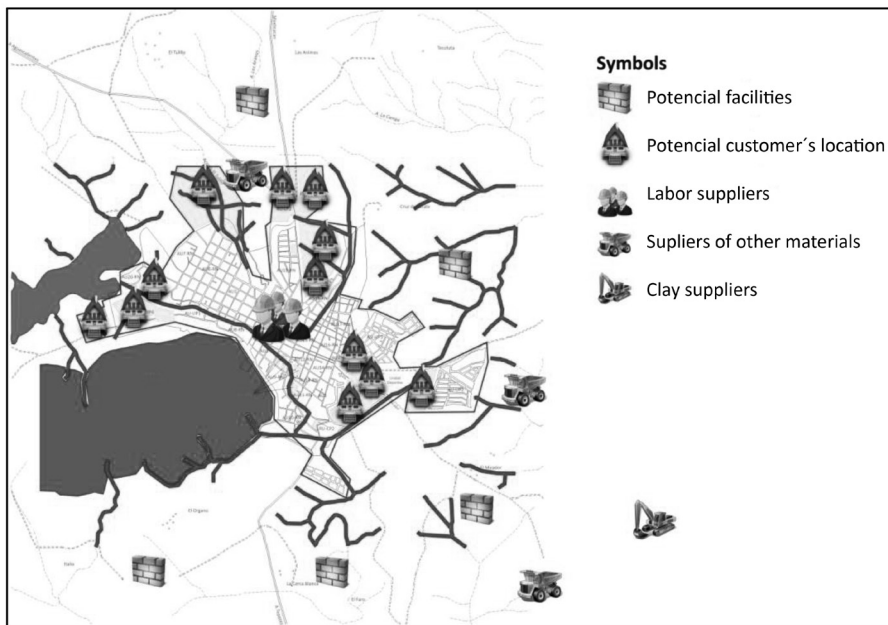
calificaron como sitios potenciales y se utilizaron para hacer un análisis más profundo. Se establecieron además 15 poblaciones receptoras (considerando reservas naturales y asentamientos humanos con al menos 35 habitantes, 5 proveedores, 12 clientes potenciales y los 3 tipos de contaminantes mencionados anteriormente (figura 1).

En este contexto, se parte de las siguientes preguntas:

¿La integración de parámetros de difusión atmosférica en modelos discretos de ubicación de instalaciones multiobjetivo garantiza la reducción de la exposición a contaminantes en las poblaciones cercanas? y ¿Cómo se ajusta la metodología propuesta al caso de la industria ladrillera?

FIGURA 1.

CONFIGURACIÓN DE LA INSTANCIA REAL.



Fuente: Ruvalcaba *et al.* (2010b)

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

La teoría de localización está dedicada al estudio de modelos, algoritmos y técnicas para elegir la localización de instalaciones (recursos), bajo ciertas restricciones (Sinha, 2004:1), de manera que se obtenga la mayor rentabilidad de las operaciones respecto a su inversión o bien que cumpla con los objetivos de la empresa.

La decisión de localización de instalaciones es un factor crítico en la planeación estratégica de una amplia gama de empresas públicas y privadas, que influye en numerosas decisiones operativas y logísticas futuras. Esta decisión requiere una inversión considerable y, una vez puesta en práctica, no se dispone de la suficiente flexibilidad para corregirla (Moyano y Bruque, 2001). Además, el ciclo de vida de una instalación depende ampliamente del sitio o región donde se ubique. El estudio de la localización también es un elemento vital para el análisis de proyectos nuevos o de expansión desde el punto de vista financiero-económico.

Básicamente, un problema de localización se caracteriza por tres elementos (Daskin, 1995:1-20):

1. Un conjunto de puntos de demanda (clientes) tienen que ser asignados para servicio a alguna instalación. Por cada cliente hay alguna información sobre su demanda y sobre el costo-beneficio contraído si deben ser servidos por cierta instalación.
2. Una lista de requerimientos que deben cumplir las instalaciones abiertas y la asignación de puntos de demanda a las instalaciones.
3. Una función que asocia a cada una de las instalaciones con el costo/beneficio obtenidos si se abrieran todas las instalaciones en el conjunto y se asignarán los puntos de la demanda a ellos de manera que se satisfagan los requisitos.

El objetivo del problema es encontrar la instalación o el conjunto de instalaciones a abrir con el fin de optimizar la función dada (Bumb, 2002:2).

