



7th INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Sonora, México

ZEPEDA, D. S.^a, MUNGUÍA, N.E.^a, SANCHEZ, B. C.^a, MACHADO, C. L.^a, ESQUER, J.^a, VELAZQUEZ, L.E.^a

a. Posgrado en Sustentabilidad, Universidad de Sonora, México

**Corresponding author, david.zepeda@unison.mx*

Abstract

In the last decades, as part of the urgency of solving environmental problems, several agreements have been generated regarding the reduction of Greenhouse Gases (GHG) (Diamantoudi and Sartzetakis, 2006). The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) together with the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC for its acronym in English) seek the stabilization of GHG emissions with respect to the pre-industrial era (Duarte, 2006). The Paris Agreement in 2015 established GHG reduction targets for developed countries and committed them to financially support developing countries (Martínez, 2017). However, the commitments of the nations involved in taking strategic measures to reduce the generation of GHG are still insufficient to minimize climate change (La Jornada, 2017). The main objective of this work is to show the results and experiences obtained during the creation of an inventory of greenhouse gases for the State of Sonora, Mexico and expose the limitations in the generation of this type of inventories.

Keywords: *Greenhouse Gases Inventories, Climate Change*

1. Introducción

El presente trabajo muestra los resultados y experiencias obtenidas durante la creación de un inventario de gases de efecto invernadero para el Estado de Sonora, México. En las últimas décadas, como parte de la urgencia de solucionar problemas ambientales, se han generado diversos acuerdos en materia de reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Diamantoudi y Sartzetakis, 2006). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) junto con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) buscan la estabilización de las emisiones de GEI respecto a la era pre-industrial (Duarte, 2006). El Acuerdo de París en el 2015 estableció metas de reducción de GEI a los países desarrollados y los comprometió a apoyar económicamente a los países en vías de desarrollo (Martínez, 2017). Sin embargo, los compromisos de las naciones involucradas en la toma de medidas estratégicas para reducir la generación de GEI aún resultan insuficientes para minimizar el cambio climático (La Jornada, 2017).

Para que las medidas estratégicas de disminución de GEI sean llevadas a cabo, primero se necesita tomar la información proveniente de las emisiones de los diversos sectores de producción (Álvarez et al., 2010). De acuerdo a Ocman (2015) aún existe poco avance en la implementación de medidas ambientales debido a la falta de análisis e interpretación después de la toma de información. Por lo

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

tanto, es claro que se ocupa de una parte técnica y/o práctica que apoye tanto a los sectores productivos como a los responsables de encaminar las medidas ambientales a un nivel de formulación estratégica (Girod y De Haan, 2009).

Inventarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Con el fin de cuantificar y evaluar el nivel de contribución de los GEI, es necesario establecer un modelo de inventario que se ajuste a las normas aceptadas internacionalmente (Chen y Lin, 2008). De acuerdo a Fager y Davidson (2008) y Bastianoni et al. (2004) el objetivo y responsabilidad de crear un inventario GEI es el de reportar el impacto medioambiental que deja tanto un país como una actividad específica. De la misma manera, Vallero (2008) asegura que en un inventario es necesario enlistar la cantidad de contaminantes provenientes de todas las fuentes de emisiones que ingresan al aire en un periodo determinado, sin la interferencia de normas ambientales. Por lo que funcionalmente un inventario de emisiones busca planear posibles políticas que ayuden a reducir las emisiones antropogénicas (Ministry of the Environment of Japan, 2007).

Países como México que buscan integrarse en la realización de aspectos de cuantificación de emisiones crearon el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) a fin de recabar cada vez mejores estimaciones respecto a las fuentes de emisión (INECC, 2005). De esta manera, mediante la promulgación de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) en el 2012 se estableció una base técnica, legal y financiera para avanzar hacia una economía baja en emisiones de carbono (USAID, 2017). Sin embargo, diversos científicos mexicanos señalan que abordar el tema desde un punto de vista integral mejorará la falta de comprensión que hay entre la cuantificación y evaluación de las emisiones GEI y requerirá tratar este tipo de problemática ambiental con mayor base científica (Leal, 2006).

