



# Inventario preliminar de emisiones atmosféricas ( $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ y PTS) de diferentes sectores industriales en Costa Rica

*Preliminary inventory of atmospheric emissions ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and PTS) from different industrial sectors in Costa Rica*

*Inventário preliminar de emissões atmosféricas ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e PTS) de diferentes setores industriais na Costa Rica*

Daniel Alfaro-Alfaro<sup>1</sup> • Luis Salas-Morelli<sup>1</sup> • Bryan Sánchez-Mejías<sup>1</sup>  
José Mora-Barrantes<sup>2</sup> • José Pablo Sibaja-Brenes<sup>2</sup> • Henry Borbón-Alpizar<sup>2</sup>

Received: Jan/27/2020 • Accepted: Sep/6/2020 • Published: Jul/31/2021

## Resumen

El uso de diversos combustibles, el incremento de la urbanización, y el desarrollo económico, han influido en la generación de contaminantes atmosféricos, tales como los  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrógeno), el  $\text{SO}_2$  (dióxido de azufre) y las PTS (partículas totales en suspensión). El sector industrial en Costa Rica cuenta con empresas de diferentes categorías como las de elaboración de productos alimenticios, fundición de vidrio, fabricación de prendas de vestir, entre otras, las cuales generan en sus procesos, emisiones de estos compuestos a la atmósfera. El presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal generar un inventario preliminar de las emisiones atmosféricas ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y PTS) de diferentes sectores industriales de Costa Rica. El inventario se realizó durante el 2019, considerando los resultados de muestreos y mediciones de los contaminantes provenientes de las chimeneas de diferentes procesos productivos (empresas) durante los años 2014 y 2015. El muestreo y la correspondiente medición de la concentración de los contaminantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y PTS) se llevó a cabo mediante el uso del Testo 350 para la medición de los  $\text{NO}_x$  y del  $\text{SO}_2$ , y el contador portátil de partículas marca APEX para la cuantificación de PTS. La tabulación de datos utilizó el programa *Microsoft Excel*, utilizándose además el lenguaje de programación *R*, en la interfaz de *R Studio* para la generación de los gráficos. El sector industrial "elaboración de productos alimenticios" reporta las mayores concentraciones de contaminantes, con valores de 1 246,14 ton/año, 1 959,54 ton/año y 651,01 ton/año para  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y PTS, respectivamente en el 2014; y 2 622,14 ton/año, 3 257,64 ton/año y 346,40 ton/año respectivamente para el 2015 en estos mismos contaminantes.

**Palabras clave:** emisiones gaseosas; contaminación atmosférica;  $\text{NO}_x$ ;  $\text{SO}_2$ ; PTS; Costa Rica.

Daniel Alfaro-Alfaro, ✉ [danielalfaro2@gmail.com](mailto:danielalfaro2@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-8527-6844>

Luis Salas-Morelli, ✉ [salasmorelli22@gmail.com](mailto:salasmorelli22@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-5640-7358>

Bryan Sánchez-Mejías, ✉ [bsanchezmejias@gmail.com](mailto:bsanchezmejias@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-6475-988X>

José Mora-Barrantes, ✉ [jose.mora.barrantes@una.cr](mailto:jose.mora.barrantes@una.cr),  <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>

José Pablo Sibaja-Brenes, ✉ [jose.sibaja.brenes@una.cr](mailto:jose.sibaja.brenes@una.cr),  <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>

Henry Borbón-Alpizar, ✉ [henry.borbon.alpizar@una.cr](mailto:henry.borbon.alpizar@una.cr),  <https://orcid.org/0000-0003-0869-4126>

1 Escuela de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

2 Laboratorio de Química de la Atmósfera, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.



## Abstract

The use of fuels, urbanization growth, and economic development have influenced the generation of atmospheric pollutants such as NO<sub>x</sub> (nitrogen oxides), SO<sub>2</sub> (sulfur dioxide), and TSPs (Total Suspended Particles). The Costa Rican industrial sector has different category companies such as glass melting and manufacturing of food products and clothing, which release emissions of these pollutants into the atmosphere. The main objective of this research is to generate a preliminary inventory of atmospheric emissions (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and TSP) from different industrial sectors in Costa Rica. The inventory was conducted in 2019 and included samplings and measurements of pollutants from chimneys of different production processes (companies) from 2014 and 2015. The sampling and the corresponding measurement of pollutant concentrations (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and TSP) were conducted using Testo 350 to measure NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> and an APEX portable particle counter to quantify TSPs. Data was tabulated using Microsoft Excel, while graphics were generated using R programming language in the R studio interface. The industrial sector entitled "manufacturing of food products" presents the highest amounts of pollutants, with values equal to 1246.14 tons/year, 1959.54 tons/year and 651.01 tons/year for NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and TSP, respectively, for 2014; and 2,622.14 tons/year, 3,257.64 tons/year and 346.40 tons/year, respectively, for 2015.

**Keywords:** inventory; gaseous emissions; atmospheric pollution; NO<sub>x</sub>; SO<sub>2</sub>; TSP; Costa Rica

## Resumo

O uso de diversos combustíveis, o aumento da urbanização, e o desenvolvimento econômico influenciaram na geração de poluentes atmosféricos, tais como os NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio), o SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e as PTS (Partículas Totais em Suspensão). O setor industrial na Costa Rica conta com empresas de diferentes categorias como as de elaboração de produtos alimentícios, fundição de vidro, fabricação de vestuário, entre outras, geradoras, em seus processos, de emissões destes compostos na atmosfera. O presente projeto de pesquisa tem como objetivo principal a geração de um inventário preliminar das emissões atmosféricas (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e PTS) de diferentes setores industriais da Costa Rica. O inventário foi realizado durante o ano de 2019, considerando os resultados de amostragens e medições dos poluentes provenientes das chaminés de diferentes processos produtivos (empresas) durante os anos 2014 e 2015. A amostragem e a correspondente medição da concentração dos poluentes (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e PTS) foram levadas a cabo mediante o uso do Testo 350 para a medição dos NO<sub>x</sub> e do SO<sub>2</sub>, e o contador portátil de partículas da marca APEX para a quantificação de PTS. A tabulação de dados foi realizada no programa Microsoft Excel, usando, também, a linguagem de programação R, na interface de R Studio para a geração dos gráficos. O setor industrial "elaboração de produtos alimentícios" produz as maiores concentrações de poluentes, com valores de 1.246,14 ton/ano, 1.959,54 ton/ano e 651,01 ton/ano para NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e PTS, respectivamente em 2014; e 2.622,14 ton/ano, 3.257,64 ton/ano e 346,40 ton/ano respectivamente em 2015 nestes mesmos poluentes.