2.2 CAUSAS DE LA LOCALIZACIÓN

Por su naturaleza y alto costo, las decisiones de localización podrían catalogarse de infrecuentes; de hecho muchas empresas solo la toman una vez en su historia, sin embargo, la frecuencia con que se presenta este tipo de problema depende del tipo de instalación o empresa. Entre las causas que originan problemas ligados a la localización, podríamos citar:

- Un mercado en expansión o la introducción de productos o servicios nuevos, que hace necesaria la incorporación de una nueva capacidad, la cual habrá que localizar, ya sea, mediante la ampliación de las instalaciones existentes o la creación de una nueva instalación en algún sitio.
- Una contracción o relocalización de la demanda, que puede requerir el cierre de instalaciones y/o la reubicación de las operaciones.
- El agotamiento de las fuentes de materias primas en empresas de extracción.
- La obsolescencia de una planta por la aparición de nuevas tecnologías, que se traduce a menudo en la creación de una planta en algún otro lugar.
- La necesidad de incrementar el servicio al cliente por la presión de la competencia, puede llevar a la creación de más instalaciones o a la relocalización de algunas existentes.
- Cambios en otros recursos, como la mano de obra, componentes subcontratados, condiciones políticas o económicas de una región.
- Las fusiones y adquisiciones entre empresas que puede hacer que algunas instalaciones resulten redundantes o queden mal ubicadas con respecto a las demás.
- El crecimiento demográfico, que ocasiona que empresas altamente contaminantes sean absorbidas por la mancha urbana.

2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DECISIÓN DE UBICACIÓN

García et al. (2004:144) clasifican estos criterios para la visualización de un problema de localización de acuerdo a tres perspectivas: social, económica y financiera (tabla 1).

2.4 MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES MULTIOBJETIVO

Es probable que, dada la naturaleza estratégica y de largo plazo de las decisiones de localización deban tenerse en cuenta muchos objetivos en conflicto o competencia (Daskin, 1995). Tal condición transforma al problema de toma de decisiones en un problema de toma de decisiones multiobjetivo (MODM por sus siglas en inglés –Multi-Objective Decision Making).

De acuerdo con Farahani et al. (2010:1690), las técnicas MODM tratan de encontrar la mejor alternativa considerando las diversas interacciones dentro de las restricciones de diseño que mejor satisfacen la toma de decisiones a través de la consecución de algunos niveles aceptables del conjunto de objetivos. Los problemas MODM tienen varios componentes, pero las características comunes de ellos son las siguientes:

- Un conjunto de objetivos cuantificables
- Un conjunto de restricciones bien definidas
- Un proceso de obtención de información que nos permita considerar todos los niveles de conflicto entre objetivos.

Para la solución de problemas MODM sin tener en consideración la técnica utilizada, se requieren los siguientes pasos de investigación generales:

TABLA 1.

RESUMEN DE VISUALIZACIÓN DEL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

Evaluación de proyectos de ubicación de instalaciones	Perspectiva social	Perspectiva económica	Perspectiva financiera
	Ecológico	Desarrollo	Rentabilidad
	Empleabilidad	Infraestructura	Costos de transporte
	Salubridad	Perfil profesional	Costos de manipulación
	Seguridad	Competencia	Costo fijo de posesión y operación
	Psicosocial, cultural y socio económico	Demanda	
	Legal	Oferta	
	Entorno	Legal-regulatorio	

Fuente: García et al. (2004:144)

- Objetivos en conflicto: está en la naturaleza de los problemas MODM tener objetivos en conflicto.
- Solución eficiente: Una solución ideal para un problema MODM es una que resulta en el valor óptimo de cada una de las funciones objetivo simultáneamente. Una solución eficiente (también conocida como solución no inferior o solución no dominada), es una, en que ningún objetivo se puede mejorar sin perjuicio simultáneo a los otros objetivos.
- Una solución preferida: Una solución preferida (también conocida como la mejor solución) es una solución eficiente, que es elegida por el tomador de decisiones como la decisión final.
- Hay diferentes enfoques para resolver problemas de optimización multiobjetivo. Esos enfoques pueden ser divididos en tres categorías:
- Enfoque clásico, trata de convertir un problema multiobjetivo en un problema de objetivo único y optimiza el problema de objetivo único resultante.
- En “enfoques de óptimos de Pareto” un conjunto de soluciones será el resultado cuando el problema es resuelto.
- Si el problema en la primera y la segunda categoría son complejos entonces estos pueden ser resueltos utilizando métodos heurísticos o metaheurísticos.