Países desarrollados que cuentan con legislación ambiental diferente, como el caso de Estados Unidos, no se encuentra dentro de protocolos internacionales ya que considera que sus pérdidas económicas en el país serán de mayor trascendencia que las ambientales (Pérez, 2015). Esto conlleva a que la implementación de la política nacional sea cada vez más frecuente con acciones a escala ciudad (Ramawami, et al., 2008). Estas consideraciones se realizan de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) la cual desarrolla reportes de inventarios anuales, rastreando las emisiones totales y absorciones anuales de los diversos sectores económicos mediante la utilización de datos nacionales de energía, actividades agrícolas nacionales y otras estadísticas nacionales que proporcionan una contabilidad completa de los GEI (EPA, 2017).

No obstante, existen países en desarrollo como China que si están dentro de acuerdos internacionales, y que a pesar de ser uno de los principales contribuidores de contaminantes GEI cuenta con el compromiso de notificar la implementación de inventarios respecto a sus emisiones atmosféricas nacional (Chaolin et al., 2014). El uso de inventarios en este país es calculado únicamente con la utilización de datos de energía generados por diversos sectores; por lo que la compilación de datos se

vuelve no uniforme e inconsistente, aunado a que solo se llevan a cabo en metrópolis (Shan et al., 2016; Zhou et al., 2010). Por lo que resulta esencial que China se vuelva uno de los países con mayor responsabilidad ambiental ya que su participación dentro del impacto climático global es significativo (Peters et al., 2007).

Para llevar a cabo un inventario de emisiones es necesario una recopilación detallada de los contaminantes atmosféricos de las diversas fuentes antropogénicas, es decir, transporte, industrias, agricultura, energía, etc., el cual permita identificar qué tipo de actividad es la que contribuye en mayor proporción (Romero, 2014). El IPCC ha establecido la metodología básica para elaborar este tipo de inventarios en donde se agrupan, con información nacional respecto a cada país, los datos del tipo de actividad, combustible y proceso productivo, respecto al uso de factores de emisión por contaminante (Fernández et al., 2010; SEMARNAT, 2016). Por consiguiente, cuentan con la ventaja de proporcionar información valiosa y de primera mano tanto para el gobierno como a empresas que tengan como finalidad evaluar la factibilidad de realizar un plan estratégico para reducir la generación de GEI (EPA, 2005).

El uso de proyecciones o escenarios ha hecho que los informes de evaluación del IPCC rijan modelos que evalúen los posibles impactos climáticos (Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla, 2007). Esto se realiza mediante una representación medible sobre un conjunto de variables, que pueden ser población mundial, actividad industrial, cambios de temperatura, etc., construidas sobre diferentes prospectos o fuentes históricas (Austria y Gómez, 2007). Gracias al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) se ha establecido una guía que ayuda a coordinadores ambientales a identificar dichos escenarios climáticos desde un punto de vista también financiero, informático y científico, como se puede ver en la Figura 1; dando lugar a que exista una interrelación entre ellas para contar con una mejor visión sobre los escenarios climáticos (PNUD, 2011).