**Palavras-chave:** emissões gasosas; contaminação atmosférica; NO<sub>x</sub>; SO<sub>2</sub>; PTS; Costa Rica.

## INTRODUCCIÓN

Debido al desarrollo económico, la urbanización y la dependencia de los combustibles fósiles como medios para obtener

energía, se ha causado un deterioro en la calidad del aire en ciudades desarrolladas o en vías de desarrollo industrial (Zhao *et al.*, 2013). Las actividades antropogénicas son la fuente principal de altas concentraciones de



contaminantes en la atmósfera (Yang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Fujii *et al.*, 2016).

Entre los principales contaminantes de origen antropogénico con mayor presencia en la atmósfera están el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), y las Partículas Totales en Suspensión (PTS). El SO<sub>2</sub> en conjunto con los NO<sub>x</sub>, no solo dificultan la visibilidad, si no que generan efectos adversos sobre la salud humana y la preservación del ecosistema continuamente expuesto, algunas las consecuencias de estas emisiones gaseosas son: la generación de lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono y el aumento del ozono troposférico (Maré *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2018; Ying *et al.*, 2007).

Por su parte, otros contaminantes, como las PTS han adquirido un gran interés en cuanto a su composición, debido a que pueden contener sustancias cancerígenas, como lo son algunos compuestos orgánicos volátiles. De igual forma, las PTS actúan como precursores en la formación de aerosoles secundarios (Hu *et al.*, 2019), además de alterar la extensión vertical, el tiempo de vida y las propiedades ópticas de las nubes al formar núcleos de condensación y consecuentemente, la composición de la precipitación (Joos *et al.*, 2017).

Las principales fuentes de emisión antropogénicas de los NO<sub>x</sub> y del SO<sub>2</sub> son la combustión de combustibles fósiles y de carbón, representado en la quema de biomasa, la principal fuente de emisiones (Fioletov *et al.*, 2015). Con respecto a las PTS, sus fuentes son variadas y su composición es bastante compleja, ya que puede estar conformado por compuestos orgánicos volátiles, así como complejos inorgánicos que incluso son tóxicos para la salud humana, como es el caso del plomo (Chen *et al.*, 2015).

Entre las principales fuentes de PTS están: la erosión del suelo, el movimiento

oceánico y los incendios forestales (Ayrault *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2012). Además de las fuentes antropogénica, existen fuentes naturales que contribuyen a las emisiones gaseosas, por ejemplo, la mayor contribución de los NO<sub>x</sub> se debe a la actividad microbiana en suelos y a tormentas eléctricas por la descarga de rayos (Zhang, 2012); el SO<sub>2</sub> por su parte se libera de forma natural principalmente, por actividad volcánica (Ge *et al.*, 2017).

La inhalación prolongada de los NO<sub>x</sub> y del SO<sub>2</sub> puede generar problemas cardiorespiratorios como arritmia, agravamiento de problemas respiratorios ya existentes como asma, así como aumento en la susceptibilidad de adquirir una infección respiratoria. La exposición prolongada a las PTS puede también, generar los mismos efectos a la salud que los NO<sub>x</sub> y el SO<sub>2</sub>, sin embargo, dependiendo de la composición de estos, incluso se le puede asociar con el desarrollo de cáncer pulmonar (McGranahan, 2012).

En Costa Rica, las principales actividades comerciales e industriales se concentran en el Área Metropolitana (GAM). Dicha región cubre apenas el 3,8 % del territorio nacional, sin embargo, alberga 70 % de la flota vehicular, 60 % de la población y 85 % de la industria, según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2016). Esta zona se ha caracterizado por un crecimiento de tipo radial, el cual ha dado paso a la conurbación de las cuatro ciudades principales, Alajuela, Heredia, San José y Cartago (Herrera *et al.*, 2016).

Según el Inventario de Emisiones Contaminantes de Costa Rica del 2011, en la GAM se generaron, durante este período 418 663 toneladas de monóxido de carbono (CO), 64 640 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y 6149 de PM<sub>10</sub>, siendo los vehículos de carga liviana quienes generan más de la mitad de las partículas PM<sub>10</sub>, mientras que los autos



particulares son los mayores generadores de NO<sub>x</sub> y CO (Herrera *et al.*, 2017).

La contaminación atmosférica se debe cuantificar para determinar el grado del problema y generar acciones en el campo de la gestión de la calidad del aire. Existen diferentes herramientas metodológicas las cuales permiten calcular la presencia de contaminantes en el ambiente como los sistemas de monitoreo y los inventarios de emisiones.

Adicionalmente, estas sirven de insumo técnico para generar estudios correlacionales, empleando técnicas de modelación y de esta manera plantear alternativas para la reducción de la contaminación (Herrera *et al.*, 2016). El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal la generación de un inventario preliminar de las emisiones gaseosas de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PTS emitidas por las chimeneas de diferentes procesos productivos de las empresas en Costa Rica, con fin de identificar aquellos sectores industriales con mayor emisión de contaminantes.

La información recopilada permitirá la toma de decisiones en la mejora de la calidad del aire y servirá como insumo preliminar de una línea de base de concentración de las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PTS de los sectores industriales estudiados.

