



ANÁLISIS DE LA ACIDIFICACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN CUBA EN EL PERÍODO 2012-2020

ANALYSIS OF RAINFALL ACIDIFICATION IN CUBA IN THE PERIOD 2012-2020

✉ KEVIN GARCÍA SANTISTEBAN^{1*}, ✉ ROSEMARY LÓPEZ LEE²

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba

²Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

*Correo para correspondencia: dkgbendito@gmail.com

Palabras claves:	Resumen
lluvias ácidas contaminación atmosférica pH reducción de contaminantes políticas de gestión	Este trabajo se propone como objetivo discutir las causas y los efectos principales de las lluvias ácidas, su relación con las condiciones meteorológicas de cada región y analizar el estado actual de la acidificación de las precipitaciones en Cuba en el período 2012-2020. En el desarrollo de la investigación se utilizaron datos anuales de cada estación del país, obtenidos en el departamento del Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, integrados en gráficos que detallan el comportamiento de la acidificación de las lluvias. El estudio demostró que las localidades de Falla, La Palma, Santiago de Las Vegas y Casablanca son las zonas más afectadas del país.
Key words:	Abstract
acid rain air pollution pH reduction of pollutants management policies	The objective of this work is to discuss the main causes and effects of acid rains, their relationship with the meteorological conditions of each region and to analyze the current state of precipitation acidification in Cuba in the period 2012-2020. In the development of the research, annual data from each station in the country obtained in the department of the Center for Pollution and Chemistry of the Atmosphere were used, integrated into graphs that detail the behavior of the acidification of the rains. The study showed that the towns of Falla, La Palma, Santiago de Las Vegas and Casablanca are the most affected areas of the country.

Introducción

Las lluvias ácidas representan una problemática de preocupación global por su gran influencia en los ecosistemas terrestres y marinos, en la salud y el patrimonio cultural. Esta situación ha llevado a los países a aplicar estrategias de gestión ambiental para la reducción de emisiones y el mejor aprovechamiento de las energías renovables. El primero en descubrirlas fue el químico escocés Robert Angus Smith (conocido como el “padre de la lluvia ácida”) en 1852 mientras examinaba la química del agua de lluvia cerca de las ciudades industriales de Inglaterra y Escocia. Smith demostró que estas fábricas hacían emisiones directas al aire de hollín y sustancias que cambian la química de la lluvia haciéndola más ácida. Más tarde, en 1872, le acuñaría el término “lluvia ácida” en su libro titulado *Air and Rain: The Beginnings of a*

Chemical Climatology. Este trabajo se propone como objetivo discutir las causas y los efectos principales de las lluvias ácidas, su relación con las condiciones meteorológicas de cada región y analizar el estado actual de la acidificación de las precipitaciones en Cuba en el período 2012-2020.

Desde 1961 la lluvia ácida ha recibido gran atención mundial. Esto se evidencia en la puesta en marcha de programas y memorandos para tratar la temática en cuestión, tales como el “Programa cooperativo para la vigilancia y evaluación de la transmisión a larga distancia de contaminantes en Europa” (EMEP) y el “Memorando de intención entre el Gobierno de Canadá y el de los Estados Unidos de América, en relación con la contaminación transfronteriza”. También, como parte de los distintos esfuerzos se celebró, en 1982 en Estocolmo, una conferencia especial sobre acidificación del medio ambiente.

Recibido: 26 de noviembre de 2022

Aceptado: 10 de abril de 2023

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



La lluvia ácida puede presentarse en forma de lluvia, niebla, granizo o nieve (fig. 1), siendo su valor de pH inferior a 5,6. Aunque la acidez natural de la lluvia depende de la región y la época en la que se mide, en promedio se estima que tiene un valor de pH cercano a 5.6. Si un valor de pH = 7 es indicativo de una disolución neutra, entonces el agua de lluvia es naturalmente ácida. Esto se debe a que la lluvia, al atravesar la capa de dióxido de carbono (CO_2) que envuelve al planeta, forma ácido carbónico (H_2CO_3), un ácido débil que le confiere este valor de pH (Talanquer et al. 2022, pág. 3).