2.5 IMPACTO DE LA INDUSTRIA EN EL MEDIO AMBIENTE

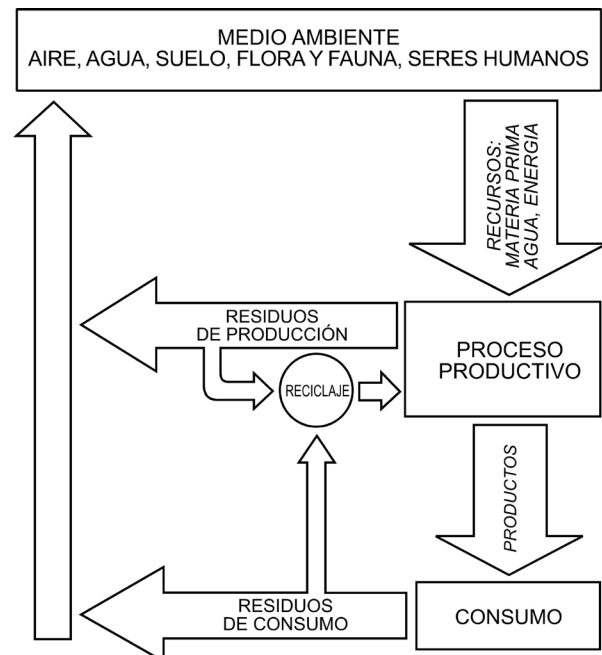
La actividad industrial es uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico que implica la utilización de recursos materiales y energéticos, con el objeto de generar bienes y servicios que satisfagan alguna necesidad humana potencial, sin embargo, los residuos generados y el excesivo consumo de recursos naturales, pueden constituirse en agentes de deterioro del medio ambiente, restando sustentabilidad al crecimiento económico.

Como puede observarse en la figura 2, los residuos regresan directa o indirectamente al entorno natural y pueden en el peor de los casos, provocar

serios desequilibrios en los ecosistemas y/o afectar negativamente la salud y/o seguridad de los seres vivos. En este sentido, la contaminación es una de las consecuencias más evidentes de la actividad humana.

De acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA, 1998) la contaminación se puede definir como “la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico”, entendiéndose que un contaminante es “toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición o condición natural”.

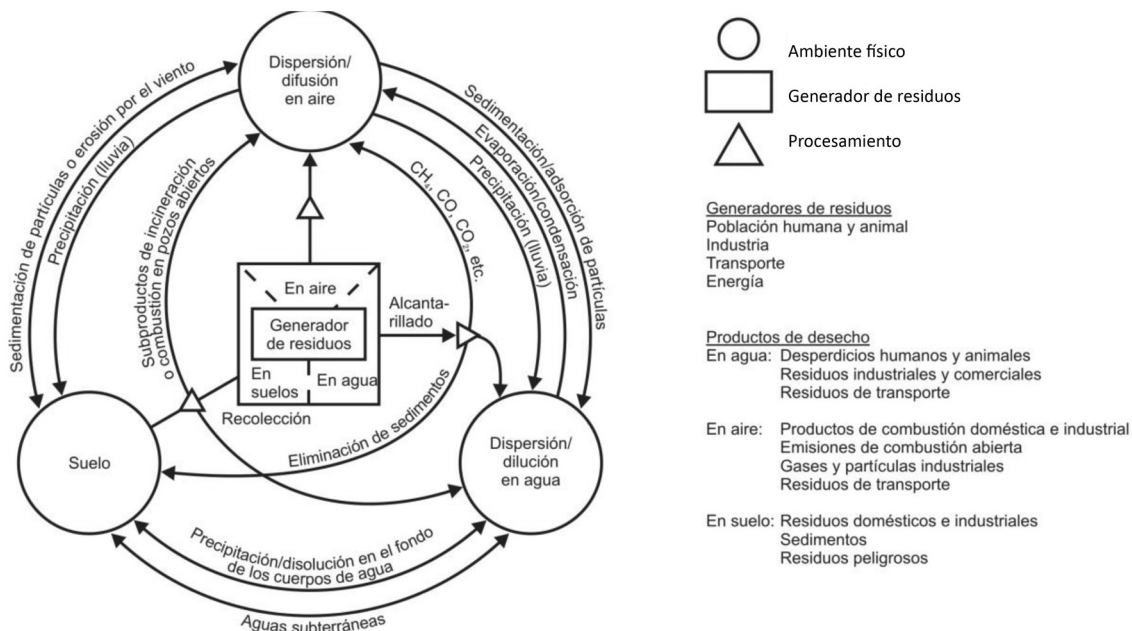
**FIGURA 2.
CICLO PRODUCTIVO**



Fuente: Henry y Heinke, (1999:5)

FIGURA 3.

CICLO DE LOS RESIDUOS O DESPERDICIOS EN UNA SOCIEDAD INDUSTRIALIZADA.



Fuente: Henry y Heinke (1999:6)

La figura 3 ilustra el ciclo de eliminación de residuos por parte de una sociedad industrializada que descarga todos sus residuos al ambiente, contaminando así los sistemas de agua, aire y tierra.