## METODOLOGÍA

### *Población de estudio*

Los puntos de muestreo corresponden solamente a fuentes fijas (chimeneas) de emisiones gaseosas y sólidas (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PTS) en empresas de diferentes sectores industriales. Las empresas sujetas de estudio son categorizadas según la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (Código CIIU) (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2016). Las mediciones del SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub> y las PTS se realizaron durante un periodo de dos años (2014 y 2015). La clasificación de las industrias evaluadas se incluye en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** *Clasificación de los sectores productivos con su respectiva identificación y cantidad de industrias evaluadas durante el periodo 2014- 2015.*

Sector productivo	Identificación	Cantidad de industrias en 2014	Cantidad de industrias en 2015
Actividades de atención a la salud humana	A	2	1
Alojamiento	B	2	2
Construcción de edificios	C	1	1
Elaboración de productos alimenticios	D	29	23
Elaboración de productos de tabaco	E	1	1
Ensayos y análisis técnicos	F	1	0
Fabricación de jabones y detergentes, etc.	G	0	1
Fabricación de prendas de vestir	H	2	0
Fabricación de productos farmacéuticos, sustancias químicas medicinales, etc.	I	2	1
Fabricación de productos textiles	J	1	1
Fabricación de sustancias y productos químicos	K	1	1
Fabricación de vidrio y de productos de vidrio	L	1	1
Fundición de metales	M	1	1
Total	-	44	32

Nota: fuente propia de la investigación.



### Muestreo de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PTS

Para la medición de los NO<sub>x</sub> y del SO<sub>2</sub> se utilizó el equipo Testo 350, que permite medir a altas concentraciones del gas y maneja diferencias de presión diferencial y de velocidad, esto con el fin de conseguir mediciones de caudal (Testo, 2019; Xie *et al.*, 2019). Para la cuantificación de PTS se utilizó un contador portátil de partículas, marca APEX, del alto alcance de registro de datos y facilidad de manejo (Zamtsu, 2019). La cuantificación de las concentraciones de los parámetros de estudio se realiza *in situ*, mediante los equipos descritos anteriormente.

### Tratamiento de los datos

Mediante una hoja de Microsoft Excel se recopiló información relativa, a nombre de la industria, la localización, la cantidad de puntos de muestreo, la fecha de muestreo, además de datos propios del muestreo de las emisiones como: flujo (m<sup>3</sup>/h), SO<sub>2</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>), PTS (mg/Nm<sup>3</sup>), NO<sub>x</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>), SO<sub>2</sub> (ton/año), PTS (ton/año), NO<sub>x</sub> (ton/año). El análisis estadístico y la generación de gráficos se realizó en el lenguaje de programación R, en la interfaz de R Studio, con los paquetes de datos ggplot2, rgeos y rgdal; procurando una mejor aglomeración de resultados para su interpretación.

### Cuantificación de las emisiones

Para la cuantificación de las emisiones de las chimeneas muestreadas, cada fuente fija de los distintos sectores industriales se sometió a un promedio con respecto al número de muestreos que se realizaron en ellas. En el caso de poseer varias fuentes fijas en una misma empresa, se suman los valores para obtener sus emisiones totales, y de esta manera obtener el aporte total

por sector productivo (Tabla 1). Ese valor luego se transforma mediante la Ecuación 1 en una proyección anual de toneladas de contaminante. El factor de conversión está compuesto por la conversión de horas a año multiplicado por la de miligramos a toneladas de contaminante, según se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{concentración anual de contaminante} \left( \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right) = \text{flujo} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \text{concentración promedio} \left( \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right) * \text{factor de conversión}$$

Ecuación 1. Determinación de la concentración anual de contaminante en toneladas por año.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

### Población de estudio

Según la tabla 2, se realizaron un total de 151 muestreos en ambos años, estudiándose 78 chimeneas de 44 empresas en el 2014, y 91 chimeneas de 32 empresas en el 2015. La mayor parte de los muestreos se realizaron en el 2014. El sector industrial con mayor cantidad de empresas muestreadas corresponde al sector de Elaboración de productos alimenticios, conformado por 29 empresas en el 2014, y 22 empresas en el 2015.

**Tabla 2.** Cantidad de muestreos, chimeneas, empresas y sectores industriales evaluados

Cantidad	2014	2015
Muestreos	92	59
Chimeneas	78	91
Empresas	44	32
Sectores industriales	12	10

Nota: fuente propia de la investigación.



Contrariamente, en más de un sector industrial, se evaluó solamente una empresa, como lo son los sectores denominados de: Construcción de edificios, Elaboración de productos de tabaco, Fabricación de productos textiles, Fabricación de sustancias y Productos químicos, Fabricación de vidrio y Productos de vidrio y Fundición de metales.