La lluvia ácida es principalmente el resultado de las actividades humanas. La quema de combustibles fósiles emite las sustancias precursoras de la lluvia ácida: dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera:

La presencia de estas sustancias ácidas en la atmósfera, es el resultado de emisiones de gases resultado de la combustión de materiales usados para las actividades agrícolas, la generación de energía, producción y transformación de subproductos y bienes intermedios y finales, el funcionamiento del transporte, la calefacción y la cocción de alimentos entre otros usos. Otras emisiones provienen de procesos químicos o manufactureros que usan o producen derivados de estas sustancias ácidas. Los combustibles usados son el carbón, el petróleo y sus derivados, la biomasa y el gas natural. La mayoría de estas sustancias contienen azufre asociado a compuestos orgánicos que las constituyen. En el caso del nitrógeno, si bien se encuentra como constituyente de algunos compuestos orgánicos, la principal fuente de emisiones corresponde al transporte que usa motores combustión interna, donde el nitrógeno (N_2) se oxida para formar dióxido de nitrógeno, NO_2 , dado que el N_2 se vuelve reactivo a altas temperaturas dentro de los motores (Pedraza, 2019).

Otros compuestos acidificantes son: los ácidos orgánicos, como el ácido fórmico y el ácido acético, cuyas emisiones provienen de la vegetación y el Dimetilsulfuro (DMS) y Sulfóxido de dimetilo (DMSO), provienen de los océanos.

Estas sustancias contaminantes se oxidan en la atmósfera dando lugar a la formación de trióxido de azufre (SO_3) y dióxido de nitrógeno (NO_2). La interacción de estas especies con el vapor de agua atmosférico da como resultado ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3). Estas sustancias pueden transportarse a grandes distancias en la atmósfera por la acción del viento para depositarse en ecosistemas a miles de kilómetros del lugar desde donde fueron emitidas; de ahí, su carácter transfronterizo.

Estas precipitaciones son consideradas como un fenómeno puesto que la difusión y transporte de los contaminantes, además de ser determinados por la dirección y velocidad del viento, están influenciados también por la topografía, la altitud, la latitud, factores meteorológicos



Nota. Lluvia ácida en forma líquida, de niebla y de nieve. Tomado de (bloglluviaacida.blogspot, 2012)

Note. Acid rain in the form of liquid, fog and snow. Taken from (bloglluviaacida.blogspot, 2012)

Fig. 1. Deposición húmeda

Figure 1. Wet Deposition

como la altura de capa de mezcla, la de inversión térmica, entre otros. El aumento de la temperatura incrementa las reacciones en las fases gaseosa y acuosa y, por consiguiente, más contaminantes en estado gaseoso pasan a iones, con lo cual se potencian las concentraciones en las precipitaciones (Buda y De Walle, 2002 citado en López et al. 2014, págs. 102-103). La humedad beneficia la sedimentación de humos y polvo, mientras que la rapidez del viento resulta un indicador eficiente relativo a las condiciones generales de dispersión de los gases y partículas emitidos por fuentes de origen natural o antrópico (Tang et al. 2005 citado en López et al. 2014, pág. 103).

Una de las consecuencias directas de la acidificación de las precipitaciones es la pérdida de biodiversidad y productividad de los océanos, lagos, ríos, arroyos y pantanos. La lluvia ácida eleva el nivel ácido en los acuíferos, lo que posibilita la absorción de aluminio que se transfiere, a su vez, desde las tierras de labranza a los lagos y ríos.

Esta combinación incrementa la toxicidad de las aguas para los cangrejos de río, mejillones, peces, anfibios y plantas acuáticas (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010). Sin embargo, en un ecosistema interconectado, lo que afecta a algunas especies con el tiempo acaba afectando a muchas más a través de la cadena alimentaria, incluso a especies no acuáticas como los pájaros (el tiempo.es). La lluvia ácida también contamina selvas y bosques, especialmente los situados a mayor altitud. Esta precipitación nociva roba los nutrientes esenciales del suelo a la vez que libera aluminio, lo que dificulta la absorción del agua por parte de los árboles y daña las raíces. Los ácidos también dañan las agujas de las coníferas y las hojas de los árboles, produciendo lesiones cloróticas y necróticas (Fig. 2).

Con respecto al patrimonio histórico, artístico y cultural también representan un problema, pues corroe los elementos metálicos de edificios e infraestructuras y deteriora el aspecto externo de los monumentos construidos de mármol y piedra caliza, los cuales deben ser reparados continuamente.