3. MATERIALES Y MÉTODO

3.1 MODELOS DE DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA

Un modelo de difusión atmosférica es un medio para estimar las concentraciones de contaminantes en dirección del viento dada la información sobre las emisiones contaminantes y la naturaleza de la atmósfera.

Las concentraciones de contaminante presentes e identificables en el aire debido a su temperatura y/o composición diferente a su ambiente son conocidas como plumas (Turner, 1994:1-38).

AERMOD: es un modelo de dispersión atmosférica de pluma estable desarrollado por AERMIC (un comité modelo regulador de la mejora de la Sociedad Meteorológica Americana (AMS) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), formado en 1991). Es uno de los modelos regulatorios preferidos de la EPA. Incorpora la dispersión del aire basándose en la estructura de la turbulencia y diferentes escalas

geográficas. Incluye el tratamiento de terrenos planos y con orografía compleja. En sus simulaciones es posible llegar a obtener las concentraciones de contaminante en diferentes intervalos temporales (EPA, 2004).

CALPUFF: fue desarrollado por el Grupo de Estudios Atmosféricos (ASG por sus siglas en inglés –Atmospheric Studies Group) y recomendado por la EPA para la evaluación de transporte de contaminantes de largo alcance y en zonas con topografía compleja. CALPUFF es un modelo de dispersión del aire de pluma no estable el cual simula los efectos de las variaciones temporales y espaciales de las condiciones meteorológicas en el transporte, transformación y eliminación de la contaminación (Scire et al., 2000: 1-5)

Mediante el modelo CALPUFF es posible realizar predicciones operativas de la dispersión de contaminantes y poder estimar cuales serán las zonas que se verán afectadas por la mayor concentración en las próximas horas.

3.2 LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD MEXICANA SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La LGEEPA es la encargada de la reservación, restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente en México. Define la participación de los Estados, Municipios y secretarías en materia ambiental.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) sirven para garantizar la sustentabilidad de la actividad económica, son de uso obligatorio en el territorio nacional para quien se enmarca dentro del alcance de la aplicación de las mismas y cuando las actividades o productos se hagan durante su vigencia. Estas normas ordinariamente se publican íntegramente en el Diario Oficial de la Federación (DOF) e incluso se publican en medios electrónicos, por lo que se pueden considerar de acceso público y libre distribución, siempre y cuando no se alteren.

La tabla 2 muestra algunas de las Normas Mexicanas en materia de salud ambiental, que establecen los criterios para medir la concentración de diferentes contaminantes en la atmósfera y que son diseñadas por la Dirección General de Salud Ambiental.

TABLA 2.
NORMAS MEXICANAS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AMBIENTE CON RESPECTO A DIFERENTES CONTAMINANTES.

Nombre	Establece	DOF
NOM-020-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O ₃).	18/Ago/1994
NOM-021-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO).	18/Ago/1994
NOM-022-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO ₂).	18/Ago/1994
NOM-023-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO ₂).	18/Ago/1994

Fuente: Secretaria de Salud (2010)

4. METODOLOGÍA

4.1 SELECCIÓN DE SITIOS CANDIDATOS.

Los sitios candidatos son sitios considerados como aptos para la ubicación de las instalaciones y fueron propuestos por los dueños de las industrias ladrilleras considerando factores netamente económicos.

4.2 PRESELECCIÓN DE SITIOS POTENCIALES

Antes de establecer un conjunto de sitios potenciales para un análisis más profundo, se consideran solo aquellos sitios candidatos que cumplan con los criterios operativos, ambientales y legales establecidos (tabla 3):

4.3 OBTENCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Los contaminantes aéreos emitidos a la atmósfera son transportados, dispersos o concentrados por condiciones meteorológicas y topográficas. El ciclo incluye la emisión, el transporte y la difusión de contaminantes en la atmósfera y continúa con la absorción parcial de la vegetación, el ganado, las superficies, el arrastre por lluvia o cuando se escapa al espacio.

La dispersión de un contaminante en la atmósfera es el resultado del movimiento general del aire que transporta el contaminante en la dirección del viento, las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan el contaminante en todas direcciones y la difusión de la

TABLA 3.