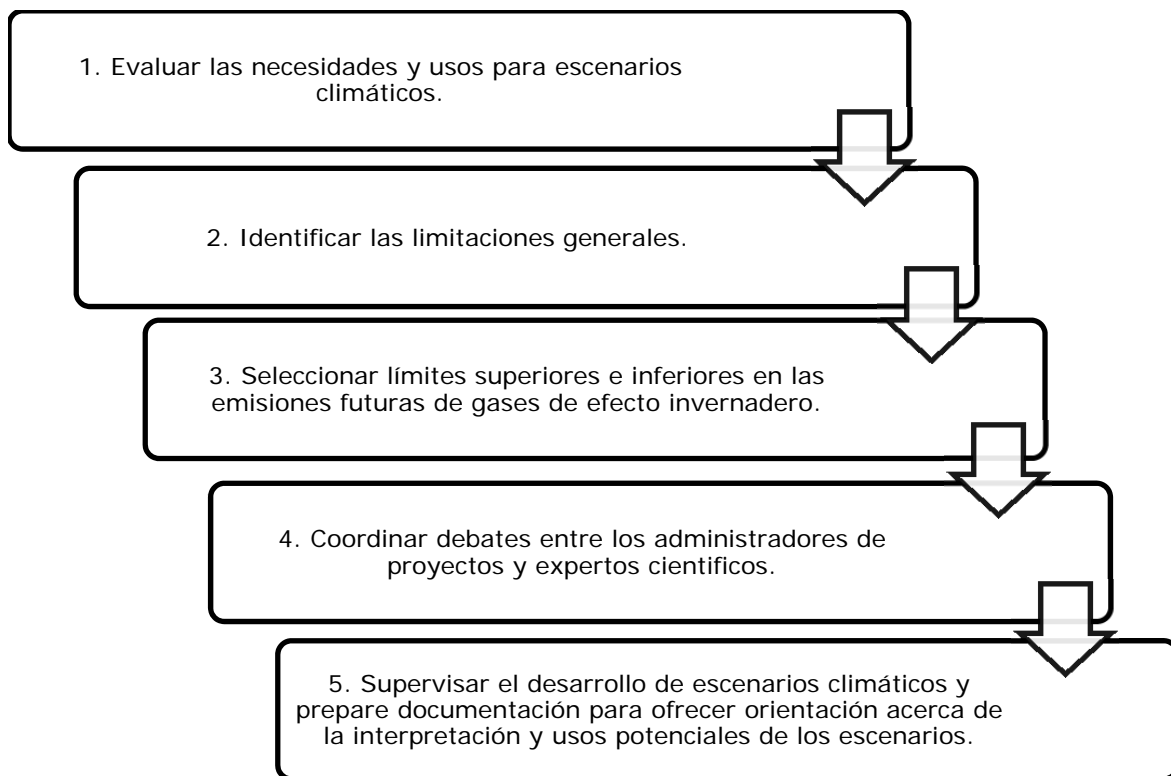


Figura 1. Marco del PNUD para el desarrollo de escenarios climáticos. Fuente: PNUD, 2011

Realizar un inventario de emisiones es una tarea compleja que demanda la integración de información entre industrias y autoridades reguladoras, por lo que cuentan con un grado de incertidumbre que a su vez evidencian las fortalezas y debilidades de un inventario (Cremades y Rincón, 2011). El IPCC establece que es necesario analizar la incertidumbre de cualquier inventario con el fin de reducir éstas en el futuro y así priorizar esfuerzos en la toma de decisiones (IPCC, 2006). Gracias a esto, es posible desarrollar buenas prácticas a través de métodos prácticos, defendibles científicamente, fácilmente aplicables y lo suficientemente robustos (IPCC, 2007); tal es el caso del trabajo que aquí se presenta.

Para disminuir la proliferación de GEI y así detener el calentamiento global, se requiere de un método de contabilidad equitativo donde se asigne la responsabilidad de las emisiones (Bastianoni et al., 2004). Asimismo, se necesita la alianza de una sociedad económicamente racional y políticamente pragmática para ejecutar planes de reducción de GEI (Innerarity, 2012); que por último engloben la búsqueda de alternativas para mitigar el cambio climático desde un punto de vista nacional con lineamientos autorizados, oportunos y relevantes (Fornaro et al., 2009).

2. Métodos

Como paso inicial se identificó y seleccionó las fuentes de datos y/o información tomadas en cuenta para la cuantificación de las emisiones reportadas en el 2015, 2016 y 2017. Dichos datos fueron obtenidos a través de registros federales regulados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ya que es la entidad responsable de integrar la información de las actividades

industriales y servicios del país a través de los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC). Mientras que para los registros estatales se utilizaron las Cédulas de Operación Anual (COA) que son notificadas anualmente a la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable (CEDES), siendo estos instrumentos recopiladores de información referente a las actividades, materiales, equipos, productos y descargas, donde se lleva a cabo reportes de mediciones y condiciones ambientales relacionadas al año del reporte, a fin de que la autoridad estatal determine la necesidad de actualizar los permisos y autorizaciones otorgadas. El alcance del estudio comprendió los registros de las emisiones de GEI reportadas durante el año 2015, 2016 y 2017 ante las instituciones correspondientes.

De manera siguiente, se realizó una homogenización de los datos del sector industrial federal del año 2015 y registros estatales del periodo 2015-2017, tomando en cuenta las categorías propuestas por el RETC para el ordenamiento de las empresas que reportan mediante las COA a CEDES. De la misma manera, se homogeneizaron las unidades reportadas en los instrumentos convirtiéndolas a toneladas de CO₂ e.