La lluvia ácida no afecta directamente la salud, pero sus precursores sí. "Determinadas concentraciones de los óxidos

de azufre y de nitrógeno en la atmósfera pueden penetrar a los sistemas respiratorio y cardiovascular, dando como resultado enfermedades o incluso la muerte", afirma la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Los metales como el mercurio y cadmio de depósitos del suelo de lagos, corrientes y reservas pueden afectar la potabilidad del agua y acumularse en los tejidos vegetales y animales, haciéndolos tóxicos para el consumo humano. Los metales también pueden separarse del suelo hacia las reservas de agua o de viejas tuberías de plomo y cobre, llegando directamente hacia el agua corriente de los hogares y causando serias enfermedades (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010). El mercurio (Hg) en el organismo puede afectar el cerebro y el sistema nervioso en los niños y el Al se asocia a problemas de riñón y a la enfermedad de Alzheimer.

Esto conlleva a una gran preocupación por parte de todos los países que, entre sus diferentes proyectos, implementan estrategias de gestión ambiental. Una de las importantes es la reducción de las emisiones de los contaminantes. Esto significa disminuir el consumo de combustibles fósiles. Muchos gobiernos han intentado frenar las emisiones mediante la limpieza de chimeneas industriales y la promoción de combustibles alternativos (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010). En los Estados Unidos, la Ley de Aire Limpio de 1990 tiene como objetivo la lluvia ácida y pone un límite a la emisión de dióxido de azufre. El hombre puede prevenir también la lluvia ácida mediante el ahorro de energía. Mientras menos electricidad se consuma en los hogares, menos químicos emitirán las centrales (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010).

Apostar por energías renovables es una de las maneras de combatir y evitar la lluvia ácida. Las dos fuentes de energía alternativas más prometedoras que tienen un enorme potencial son la energía hidráulica y la nuclear. Es necesario crear conciencia sobre el uso eficiente de la energía y el ahorro de energía mediante el uso de electrodomésticos de bajo consumo y prácticas de ahorro de energía, como apagar las luces cuando uno sale de la habitación, además de alentar a la población de usar bicicletas para viajar localmente. Otros elementos necesarios son los pronósticos meteorológicos, el monitoreo y la modelación de la calidad del aire.

Los países en desarrollo plantean un problema importante cuando se trata de controlar la contaminación y la lluvia ácida. La enorme población y el alto nivel de pobreza de estos países conducen a la sobreexplotación de los recursos naturales y elevan el nivel de contaminación con el uso indiscriminado de los recursos y el incumplimiento de las normas. Ciudades como Nueva Delhi, India, son una de las cinco ciudades más contaminadas con niveles asombrosamente altos de dióxido de azufre y ácido nítrico en el aire.



Nota. Tomado de ([bloglluviaacida.blogspot, 2012](http://bloglluviaacida.blogspot.com))

Note. Taken from ([bloglluviaacida.blogspot, 2012](http://bloglluviaacida.blogspot.com))

Figura 2. Consecuencias de la lluvia ácida en las hojas

Figure 2. Consequences of acid rains on leaves.

En Cuba, la contaminación del aire tiene sus causas en las deficiencias de la planificación de los asentamientos humanos e industrias, la utilización de tecnologías obsoletas en las actividades productivas y el transporte automotor. Además, en décadas pasadas, siguiendo una tendencia mundial, se utilizó la construcción de chimeneas altas en termoeléctricas e industrias, con el objetivo de dispersar las emisiones y resolver los problemas locales alejando la contaminación de las áreas urbanas. Pero no se eliminó la contaminación, sino que se redistribuyó por todo el país; tampoco se erradicaron los problemas locales por la ubicación incorrecta de las fuentes con respecto al medio urbano (López, 2006 citado en López et al. 2014, pág. 104).

Se han realizado diferentes estudios acerca de este tema, se ha observado crecimiento en la acidificación a escala regional, principalmente en el tramo costero Mariel-Varadero, Cienfuegos-Santa Clara, Nuevitas, zona minero metalúrgica del norte de Holguín. Desde 1976, el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera (CECONT) del Instituto de Meteorología, ha puesto en funcionamiento un programa centrado en el análisis químico de las precipitaciones, los aerosoles y algunos gases contaminantes (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno). A partir de 1994 se ha mantenido funcionando en una variante reducida (López, 2006 citado en López et al. 2014, pág. 104).