CRITERIOS DE PRESELECCIÓN DE SITIOS POTENCIALES

Operativas	Ambientales	Legales
<ul style="list-style-type: none"> • Poseer un área mínima requerida para la actividad industrial que se desea realizar. • Contar con los servicios mínimos requeridos (fuentes de suministro de agua, luz, teléfono, entre otros). • Contar con caminos y carreteras que faciliten la accesibilidad a las mismas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicarse en un punto en el que la dirección y velocidad del viento no favorezcan la dispersión de contaminantes hacia las poblaciones. • Estar fuera de la mancha urbana, zonas de preservación y fomento ecológico o en zonas comprendidas en los planes de desarrollo urbano (distancia mínima de 1.5 km.). • Encontrarse alejado de áreas que representen un peligro para las especies y subespecies de flora y fauna silvestres en peligro de extinción, amenazadas, endémicas, raras o sujetas a protección especial, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994 (Instituto Nacional de Ecología, 1994). 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplir con las distancias mínimas de separación de carreteras y caminos establecidas por la ley (1500 metros de carreteras primarios y 150 m de caminos secundarios). • Encontrarse fuera de zonas catalogadas como susceptibles a contingencias naturales o ambientales. • Alejarse al menos 1,000 m de oleoductos, poliductos, gasoductos y ductos de cualquier tipo, de líneas de transmisión de alta tensión, subestaciones eléctricas, estaciones termoeléctricas y de líneas telefónicas, aéreas o de fibra óptica subterráneas (Instituto Nacional de Ecología, 1994).

Fuente: Ruvalcaba y Correa (2011)

masa debido a los gradientes de concentración. Además, las características aerodinámicas generales, como el tamaño, forma y peso del contaminante, afectan la tasa a la que las partículas se asientan en el terreno o se mantienen en el aire.

De acuerdo con Turner (1994:1-7), entre los parámetros meteorológicos requeridos para modelar plumas se encuentran la dirección del viento, rugosidad de la superficie, turbulencia térmica (vientos ligeros y gradiente de temperatura negativo) y mecánica (afectación por edificios y rugosidad del terreno), condiciones de estabilidad atmosférica, perfil de velocidad del viento y características de las chimeneas.

4.4 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE RECEPCIÓN DE CONTAMINANTES

AERMOD requiere de un preprocesador que organiza y procesa los datos meteorológicos y las estimaciones de los parámetros de la capa límite. El preprocesador meteorológico que sirve para este propósito es AERMET. Sin embargo, si los datos meteorológicos disponibles no tienen el formato para este preprocesador, ni se tienen datos adicionales necesarios para ajustarlo, se sugiere generarlos de manera directa. Dependiendo de la información meteorológica disponible, se recomienda realizar una o más de las siguientes actividades:

- Encuentre los rangos y la distribución de probabilidad a la que mejor se ajustan las temperaturas históricas disponibles, para poder generar una estimación hora por hora de las mismas.
- Calcule el rango del albedo (utilizado para medir la capacidad de reflexión de la luz y una superficie), correspondiente al tipo de suelo de la región.
- Identifique la dirección del viento a lo largo del año.
- Calcule la velocidad de fricción, la longitud Monin-Obukhov, la escala de velocidad convectiva, la altura de la mezcla y el flujo de calor de la superficie.
- Genere los archivos que contienen la información de la superficie y el perfil meteorológico que son

requeridos por AERMOD (consulte EPA, 2004).

El procesador AERMOD y su correspondiente código fuente en FORTRAN se obtienen de la página de la EPA. Se requiere un modelo para cada una de las combinaciones pareadas ubicación-contaminante resultantes.

CALPUFF toma como entrada datos meteorológicos generados a partir de los preprocesadores CALMET o AERMET. De acuerdo con algunos expertos, es mejor la información generada por CALMET (debido a que integra muchos más datos referentes a la superficie del terreno). Sin embargo, los datos meteorológicos requeridos no se miden ni registran en todas las poblaciones mexicanas (presión, temperatura, dirección y velocidad del viento a diferentes alturas).

En el caso de CALPUFF se puede usar el programa CALPRO Standard 6.4.0.05_27_2008, el cual, requiere un modelo por cada sitio potencial. Además se puede emplear el post-procesador CALPOST para facilitar la interpretación de resultados, donde se requiere un modelo para cada par ubicación-contaminante.

4.5 APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El problema tratado consiste en identificar los n mejores sitios de entre un conjunto de sitios potenciales considerando un enfoque multiobjetivo. Se trata de un problema de localización de naturaleza compleja que trata de encontrar un balance entre factores ambientales y operativos del negocio. Los objetivos son maximizar la dispersión de las instalaciones y minimizar la distancia a clientes y proveedores. La principal restricción es que la cantidad de contaminantes en la atmósfera de las poblaciones cercanas no exceda los límites legalmente establecidos. El problema descrito es modelado matemáticamente tomando como base el modelo propuesto por Ruvalcaba *et al.* (2010a) como sigue:

Sea J el conjunto de instalaciones potenciales j con un

mismo tamaño y capacidad, que se encuentran ubicadas a una distancia en kilómetros d_{ij} entre ellas, donde un subconjunto n de instalaciones es seleccionado a partir del conjunto J . Cada una de las nuevas instalaciones seleccionadas emite un conjunto K de contaminantes k , que es recibido por un conjunto I de poblaciones i , que se encuentran localizados a una distancia d_{ij} en kilómetros de las instalaciones j . Sea C_{ijk} el nivel de contaminante k , emitido por la instalación potencial j , recibido por el punto i , que es calculado mediante los modelos de difusión espacial AERMOD y CALPUFF. La cantidad de contaminante k emitido por el subconjunto n de instalaciones debe ser menor o igual a un límite g_k legalmente establecido.