### *Emisiones gaseosas de NO<sub>x</sub>*

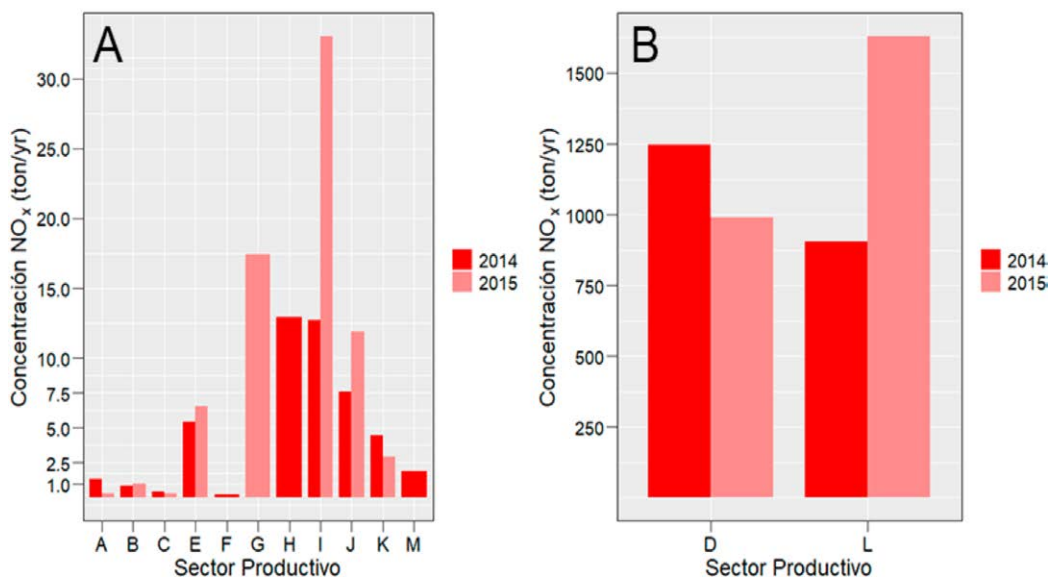
El gráfico 1 contiene información relativa a la concentración de NO<sub>x</sub> (ton/año) emitida durante el periodo de estudio por el sector industrial. La mayor cantidad de emisiones corresponde al año 2015. Del total de los 13 sectores industriales, 11 presentan concentraciones menores a 50 ton/año de NO<sub>x</sub>. Estas corresponden a los denominados: Actividades de atención a la salud humana, Alojamiento, Construcción de edificios, y Ensayos y análisis técnicos; con concentraciones de 1,36 ton/

año, 0,85 ton/año, 0,43 ton/año y 0,24 ton/año respectivamente para el 2014, y de 0,30 ton/año, 1,02 ton/año y 0,28 ton/año para el 2015 (el sector industrial Ensayos y análisis técnicos, no fue evaluado durante el 2015).

El menor aporte de las emisiones de NO<sub>x</sub> se debe a que estos sectores requieren mínimas demandas energéticas y caloríficas, esto, debido a la naturaleza de su proceso productivo, siendo sectores industriales dedicados principalmente, a servicios públicos y no a la elaboración de un producto.

Por su parte, los dos sectores industriales con mayores emisiones gaseosas de NO<sub>x</sub> corresponden a Fabricación de vidrio y de productos de vidrio, y Elaboración de productos alimenticios, con concentraciones de 904,19 ton/año y 1246,14 ton/año respectivamente en el 2014, y de 1630,99 ton/año y 991,16 ton/año respectivamente en el 2015.

Estas mayores concentraciones se deben a que el NO<sub>x</sub> se produce, entre otras



**Gráfico 1.** Concentración en toneladas por año de NO<sub>x</sub> de los distintos sectores productivos muestreados en Costa Rica, para el periodo contemplado entre el 2014 y el 2015. (Gráfica A: sectores productivos entre 0 ton/año a 30 ton/año de NO<sub>x</sub>, gráfica B: sectores productivos entre 250 ton/año a más de 1500 ton/año).

Nota: fuente propia de la investigación.



formas, por combustión de distintas fuentes como combustibles fósiles, gas natural y carbón, así como la quema de biomasa para obtener energía (Souri *et al.*, 2016; Fan *et al.*, 2017). Estos sectores industriales tienen un alto volumen de producción, jornadas continuas de procesos y operaciones que requieren de temperaturas altas.

Estas características de trabajo son la principal causa de los elevados valores de emisiones de NO<sub>x</sub> (Hu *et al.*, 2019). Indican, además, que los sectores industriales Fabricación de vidrio y de productos de vidrio, y Elaboración de productos alimenticios contienen el mayor número de industrias muestreadas. Particularmente, el sector Fabricación de vidrio y de productos de vidrio presentan un proceso de fundición de materia prima, el cual requiere temperaturas de entre 1000 °C a 1500 °C (Garrido *et al.*, 2019).

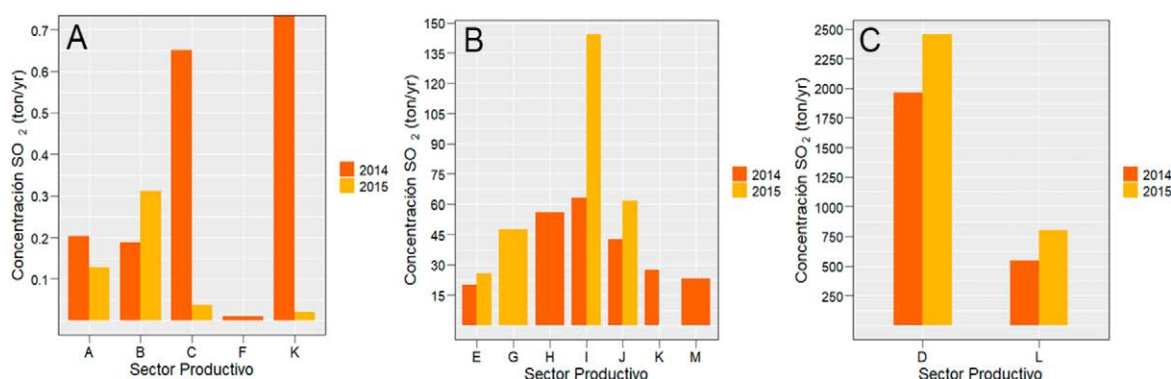
Otros sectores industriales como Fabricación de jabones (con 17,45 ton/año en el 2015) y Fabricación de productos farmacéuticos (con 12,74 ton/año en 2014 y 33,05 ton/año en el 2015) reportan valores intermedios de NO<sub>x</sub>, debido a que su requerimiento calórico para completar las reacciones o las

síntesis y elaborar el producto deseado son mínimas, en comparación con otros sectores industriales (Hu *et al.*, 2019).

En el caso particular de los sectores de Fabricación de prendas de vestir y Fabricación de productos textiles, se reportan valores de 12,94 ton/año y 7,57 ton/año para el 2014 respectivamente, y valores de 11,90 ton/año solo para el sector de Fabricación de productos textiles para el 2015. Estos valores corresponden al elevado consumo de energía eléctrica para convertirla en energía mecánica, además de la utilización de energía calórica para los procesos de calentamiento en distintos procesos (Khude, 2017).