País ha optado por utilizar energías renovables, tales como la eólica y la solar en lugares donde las necesidades de la localidad lo requieran y puedan ser efectivamente explotadas. Es necesario seguir estudiando e investigando en Cuba la problemática en cuestión debido al incremento en el uso de combustible crudo nativo con un contenido de azufre alto (4 % a 7 %).

Materiales y métodos

Para el desarrollo de la investigación y el análisis de la acidificación de las precipitaciones se tomó como región de estudio todas las provincias del país utilizando los datos registrados por las estaciones meteorológicas tabuladas en la [Tabla 1](#); detalladamente graficados en Microsoft Office Excel. Se exponen los resultados obtenidos a lo largo del período 2012-2020 a través de un gráfico de frecuencias de

lluvias ácidas y no ácidas que reflejan las localidades más afectadas, así como gráficos que modelan el comportamiento promedio del pH en estos años. Para el análisis se tomaron los valores promedio de cada estación por año y se registraron en un gráfico de barras en Excel para precisar la tendencia en el comportamiento de las lluvias en cada región y así determinar cómo se comportó a lo largo del período 2012-2020. De igual forma se procedió a graficar la frecuencia de lluvias ácidas y no ácidas recopilando los datos del pH, cuantas eran ácidas por presentar un pH menor que 5.6 y las que no que presentaban un pH mayor o igual. Estos valores se analizaron con respecto al total de muestras hallando el porcentaje de lluvias ácidas y no ácidas lo que permitió conocer el estado actual del país.

Tabla 1. Provincias y sus estaciones utilizadas para la investigación.

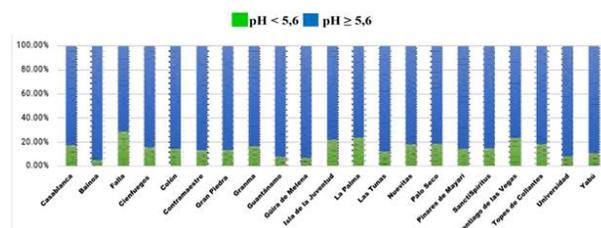
Tabla 1. Provinces and their respective stations used for the investigation

Estación	Provincia
Casablanca	La Habana
Bainoa	Mayabeque
Falla	Ciego de Ávila
Cienfuegos	Cienfuegos
Colón	Matanzas
Contra maestre	Santiago de Cuba
Gran Piedra	Santiago de Cuba
Granma	Granma
Guantánamo	Guantánamo
Güira de Melena	Artemisa
Isla de la Juventud	Isla de la Juventud
La Palma	Pinar del Río
Las Tunas	Las Tunas
Nuevitas	Camagüey
Palo Seco	Camagüey
Pinares de Mayarí	Holguín
Sancti Spiritus	Sancti Spiritus
Santiago de Las Vegas	La Habana
Topes de Collantes	Sancti Spiritus
Universidad	Santiago de Cuba
Yabú	Villa Clara

Resultados y Discusión

En la **figura 3** puede observarse que entre 2012-2020 se evidenció una disminución en la frecuencia de lluvias ácidas con respecto al período 1990-2011 (**figura 4**). Este descenso en la frecuencia se ve evidenciado en las localidades de Casablanca, Palo Seco, Pinares de Mayarí y Gran Piedra que entre 1990 y 2011 eran las más afectadas, estando por encima del 40%; mientras que en el período en cuestión no

superan el 20%. Además, se analizaron las muestras de otras estaciones como: Bainoa, Granma, Güira de Melena, Isla de la Juventud, Las Tunas, Sancti Spiritus, Topes de Collantes, Universidad, Yabú y Falla, siendo esta última una de las más afectadas. Otro dato significativo es el incremento de la frecuencia en la localidad Nuevitas.