El problema considera un conjunto de proveedores S y un conjunto de clientes R ubicados a una distancia en kilómetros d_{sj} y d_{rj} de las instalaciones potenciales j , respectivamente. La variable de decisión $x_j \in \{0,1\}$ toma un valor de 1 si la instalación j es abierta y de 0 en cualquier otro caso. Z_j es una variable auxiliar que almacena la suma de las distancias mínimas entre las $n \in J$ instalaciones.

$$\text{Maximizar } \sum_{j \in J} Z_j \quad (1)$$

$$\text{Minimizar } \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} d_{rj} x_j + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} d_{sj} x_j \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} d_{ij} x_i x_j \geq Z_j \quad \forall j \in J, j \neq l \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = n \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ijk} x_j \leq g_k, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

En este modelo las ecuaciones (1) y (3) maximizan la distancia mínima entre las nuevas instalaciones, lo cual

reduce el impacto de los contaminantes recibidos por las poblaciones cercanas y evita el traslape de mercados. La ecuación (2) minimiza la distancia a clientes y proveedores. La ecuación (4) selecciona los n puntos para la relocalización de las nuevas instalaciones. La ecuación (5) asegura que la concentración C_{ijk} de contaminante k emitido por la instalación j y que es recibido por la población i no exceda los límites legalmente establecidos. Finalmente la ecuación (6) describe la variable binaria x_j .

5. RESULTADOS

El caso de estudio fue resuelto en una laptop HP pavilion dv4-2013la con un procesador AMD Athlon II Dual Core a 800 MHz y 3 GB en memoria RAM. Los datos meteorológicos fueron proporcionados por CONAGUA en formato Excel e incluyen información de las estaciones y registros históricos de temperatura en Yahualica, Jalisco. Se requirió ejecutar 15 modelos AERMOD uno por cada par ubicación-contaminante. El tiempo de ejecución de cada modelo fue de 4 segundos. Además fueron necesarios 5 modelos CALPUFF y 15 modelos CALPOST los cuales fueron ejecutados en 40 y 2 segundos cada uno, respectivamente.

Se resolvieron dos modelos matemáticos, uno con los parámetros obtenidos del modelo AERMOD y otro para los del CALPUFF. Los modelos matemáticos fueron resueltos con LINGO v.10 utilizando el método ϵ -constraint. Este método permite optimizar un único objetivo transformando los demás objetivos en restricciones dentro del modelo. Esas restricciones están limitadas por un vector ϵ en el lado derecho, cuyos valores son modificados sistemáticamente para obtener el frente de Pareto (Cagnina, 2010). En este trabajo, la función en la ecuación (1) fue seleccionada como objetivo principal, mientras que la función en la ecuación (2) fue transformada en restricción como sigue:

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} d_{cj} x_j + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} d_{sj} x_j \leq \epsilon_1 \quad (7)$$

Los modelos matemáticos fueron resueltos en un promedio de 20 segundos cada uno. Las configuraciones alternativas obtenidas se muestran en la tabla 4. Gráficamente puede observarse que los frentes AERMOD y CALPUFF son diferentes y solo presentan una alternativa en común. Las soluciones con parámetros

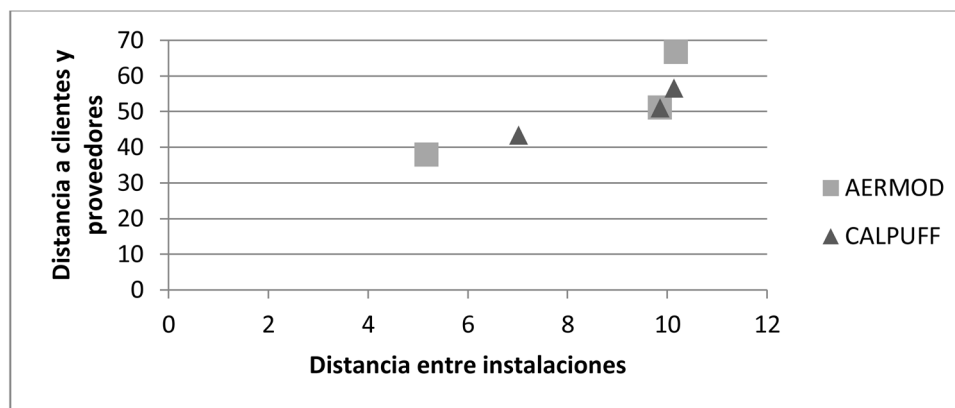
CALPUFF parecen ser más estables, al encontrarse ubicadas al centro del frente de Pareto, mientras que las los parámetros AERMOD presentan un comportamiento extremo (figura 4).