### *Emisiones gaseosas de SO<sub>2</sub>*

El gráfico 2 contiene información relativa a la concentración del SO<sub>2</sub> (ton/año) emitidas durante el periodo de estudio por el sector industrial. La mayor cantidad de emisiones corresponde con el 2014. Del total de los 13 sectores industriales, 4 presentan concentraciones menores a 0,70 ton/año de SO<sub>2</sub>, y 7 presentan concentraciones entre 70 ton/año y 150 ton/año de SO<sub>2</sub>.



**Gráfico 2.** Concentración en toneladas por año del SO<sub>2</sub> de los distintos sectores productivos muestreados en Costa Rica, para el periodo contemplado entre el 2014 y el 2015. (Gráfica A: sectores productivos entre 0,0 ton/año a 0,7 ton/año de SO<sub>2</sub>. Gráfica B: sectores productivos entre 15 ton/año a 150 ton/año de SO<sub>2</sub>. Gráfica C: sectores productivos entre 250 ton/año a más de 2500 ton/año de SO<sub>2</sub>).

Nota: fuente propia de la investigación.



Las menores concentraciones corresponden a los sectores denominados: Actividades de atención a la salud humana y Ensayos y análisis técnicos, con emisiones de 0,20 ton/año y 0,011 ton/año, en el 2014 respectivamente, y de 0,13 ton/año para el sector: Actividades de atención a la salud humana en el 2015. Esto valores obedecen principalmente, a la limitada demanda energética y calorífica de sus procesos productivos, así como al servicio final brindado (atención al público).

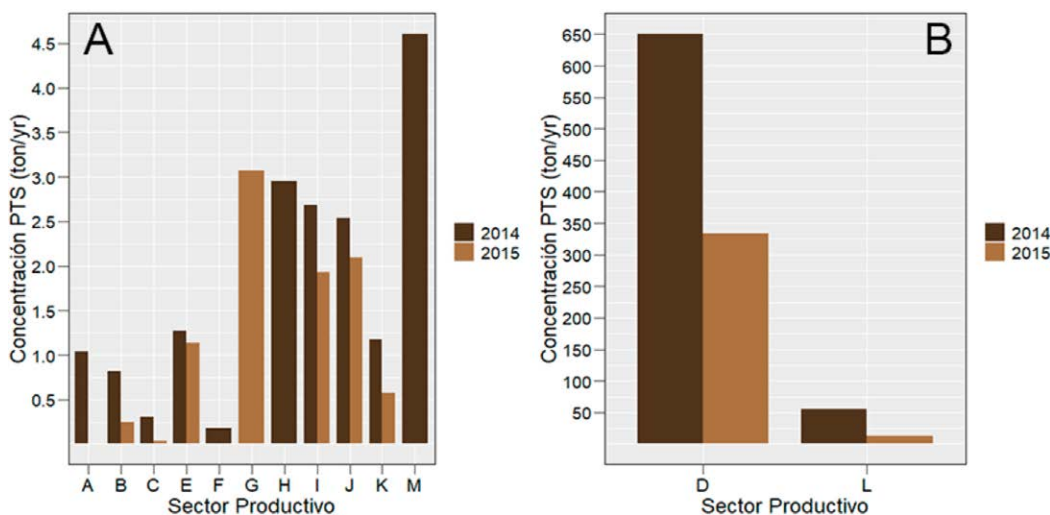
Por su parte, los sectores industriales con mayores emisiones gaseosas de SO<sub>2</sub> corresponden a: Elaboración de productos alimenticios y Fabricación de vidrio y de productos de vidrio, con concentraciones de 1959,94 ton/año y 547,29 ton/año, para el 2014, y para el 2015, de 2453,60 ton/año y 804,05 ton/año respectivamente (gráfico 2, en la gráfica C). Estos dos sectores industriales presentan valores altos de SO<sub>2</sub>, debido al uso de temperaturas elevadas de producción (1000 °C a 1500 °C), con mayor quema de combustible, generando por lo tanto, mayores concentraciones de dióxido de azufre.

Por otra parte, sectores industriales como: Fabricación de jabones, Fabricación de productos farmacéuticos, Fabricación de productos textiles y Fabricación de prendas de vestir poseen valores intermedios de emisiones del SO<sub>2</sub> (gráfico 2, gráfica B), que se debe principalmente, a sus bajos requerimientos energéticos, por lo tanto, se requieren menores temperaturas de combustión y consumo de combustibles fósiles.

### *Emisiones gaseosas de PTS*

El gráfico 3 contiene información relativa a la concentración de PTS (ton/año), emitidas durante el periodo de estudio, por el sector industrial. La mayor cantidad de emisiones corresponde al 2014. Del total de los 13 sectores industriales, 11 presentan concentraciones menores a 5,0 ton/año de PTS, y 2 presentan concentraciones menores a 700 ton/año de PTS.

Las menores concentraciones corresponden a los sectores denominados: Construcción de edificios y Ensayos y análisis técnicos,



**Gráfico 3.** Concentración en toneladas por año de PTS, de los distintos sectores productivos muestreados en Costa Rica, para el periodo contemplado entre el 2014 y el 2015. (Gráfica A: sectores productivos entre 0,0 ton/año a 4,5 ton/año de PTS, gráfica B: sectores productivos entre 50 ton/año a 650 ton/año de PTS).

Nota: fuente propia de la investigación.





con emisiones de 0,30 ton/año y 0,18 ton/año en el 2014, respectivamente. En el caso del sector: Construcción de edificios, las emisiones son de 0,032 ton/año, para el 2015. Los menores valores de PTS (ton/año) obedecen principalmente, a las menores demandas energéticas y caloríficas de sus procesos internos; estos sectores industriales consumen menores cantidades de combustible para su generación de energía calórica (en comparación con resto de los sectores industriales).