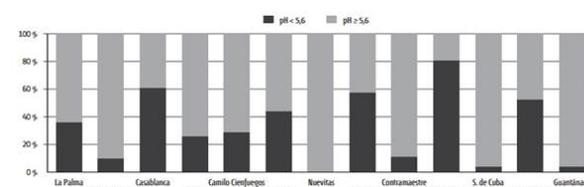


Fuente: Elaboración propia

Source: Own elaboration

Fig. 3. Frecuencia de lluvias clasificadas como ácidas (pH < 5,6) y no ácidas (pH ≥ 5,6) a escala regional en Cuba (período 2012-2020)

Figure 3. Frequency of rains classified as acid (pH < 5,6) and non-acid (pH ≥ 5,6) on a regional scale in Cuba (period 2012-2020).

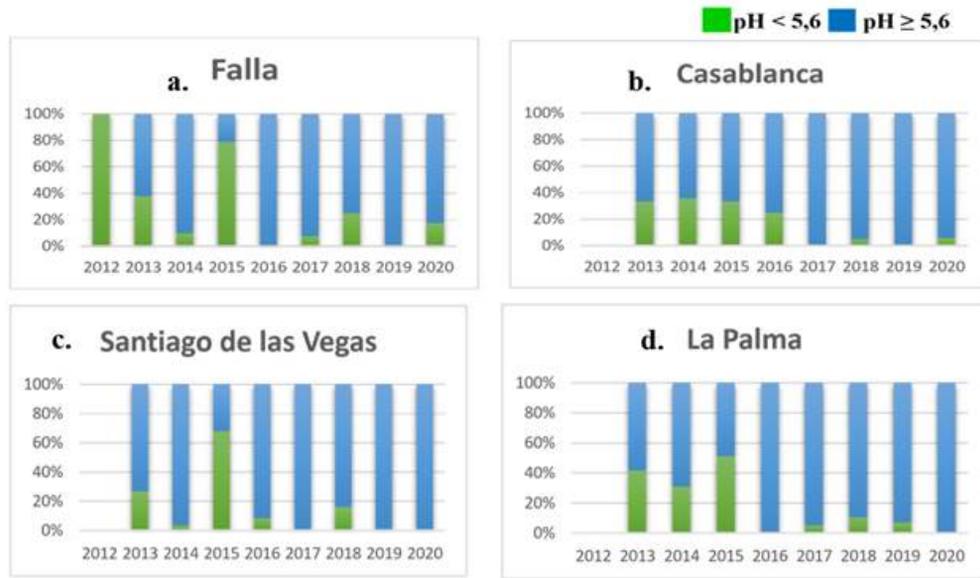


Fuente/Source: (López Lee, Collazo Aranda, & Hernández Saavedra, 2014)

Fig. 4. Frecuencia de lluvias clasificadas como ácidas (pH < 5,6) y no ácidas (pH ≥ 5,6) a escala regional en Cuba (período 1990-2011)

Figure 4. Frequency of rains classified as acid (pH < 5,6) and non-acid (pH ≥ 5,6) on a regional scale in Cuba (period 1990-2011)

Mediante el análisis de los datos obtenidos se comprobó que las localidades más afectadas fueron: Falla (**Fig. 5 a**), Casablanca (**Fig. 5 b**), Santiago de las Vegas (**Fig. 5 c**) y La Palma (**Fig. 5 d**). La mayoría de las estaciones muestran una tendencia al descenso de la acidificación de las lluvias hasta llegar al año 2020, año que fue marcado por el inicio de la pandemia COVID-19 que trajo consigo la reducción de las producciones debido al distanciamiento social condicionada por la poca presencialidad obligatoria en las empresas en industrias del país. La contaminación en estas localidades de Cuba en este período se ve condicionada por el incremento de precursores de ácidos debido a combustible con un contenido de azufre alto en las termoeléctricas y fábricas de cemento. En Casablanca, por ejemplo, que se encuentra ubicada en las inmediaciones de la bahía de la ciudad de La Habana recibe la influencia de las emisiones



Fuente: Elaboración propia
Source: Own elaboration

Fig. 5. a.Falla b.Casablanca c.Santiago de las Vegas d.La Palma. Frecuencia anual de lluvias de algunas estaciones clasificadas como ácidas ($\text{pH} < 5,6$) y no ácidas ($\text{pH} \geq 5,6$) a escala regional en Cuba (período 2012-2020)

Figure 5. a.Falla b.Casablanca c.Santiago de las Vegas d.La Palma. Annual rainfall frequency of some stations classified as acid ($\text{pH} < 5,6$) and non-acid ($\text{pH} \geq 5,6$) on a regional scale in Cuba (period 2012-2020).

por la quema de combustible fósil de la refinería Níco López y la termoelectrica de Talla Piedra. Así ocurre también con las otras estaciones donde la contaminación podría estar dada por emisiones antropogénicas.