Como último paso se llevó a cabo una sumatoria para obtener la totalización de las emisiones reportadas por el RETC en el 2015 y por las COAs en los años 2015, 2016 y 2017; es decir, una sumatoria de las toneladas de CO₂e de todas las empresas reportadas para obtener un subtotal a nivel estatal y un subtotal federal permitiendo de esta manera obtener un total de las emisiones reportadas en los últimos tres años en el Estado de Sonora.

3. Resultados

En la tabla 1 se muestra el total de las emisiones de CO₂e de los diferentes subsectores industriales, tanto las registradas a nivel federal como las reportadas a la entidad estatal. Así mismo se muestra la totalización de las emisiones reportadas del año 2015 ante SEMARNAT y CEDES del año 2015, 2016 y 2017, en donde se obtuvo un total de 31 926 323.50 toneladas de CO₂ equivalente. Como se puede observar en la tabla, las emisiones reportadas por las COAs en los años 2015 y 2016 registran emisiones con 16 738 334 y 220 001.38 toneladas de CO₂e respectivamente, superando en gran medida las 2 204.55 toneladas de CO₂e reportadas en el año 2017.

SUBSECTORES HOMOGENEIZADOS	FUENTES DE INFORMACIÓN			
	RETC 2015	COA		
		2015	2016	2017
Alimenticio y/o consumo humano	15 566.63	48 815.67	370.03	919.37
Artículos y productos metálicos	720.52	286 008.36	29.78	237.42
Artículos y productos plásticos	0.00	12 002.00	187 851.40	0.00
Automotriz	538 270.00	0.13	6 937.78	0.00
Bebidas y tabaco	32 273.35	0.00	5 953.06	1 047.75
Celulosa y papel	0.00	11.65	30.72	0.00
Cemento y cal	1 351 436.88	2 144.91	81.28	0.00

Equipos y artículos electrónicos, eléctricos y domésticos	0.00	546.82	666.14	0.00
Generación propia de energía eléctrica	6 323 146.99	16 342 400.00	11 991.14	0.00
Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	6 701 298.26	65 513.78	2 042.16	0.00
Petróleo y petroquímica	3 070.96	89.47	11.66	0.00
Textiles, fibras e hilos	0.00	218.32	3 125.20	0.00
Otros*	0.00	0.86	911.00	0.00
Subtotal de toneladas de CO ₂ equivalente	14 965 783.60	16 757 752.00	220 001.38	2 204.55
		16 960 539.90		
Total de toneladas de CO ₂ equivalente	31 926 323.50			

Tabla 1. Emisiones en toneladas de CO₂ equivalente

*Empresas privadas dedicadas al turismo, a la salud humana, etc.

El subsector industrial que más contribuye con emisiones de GEI es el de Generación propia de Energía Eléctrica con 22 677 538.10 toneladas de CO₂e generando el 71.03 % del total de las emisiones.

En la tabla 2 se muestran las emisiones totales por los tres años de los subsectores industriales del Estado de Sonora reportadas al CEDES. En la totalización se puede observar que el subsector de la industria que más emisiones reporta es el Generación propia de energía eléctrica, seguido por el de Artículos y productos plásticos. Por otro lado, los subsectores que menos aportan emisiones de GEI son las empresas dedicadas a la producción de Celulosa y papel seguido por Petróleo y petroquímica.

Tabla 2. Emisiones en toneladas de CO₂ equivalente por subsectores

* Empresas privadas dedicadas al turismo, a la salud humana, etc.

SUBSECTOR	Total de los 3 años
Alimenticio y/o consumo humano	49 735.04
Artículos y productos metálicos	286.64
Artículos y productos plásticos	466 424.76
Automotriz	6 937.92
Bebidas y tabaco	7 000.81
Celulosa y papel	42.37
Cemento y cal	2 226.20
Equipos y artículos electrónicos, eléctricos y domésticos	1 212.96
Generación propia de energía eléctrica	16 354 391.00
Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	67 555.94
Petróleo y petroquímica	101.13
Textiles, fibras e hilos	3 343.52
Otros*	911.00
TOTAL	16 960 539.9

Limitantes

Durante la realización del inventario de GEI para el Estado de Sonora se presentaron algunas limitantes que sirven como punto de referencia para futuras investigaciones.