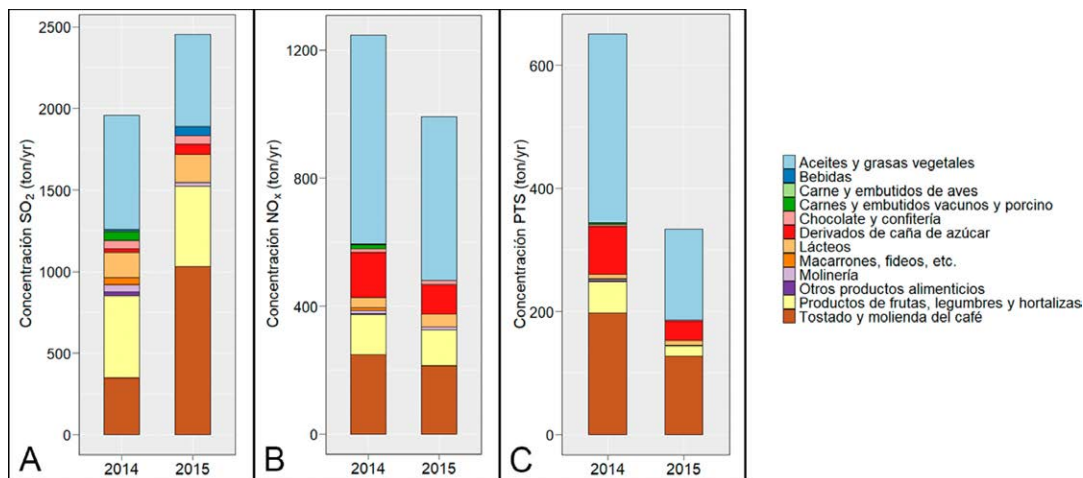
Por su parte, los sectores industriales con mayores emisiones gaseosas de PTS corresponden a: Elaboración de productos alimenticios y Fabricación de vidrio y de productos de vidrio, con concentraciones para el 2014 de 651,01 ton/año y 54,60 ton/año respectivamente; y para el 2015 de 334,09 ton/año y 12,64 ton/año respectivamente. Estos sectores muestran (gráfico 3, gráfica B) valores (ton/año) muy superiores, con respecto al resto de los sitios estudiados, la razón principal es su mayor consumo de combustible fósil para la obtención del producto final.

No obstante, el sector industrial: Fabricación de productos alimenticios (D),

presenta mayores emisiones de PTS en ambos años, comparado con el sector denominado: Fabricación de vidrio y de productos de vidrio (L), esto obedece fundamentalmente, a que el sector D presenta un proceso productivo con un mayor consumo de materia orgánica, generando por lo tanto, mayor cantidad de material particulado, además del proveniente de la quema de combustible fósil, que es común para ambos sectores industriales (D y L).

*Emisiones gaseosas (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PTS) del sector industrial: elaboración de productos alimenticios*

Según lo discutido en los párrafos anteriores, el sector industrial denominado: Elaboración de productos alimenticios, es el que representa la mayor cantidad de emisiones gaseosas de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PTS para los años 2014 y 2015. Las emisiones gaseosas de las diferentes actividades industriales que componen este sector se muestran en el gráfico 4. Se incluye información con respecto a la concentración en toneladas por año de contaminantes (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PTS), de



**Gráfico 4.** Concentración en toneladas por año de contaminantes con respecto a las actividades industriales que comprenden el sector industrial de elaboración de productos alimenticios en Costa Rica, para el período contemplado entre el 2014 y el 2015. (Gráfica A: concentración de SO<sub>2</sub>, gráfica B: concentración de NO<sub>x</sub>, gráfica C: concentración de PTS)  
 Nota: fuente propia de la investigación.



las diferentes actividades industriales que comprenden este sector.

En total, se cuantifican las emisiones gaseosas de 29 y 22 empresas (actividades industriales) perteneciente al sector industrial durante el 2014 y el 2015, respectivamente. Este sector industrial lo conforman actividades industriales relacionados con la producción de: aceites, grasas, bebidas, carnes, embutidos, derivados de caña, entre otros.

Con respecto a las emisiones de los  $\text{NO}_x$ , las actividades industriales con mayor emisión para el 2014 son Aceites y grasas vegetales, Derivados de caña de azúcar, Productos de frutas, legumbres y hortalizas y Tostado y molienda de café; con valores para el 2014 de 652,09 ton/año, 140,40 ton/año, 123,39 ton/año y 249,08 ton/año respectivamente; y para el 2015 de 510,61 ton/año, 91,88 ton/año, 112,25 ton/año y 213,86 ton/año respectivamente. El resto de las actividades industriales que conforman este sector presentan valores menores a 40 ton/año, tanto para el 2014 como para el 2015.

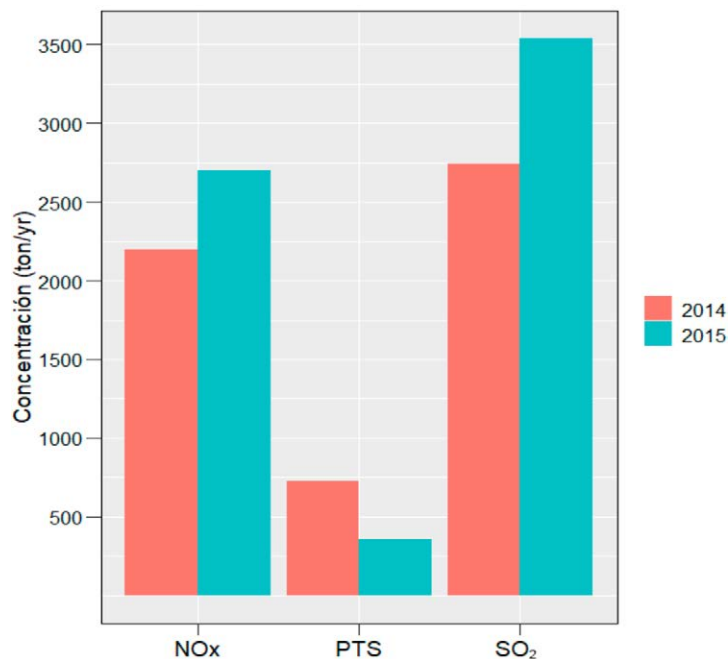
Los mayores valores de emisiones gaseosas de las actividades industriales anteriores, obedecen a los factores discutidos previamente, esto es, mayor demanda de consumo de combustible fósil, producto de la necesidad energética en la generación de los productos finales. En el caso particular de actividades industriales como la producción de; azúcar, aceites vegetales y la actividad de tostado de café, estas, requieren continuamente temperaturas de producción elevadas durante todo el proceso productivo,