El comportamiento promedio del pH demuestra una reducida acidificación debido a que los valores se encuentran en su mayoría por encima de 5.6, observándose los más bajos en el año 2015, sobre todo en las localidades de Falla, próximo el valor de esta a 5 (Fig. 6 b) y Santiago de las Vegas (Fig. 6 j).

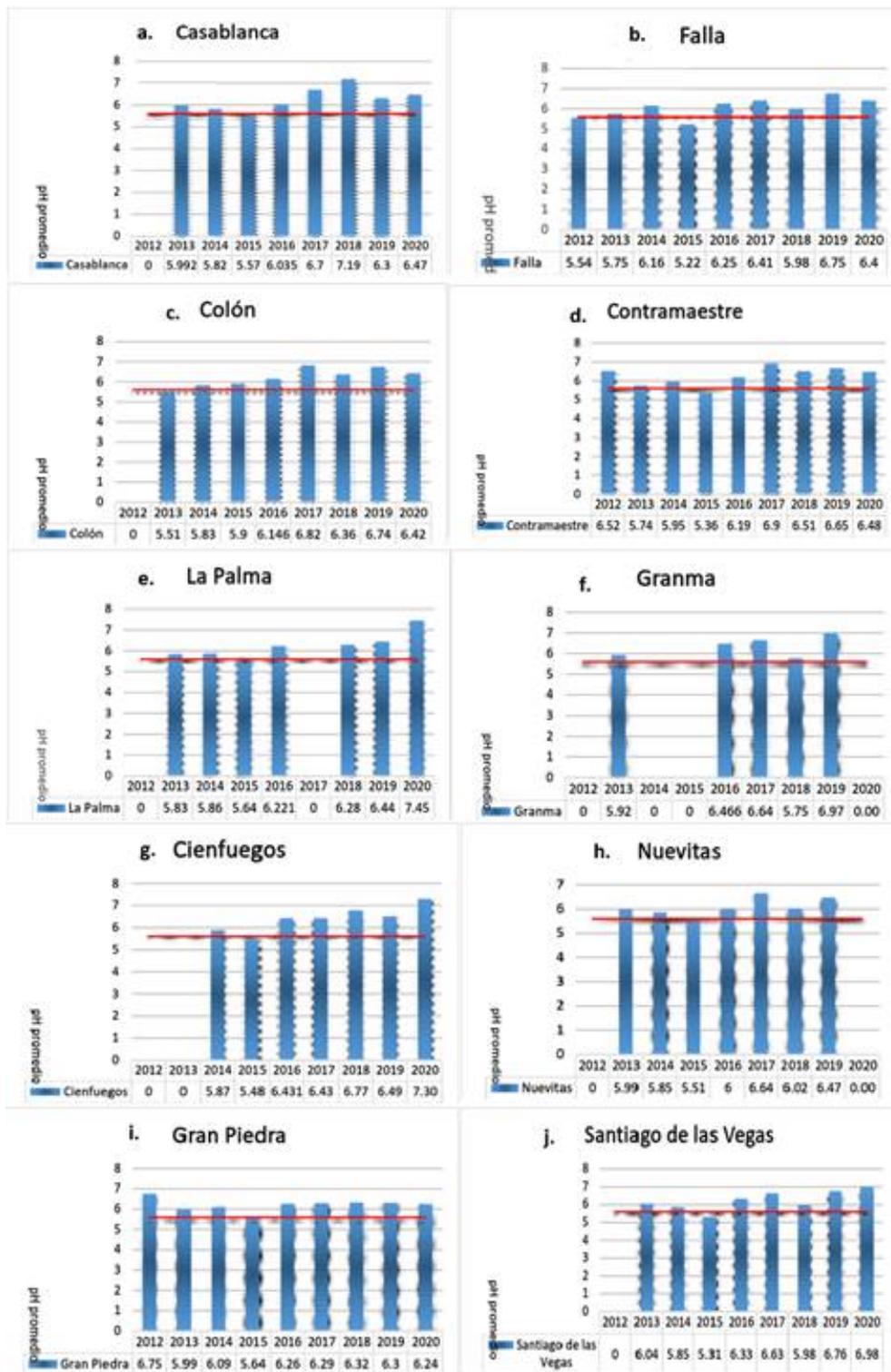
Conclusiones

La investigación detalló que en el país hubo una reducción de la acidificación de las precipitaciones en el período 2012-2020 con respecto al período 1990-2011, aunque la emisión de contaminantes persiste, afectando localidades como Casablanca, Falla, Santiago de las Vegas y La Palma. Preciso que para el estudio y caracterización de estas lluvias es preciso el estudio del pH y el monitoreo constante de las variables meteorológicas, contribuyentes a la propagación de los contaminantes y de las emisiones provocadas por la actividad humana que forman las lluvias ácidas, dañando los ecosistemas terrestres, marinos y las infraestructuras. Esto ha llevado a los gobiernos a aplicar políticas de gestión ambiental para la reducción de

emisiones de las sustancias contaminantes. Cuba no está ajena a estas políticas por lo que se ha trabajado por implementar técnicas de abatimiento de las emisiones de SO_2 , además de la utilización de las energías renovables.

Recomendaciones

1. Realizar estudios más detallados analizando las principales fuentes de emisiones en los lugares más afectados.
2. Enfatizar en la reducción de combustibles fósiles con alto contenido de azufre y trabajar más en el empleo de las energías renovables.
3. Desarrollar investigaciones en conjunto con el Ministerio de Salud Pública de Cuba y el Ministerio de la Agricultura para precisar los efectos de las lluvias ácidas en la nación.
4. Realizar un monitoreo constante de la composición química de la lluvia y de las variables meteorológicas para prever las posibles afectaciones.
5. Aplicar en Cuba técnicas de abatimiento de las emisiones de SO_2 que constituye la medida principal con vistas a disminuir las emisiones de los precursores ácidos.