TABLA 4.
FRENTES DE PARETO OBTENIDOS.

	Funciones		Sitios candidatos				
	Distancia entre instalaciones	Distancia a clientes y proveedores	1	2	3	4	5
ABD1	10.1805916	66.50697	1	-	-	-	1
	9.85243886	50.97062	-	-	1	-	1
	5.18168194	37.81582	-	-	1	1	-
CBD1	10.1320505	56.44967	-	1	-	-	1
	9.85243886	50.97062	-	-	1	-	1
	7.02006097	43.29487	-	1	-	1	-

Fuente: Ruvalcaba y Correa (2011)

FIGURA 4.
FRENTES DE PARETO PARA EL CASO LADRILLERAS



Fuente: Ruvalcaba y Correa (2011)

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Como consecuencia del desarrollo industrial los contaminantes atmosféricos se han incrementado considerablemente en muchas ciudades del mundo. Esto hace necesario que se establezcan una serie de propuestas y legislaciones para reducir su emisión e impacto en los seres vivos expuestos a ella. La reubicación es una medida adoptada en México para reducir el impacto de la contaminación industrial en las poblaciones cercanas. Sin embargo, se trata de una decisión difícil, ya que requiere garantizar que las nuevas ubicaciones resulten económica y ecológicamente viables.

Para apoyar esta decisión, en este trabajo se propone una metodología que integra parámetros obtenidos con modelos de difusión espacial en un modelo multiobjetivo de ubicación de instalaciones. En este modelo solo se contempla la ubicación de industrias que emiten contaminantes a la atmósfera a través de fuentes fijas, pero que puede extenderse fácilmente a otro tipo de contaminantes. Vale la pena aclarar que los modelos propuestos no buscan reducir la emisión de contaminante a la atmósfera, sino la de proporcionar una alternativa local de corto-mediano plazo que asegure el cumplimiento de la legislación vigente en materia de recepción de contaminantes.

La reubicación industrial es una decisión estratégica que representa una inversión considerable y de la cual dependen la planificación y costos de las operaciones logísticas (internas y externas) futuras, así como el ciclo de vida de la nueva instalación. Por ello y con la intención de incrementar el ciclo de vida de las nuevas instalaciones se propone una lista de criterios de preselección de sitios candidatos, que busca eliminar aquellos sitios que no cumplan con algunas disposiciones operativas, ecológicas y legales consideradas prioritarias para este tipo de instalaciones. Cabe mencionar que la consideración de estos criterios reduce considerablemente el tamaño de las instancias, lo que reduce los tiempos para la obtención

de resultados y permite el uso de software comercial.

Aunque la lista de criterios de preselección ayuda a eliminar sitios potenciales que derivarían en soluciones poco prácticas, existen algunos otros aspectos que contribuyen a determinar qué soluciones son mejores. Entre éstos aspectos se encuentran la accesibilidad (es decir, el acceso a través de carreteras principales) y la cercanía a los proveedores. En nuestro caso de aplicación la mejor opción es la que incluya a las instalaciones 3 y 5 (por su accesibilidad) o aquellas que incluyan a cualquiera de las dos instalaciones anteriores en combinación con la instalación 4 (por su cercanía a los proveedores, aunque la mejor combinación se da con la instalación 3). Bajo este contexto, las mejores soluciones son obtenidas con los parámetros AERMOD.

Los modelos de difusión espacial AERMOD y CALPUFF (aceptados como estándares internacionales por la EPA), se utilizan para simular el comportamiento del contaminante emitido y determinar qué nivel de este es percibido por las poblaciones cercanas. El modelo AERMOD es recomendado por la EPA para distancias cortas (menores de 50 km), mientras que el modelo CALPUFF se utiliza tanto para distancias cortas como grandes, aunque tiene un mejor desempeño en distancias grandes.