generando por lo tanto mayor cantidad de emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ .

En el caso particular de las emisiones de PTS, estas actividades industriales presentan una característica diferenciadora con respecto al resto de las actividades, la cual es, una mayor generación de material particulado, debido al producto final terminado, como lo son el café y el azúcar.

#### *Emisiones totales de $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ y PTS (2014 – 2015)*

El gráfico 5 incluye las emisiones totales de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y PTS para los años 2014 y 2015. Las mayores emisiones en toneladas por año corresponden con el  $\text{SO}_2$ , tanto para el 2014 como el 2015, esto se debe al uso del búnker como principal combustible utilizado para la generación de energía calórica en las empresas estudiadas. Este



**Gráfico 5.** Concentración total de ton/año de los  $\text{NO}_x$ , las PTS y el  $\text{SO}_2$  en el periodo 2014 y 2015.

Nota: fuente propia de la investigación.



combustible posee en su composición un porcentaje de azufre de entre el 0,0 % y el 3,0 % m/m, reportado en la ficha de seguridad del producto químico, en la cual se indica también que no posee nitrógeno en su composición (Recope, 2019).

## CONCLUSIONES

Las emisiones gaseosas del SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub> y las PTS evaluadas corresponde a una población de estudio de 78 chimeneas de las industrias. Para el 2014, se evaluaron 44 actividades industriales y 32 para el 2015. Estas se clasificaron en 13 sectores y el que representa las mayores emisiones del SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub> y las PTS durante el 2014 y el 2015 es el denominado: Elaboración de productos alimenticios.

Las emisiones gaseosas del SO<sub>2</sub> para el sector industrial: Elaboración de productos alimenticios son 1959,54 ton/año y 3257,64 ton/año, para los años 2014 y 2015 respectivamente. Las PTS para el mismo sector y años corresponden a 651,01 ton/año y 346,40 ton/año. Y con las mismas variables las emisiones gaseosas del NO<sub>x</sub> presentan valores 1246,14 ton/año y 2 622,14 ton/año.

Las actividades industriales con mayor emisión para el 2014 son Aceites y grasas vegetales, Derivados de caña de azúcar, Productos de frutas, legumbres y hortalizas y Tostado y molienda de café; con valores para el 2014 de 652,09 ton/año, 140,40 ton/año, 123,39 ton/año y 249,08 ton/año, respectivamente; y para el 2015 de 510,61 ton/año, 91,88 ton/año, 112,25 ton/año y 213,86 ton/año, respectivamente.

Durante el 2015, se reportan los mayores valores de emisiones totales para el SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub>, con valores de 3537,29 ton/año y 2695,62 ton/año, respectivamente. Para el periodo 2014, se registra

la mayor generación partículas totales en suspensión (PTS), con un valor de emisión de 355,82 ton/año.

## RECONOCIMIENTOS

Trabajo elaborado en el marco del curso Gestión ambiental para la industria, de la carrera de Licenciatura en Química Industrial con salida lateral de Bachillerato, con los muestreos en chimenea realizados por el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA).

## DECLARACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

El porcentaje total de contribución para la conceptualización, la preparación, la redacción y la corrección de este artículo fue el siguiente: D.A.A. 16,7 %, L.S.M. 16,7 %, B.S.M. 16,7 %, J.M.B. 16,7 %, J.P.S.B. 16,7 %, H.B.A. 16,7 %.

## DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE LOS DATOS

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor correspondiente [J.P.S.B.], previa solicitud razonable.

## REFERENCIAS

- Ali, K., Budhavant, K. B., Safai, P. D., & Rao, P. S. P. (2012). Seasonal factors influencing in chemical composition of total suspended particles at Pune, India. *Science of the Total Environment*, 414, 257-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.011>