(Promedio / Average pH = 5.6:)

Fig. 6. a.Casablanca b.Falla c.Colón d.Contramaestre e.La Palma f.Granma g.Cienfuegos h.Nuevitas i.Gran Piedra j.Santiago de las Vegas . Comportamiento promedio del pH en el período 2012-2020 de algunas estaciones

Figure 6. a.Casablanca b.Falla c.Colón d.Contramaestre e.La Palma f.Granma g.Cienfuegos h.Nuevitas i.Gran Piedra j.Santiago de las Vegas. Average behavior of the pH in the period 2012-2020 of some stations.

Bibliografía

- Consequences of acid rain on leaves [fotografía]* (12 de octubre de 2012). bloglluviaacida.blogspot. <http://bloglluviaacida.blogspot.com/2012/10/que-es-la-lluvia-acida-i-cuales-son-sus.html?m=1>
- Wet Deposition [fotografía]* (12 de octubre de 2012). bloglluviaacida.blogspot. <http://bloglluviaacida.blogspot.com/2012/10/que-es-la-lluvia-acida-i-cuales-son-sus.html?m=1>
- Lluvia ácida* (s.f.). Recuperado de eltiempo.es. <https://noticias/meteopedia/lluvia-acida>
- Lee, R. L. (2014). Ácidos orgánicos durante el período noviembre 2008-abril 2010 en las lluvias de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 20(1), 69-72.
- National Geographic. (9 de septiembre de 2010). *¿Qué es la lluvia ácida y por qué se produce?* <https://medioambiente/lluvia-acida>
- Pedraza, L. R. (2019). *Algunos elementos básicos sobre la lluvia ácida*.
- Talanquer, V., Irazoque, G., & López, A. (2022). *A ciencia cierta... Lluvia ácida*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

Contribución de autoría: **Concepción de la idea:** Kevin García Santiesteban. **Manejo de los datos:** Kevin García Santiesteban, Rosemary López Lee. **Análisis de los datos:** Kevin García Santiesteban. **Investigación:** Kevin García Santiesteban, Rosemary López Lee. **Metodología:** Kevin García Santiesteban, Rosemary López Lee. **Redacción- primera redacción:** Kevin García Santiesteban. **Supervisión:** Rosemary López Lee. **Validación de los resultados:** Kevin García Santiesteban, Rosemary López Lee. **Redacción- revisión y edición:** Kevin García Santiesteban, Rosemary López Lee.