La información presentada en el instrumento COA genera incertidumbre dado a que diversos campos del formato están vacíos; no obstante, los resultados presentados son aceptados como aproximaciones reales. Adicionalmente, la unidad de medida reportada correspondiente a las emisiones de CO₂ no está normalizada; es decir, una empresa puede reportar una COA con una unidad de medida diferente a la reportada por otra empresa en el mismo formato. Esto pudiera provocar un error de cálculo al totalizar las emisiones. En respuesta a esta situación se llevó a cabo una doble revisión de la conversión de unidades de medida.

La homogenización de la clasificación de los subsectores industriales se realizó en base al conocimiento de los participantes, por lo que es posible que una empresa haya sido contemplada en una clasificación errónea; a pesar de esto, la cuantificación total de emisiones del sector industrial de Sonora no se ve afectada.

4. Conclusiones

Llevar a cabo la elaboración de un inventario de emisiones de GEI requiere de un grupo interdisciplinario instituido por autoridades gubernamentales y académicos que sean capaces de generar resultados favorables en cuanto a la cuantificación de dichas emisiones. No obstante, aún hace falta que el sector industrial esté a disposición de profundizar sobre el método adecuado y/o estandarizado con la finalidad de obtener información más veraz para los próximos inventarios estatales ya que, a pesar de que no se ha realizado un análisis tal y como lo sugiere el IPCC (2006), las experiencias y limitantes encontradas en este estudio sugieren un alto nivel de incertidumbre.

Referencias

- Álvarez, V., Lara, J. y Moreno, A. H. 2010. Evaluación Y Seguimiento Del Programa Para Mejorar La Calidad Del Aire En La Zona Metropolitana Del Valle De México 2002-2010. *Descripción del PROAIRE*.
- Austria, P. F. M., y Gómez, C. P. 2007 *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. IMTA. [PDF] Disponible en: https://imta.gob.mx/potamologia/images/docs/evento/PolioproMartinez_CarlosPatino.pdf [consultado 15/II/18]
- Bastianoni, S., Pulselli, F. M., y Tiezzi, E. 2004. The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions. *Ecological economics*, 49(3), 253-257.
- Chaolin G., Yan L e Ian G. 2014. China's Urban GHG Inventory and Emissions. *Journal of Climatology and Weather Forecasting*.
- Chen, T. C., y Lin, C. F. 2008. Greenhouse gases emissions from waste management practices using Life Cycle Inventory model. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1), 23-31.

- Conde-Álvarez, C., y Saldaña-Zorrilla, S. 2007. Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23-30.
- Cremades, L. V., y Rincón, G. 2011. Valoración cualitativa de la calidad de un inventario de emisiones industriales para el modelado de dispersión de contaminantes en la costa nororiental de Venezuela. *Interciencia*, 36(2).
- Diamantoudi, E. y Sartzetakis, E. 2006. Stable international environmental agreements: an analytical approach. *Journal of Public Economic Theory*, 8 (2), pp. 247–263.
- Duarte, C. 2006. Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Colección Divulgación [PDF] Disponible en <http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/01/Cambio_global.pdf> [consultado 15/XI/17]
- EPA, 2005. Estimating Greenhouse Gas Emissions; EIIP Documentation Series, Volume VIII. Disponible en <<http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/techreport/volume08/index>> [consultado 14/XII/17]
- EPA, 2017. U.S. Greenhouse gas inventory report: 1990-2014. Greenhouse gas emissions [sitio web] Disponible en <<https://www.epa.gov/ghgemissions/us-greenhouse-gas-inventory-report-1990-2014>> [consultado 04/I/18]
- Fager, C y Davidson, C. 2008. Greenhouse Gas Emissions Inventory 1990-2006. San Francisco State University Inventory [PDF] Disponible en <http://sustain.sfsu.edu/sites/default/files/assets/doc/SF_State_Greenhouse_Gas_Emissions_Inventory.pdf> [consultado 09/I/18]
- Fernández, J. Monroy, I. Hernández, K. Pardo, C. Vilorio, S. Ordoñez Díaz, J. Morales, G. y Rodríguez, E. 2010. Guía de metodologías y medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero para la elaboración de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático. [PDF] Disponible en <http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2010_guia_metodologias_peacc.pdf> [consultado 06/II/18]
- Fornaro, M., Winkelmann, K., Glodstein, D. 2009. "Accounting for Emissions". *Journal of Accountancy*. July 2009. Traducción para VERITAS del Colegio de Contadores Públicos de México por Jorge Abenamar Suárez Arana.
- Girod, B., y De Haan, P. 2009. GHG reduction potential of changes in consumption patterns and higher quality levels: Evidence from Swiss household consumption survey. *Energy Policy*, 37(12), 5650-5661.
- INECC, 2005. Aspectos metodológicos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero INEGI 2002. Dirección General de Investigación sobre la contaminación urbana, regional y global [Sitio web] Disponible en <http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/descargas/aspectos_metod_inegei02.pdf> [consultado 15/I/18]
- Innerarity, D. 2012. Justicia climática. *Dilemata*, (9), 175-191.
- IPCC, 2006. Guidelines for GHG Inventories, Volume 5, Waste. Disponible en <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>> [consultado 26/X/17]
- IPCC, 2007. La cuantificación de las incertidumbres en la práctica. Capítulo 6. [PDF] Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/6_Uncertainty_ES.pdf> [consultado 13/II/18]