Un inconveniente de los modelos AERMOD y CALPUFF es que requieren muchos datos meteorológicos que no se miden ni registran en poblaciones pequeñas de México, además de que no son suministrados por una fuente única ni en los formatos requeridos por el software proporcionado por la EPA. De hecho los datos obtenidos para el caso de aplicación en este trabajo requirieron ser manipulados de forma directa e indirecta para su utilización. Cabe mencionar también que CALPUFF no se explotó al máximo debido a la ausencia de algunos de estos datos meteorológicos. Aunque en el caso de aplicación el modelo AERMOD resultó ser la mejor opción, vale la pena aclarar que debido a sus limitaciones de alcance, lo recomendamos solo para casos de

microlocalización.

Es importante mencionar también que la distancia requerida para que la recepción de contaminantes este dentro de los límites establecidos por la ley, está sujeta al tipo de combustible y de las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, entre otras) de la región que se esté analizando. Un análisis más profundo de estas distancias con diferentes combustibles podría contribuir a la definición, modificación y adaptación de normas relacionadas con la ubicación de instalaciones industriales con miras a proteger el ambiente y los seres vivos cercanos a ellas.

7. REFERENCIAS

- Bumb, Adriana. (2002). **Approximation Algorithms for Facility Location Problems**. Tesis de Doctorado publicada. University of Twente, The Netherlands. Fuente: <http://doc.utwente.nl/38644/> (consultado 15 -02- 2010).
- Cagnina, Leticia Cecilia. (2010). **Optimización Mono y Multiobjetivo a través de una Heurística de Inteligencia Colectiva**. Tesis. Universidad Nacional de San Luis, Argentina.
- Daskin Mark S. (1995). **Introduction to Location Theory and Models**. En Wiley-Interscience (Eds). Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications, pp. 10. USA.
- Davydova-Belitskaya Valentina, Skiba Yuri N., Bulgakov Sergei N., Martínez Alejandro. (1999). **Modelación matemática de contaminación en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México**. Parte I. Microclima y monitoreo de la contaminación. Revista de contaminación ambiental, año/vol. 15, num. 002. Universidad Autónoma de México, D.F., México, pp. 103-111.
- EPA (2004). AERMOD. Description of model formulation. EPA-454/R-03-004. **US Environmental Protection Agency**: North Carolina.
- Farahani Reza Zanjirani, SteadieSeifi Maryam, Asgari Nasrin. (2010). **Multiple criteria facility location problems: A survey**. Applied Mathematical Modelling, Vol. 34, pp. 1689-1709.
- García Rafael Guillermo, Caro Martha Patricia, Díaz Héctor Bernardo, Sánchez Laura Leticia, Carrillo Martha Elena. (2004). **Metodología de marco de referencia para localización de instalaciones**. Ingeniería y Universidad. 8(2), pp. 139 – 157.
- Henry J. Glynn, Heinke Gary W. (1999). **Ingeniería ambiental**. Segunda edición. Prentice Hall, México.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente: **Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1988**. Reforma: Diario Oficial de la Federación 28 de enero de 2011. México. Extraído de <http://www.cddhcu.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>
- Moyano Fuentes José y Bruque Sebastián (2001). **Administración de empresas y organización de la producción**. Escuela Universitaria Politécnica de Linares, Universidad de Jaén. Lineares.
- Panayotou Theodore, Faris Robert, Uribe Eduardo, Duque Jorge, Galarza Elsa. (2003). **Competitividad y contaminación industrial en la Región Andina**. Manuel del Valle (Ed). Corporación Andina de Fomento. Quito, Ecuador.
- Ruvalcaba M. Loecelia, Correa Juan Gabriel, Olivares-Benítez Elías, Álvarez Francisco Javier. (2010a). **A Multiobjective Model for Brickworks Relocation. Proceedings of the 2010 Industrial Engineering Research Conference**, Cancún México.
- Ruvalcaba M. Loecelia, Correa Juan Gabriel, Olivares-Benítez Elías, Miranda Pablo A., Garza Laura A.

(2010b). **A multiperiod and multiobjective model for location of obnoxious facilities**. 15th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice, México.

Scire Joshep S, Strimaitis David G., Yamartino Robert J. (2000). **A user's guide for the CALPUFF dispersion Model**. Earth Tech Inc.

Secretaría de Salud (2010), <http://www.salud.gob.mx/>

SEMARNAT, 1994, “**Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, Contaminación atmosférica**”, México, Diario Oficial de la Federación.

Sinha Amitabh. (2004). **Location, location, location and location**: Facility location incorporating demand uncertainty, logistic network design, product heterogeneity and competition. Thesis. Tepper school of business, Carnegie Mellon University.

Turner D. Bruce. (1994). **Workbook of atmospheric dispersion estimates**: an introduction to dispersion modeling. Second Edition, Lewis Publisher, E.U.