- Ayrault, S., Senhou, A., Moskura, M., & Gaudry, A. (2010). Atmospheric trace element concentrations in total suspended particles near Paris, France. *Atmospheric environment*, 44(30), 3700-3707. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.035>
- Chen, J., Tan, M., Li, Y., Zhang, Y., Lu, W., Tong, Y., ... & Li, Y. (2005). A lead isotope record of Shanghai atmospheric lead emissions in total suspended particles during the period of phasing out of leaded gasoline. *Atmospheric Environment*, 39(7), 1245-1253. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.041>
- Fan, W., Li, Y., Guo, Q., Chen, C., & Wang, Y. (2017). Coal-nitrogen release and NO<sub>x</sub> evolution in the oxidant-staged combustion of coal. *Energy*, 125, 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.130>
- Fioletov, V. E., McLinden, C., Krotkov, N., & Li, C. (2015). Lifetimes and emissions of SO<sub>2</sub> from point sources estimated from OMI. *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1969-1976. <https://doi.org/10.1002/2015GL063148>
- Fujii, H., & Managi, S. (2016). Economic development and multiple air pollutant emissions from the industrial sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2802-2812. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5523-2>
- Garrido-Zafra, J., Moreno-Munoz, A., Gil-de-Castro, A., Bellido-Outeirino, F., Medina-Gracia, R., & Ballesteros, E. G. (2019). Load Scheduling Approach for Energy Management and Power Quality enhancement in Glass Melting Furnaces. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEE-IC/I&CPS Europe)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783727>
- Ge, C., Wang, J., Carn, S., Yang, K., Ginoux, P., & Krotkov, N. (2016). Satellite-based global volcanic SO<sub>2</sub> emissions and sulfate direct radiative forcing during 2005–2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(7), 3446-3464. <https://doi.org/10.1002/2015JD023134>
- Herrera, J., Briceño, J., Rojas, J. F., Solórzano, D. & Beita, V. H. (2016). Informe de calidad del aire del área metropolitana de Costa Rica: Años 2013-2015, p. 75. [https://www.ministeriodesalud.go.cr/images/stories/docs/DPAH/2016/DPAH\\_VI\\_informe\\_anual\\_calidad\\_aire\\_GAM\\_2013\\_2014.pdf](https://www.ministeriodesalud.go.cr/images/stories/docs/DPAH/2016/DPAH_VI_informe_anual_calidad_aire_GAM_2013_2014.pdf)
- Herrera, J., Rojas, J. F., Mugica, V., Solórzano, D., & Beita, V. H. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons in filterable PM 2,5 emissions generated from regulated stationary sources in the metropolitan area of Costa Rica. *Atmospheric Pollution Research*, 8, 843-849. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.01.007>
- Hu, Y., Li, Z., Wang, Y., Wang, L., Zhu, H., Chen, L., ... & Liu, A. (2019). Emission factors of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM and VOCs in pharmaceuticals, brick and food industries in Shanxi, China. *Aerosol Air Qual. Res*, 19, 1785-1797. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.06.0304>
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2016). *Clasificación de actividades económicas en Costa Rica*. San José, Costa Rica. <https://www.inec.cr/documento/inec-2011-clasificacion-de-actividades-economicas-de-costa-rica-manual-de-rama-de>
- Joos, H., Madonna, E., Witlox, K., Ferrachat, S., Wernli, H., & Lohmann, U. (2017). Effect of anthropogenic aerosol emissions on precipitation in warm conveyor belts in the western North Pacific in winter—a model study with ECHAM6-HAM. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(10), 6243-6255. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6243-2017>
- Khude, P. (2017). A review on energy management in textile industry. *Innov Ener Res*, 6(169), 2. <https://doi.org/10.4172/2576-1463.1000169>
- Maré, M., Bielawska, M., Simeonov, V., Namieśnik, J., & Zabiegała, B. (2016). The effect of anthropogenic activity on BTEX, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and CO concentrations in urban air of the spa city of Sopot and medium-industrialized city of Tczew located in North Poland. *Environmental research*, 147, 513-524. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.03.014>
- McGranahan, G. (2012). *Air pollution and health in rapidly developing countries*. Londres, Inglaterra: Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849770460>
- Recope. (2019). *Ficha de datos de seguridad (FDS) del búnker*. San José, Costa Rica. Recuperado de: [https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2017/12/FDS-Bunker-V.Final\\_.pdf](https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2017/12/FDS-Bunker-V.Final_.pdf)
- Souri, A. H., Choi, Y., Jeon, W., Li, X., Pan, S., Diao, L., & Westenbarger, D. A. (2016). Constraining NO<sub>x</sub> emissions using satellite NO<sub>2</sub> measurements during 2013 DISCOVER-AQ Texas campaign. *Atmospheric environment*, 131, 371-381. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.020>



- Testo. (2019). *Testo 350. Analizador portátil para emisiones industriales*. <https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combustion-testo-350/p/0632-3510>
- Wang, Y., Lai, N., Mao, G., Zuo, J., Crittenden, J., Jin, Y., & Moreno-Cruz, J. (2017). Air pollutant emissions from economic sectors in China: A linkage analysis. *Ecological Indicators*, 77, 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.016>
- Xie, Y., Dai, H., & Dong, H. (2017). Impacts of SO<sub>2</sub> taxations and renewable energy development on CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions in Jing-Jin-Ji region. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1386-1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.057>
- Yang, M., Ma, T., & Sun, C. (2018). Evaluating the impact of urban traffic investment on SO<sub>2</sub> emissions in China cities. *Energy Policy*, 113, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.039>
- Yang, X., Wang, S., Zhang, W., Zhan, D., & Li, J. (2017). The impact of anthropogenic emissions and meteorological conditions on the spatial variation of ambient SO<sub>2</sub> concentrations: a panel study of 113 Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 584, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.145>
- Ying, G., Ma, J., & Xing, Y. (2007). Comparison of air quality management strategies of PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> by an industrial source complex model in Beijing. *Environmental Progress*, 26(1), 33-42. <https://doi.org/10.1002/ep.10182>
- Zamtsu. (2019). Contador portátil de partículas APEX: APEX P3/P5. <https://www.zamtsu.com/producto/contador-portatil-de-particulas-apex-p3-p5/>
- Zhang, L., Jacob, D. J., Knipping, E. M., Kumar, N., Munger, J. W., Carouge, C. C., van Donkelaar, A., Wang, Y. X., & Chen, D. (2012). Nitrogen deposition to the United States: Distribution, sources, and processes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(10), 4539-4554. <https://doi.org/10.5194/acp-12-4539-2012>
- Zhao, B., Wang, S., Wang, J., Fu, J. S., Liu, T., Xu, J., ... & Hao, J. (2013). Impact of national NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> control policies on particulate matter pollution in China. *Atmospheric Environment*, 77, 453-463. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.012>



Inventario preliminar de emisiones atmosféricas (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PTS) de diferentes sectores industriales en Costa Rica (Daniel Alfaro-Alfaro • Luis Salas-Morelli • Bryan Sánchez-Mejías • José Mora-Barrantes • José Pablo Sibaja-Brenes • Henry Borbón-Alpizar) *Uniciencia* is protected by [Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-NC-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/)