- La Jornada, 2017. Instan científicos a cambiar políticas ante emergencia ambiental. Ciencias [revista web] Disponible en <<http://www.jornada.unam.mx/2017/11/14/ciencias/a02n1cie>> [consultado 15/XI/17]
- Leal, J. 2006. Luisa T. Molina y Mario J. Molina (eds.). Air quality in the Mexico megacity. An integrated assessment. EURE (Santiago), 32(96), 141-145.
- Martínez, M. 2017. Estrategias para mitigar los efectos del cambio climático [sitio web] Disponible en <<http://www3.inecol.edu.mx/maduver/index.php/cambio-climatico/6-estrategias.html>> [consultado 07/X/17]
- Minister of Environmental of Japan, 2007. What is an Emission Inventory? Prime Station Corp [PDF] Disponible en <<http://www.acap.asia/publication/pdf/emissioneng.pdf>> [consultado 04/I/18]
- Ocman, C. 2015. Los gobiernos locales y la cooperación transregional como alternativa a la política internacional de cambio climático. Norteamérica, 10 (1), 217-227
- Pérez, R. 2015. La Cumbre del Clima termina con un acuerdo global que “hará historia”. El confidencial [Revista web] Disponible en< http://redambientalperuana.org.pe/wp-content/uploads/2015/12/2-Cambio-clim%C3%A1tico_-La-Cumbre-del-Clima-termina-con-un-acuerdo-global-que-har%C3%A1-historia-12-12-15.pdf >[consultado 25/I18]
- Peters, G. P., Weber, C. L., Guan, D. y Hubacek, K. 2007. China's growing CO2 emissions a race between increasing consumption and efficiency gains. Environ. Sci. Technol., 2007, 41 (17), pp 5939–5944.
- PNUD, 2011. Formulando Escenarios de Cambio Climático para contribuir con estrategias de desarrollo adaptadas al clima. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PDF] Disponible en: http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Climate%20Strategies/Spanish/Formulating-SPN-web-final_11Nov11.pdf< [consultado 14/II/18]
- Ramaswami, A., Hillman, T., Janson, B., Reiner, M., & Thomas, G. 2008. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city-scale greenhouse gas inventories.
- Romero, A. 2014. Inventario de emisiones de contaminantes criterio para el estado de Jalisco año 2008. Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. [Sitio web] Disponible en: <https://semadet.jalisco.gob.mx/medio-ambiente/calidad-del-aire/inventario-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-para-el-estado-de> > [consultado 14/II/18]
- SEMARNAT, 2016. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. [PDF] Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/161446/Cap_CC_completo.pdf < [consultado 14/II/18]
- Shan Y., Guan D., Liu J., Liu Z., Liu J., Schroeder H., Chen Y., Shao S., Mi S., y Zhang Q., 2016. Atmos. Chem. Phys. Discuss
- USAID, 2017. Greenhouse Gas emissions in Mexico. [PDF] Disponible en <https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/2017_USAID_GHG%20Emissions%20Factsheet_Mexico_0.pdf> [consultado 15/I/18]
- Vallero, D. 2008. Sources of air pollution. Fundamentals of Air Pollution (Fourth Edition) [sitio web] Disponible en <<https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/emission-inventory>> [Consultado 15/I/18]

Zhou, S., Chen, H., y Li, S., 2010. Resources use and greenhouse gas emissions in urban economy: 588 ecological input–output modeling for Beijing 2002, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15, 3201-3231.