



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“NIVEL DE ACIDEZ DE LA LLUVIA EN LA ZONA CONURBADA VERACRUZ-BOCA DEL RÍO.”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA
AMBIENTAL

PRESENTA

ING. DÁMARIS RASGADO GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. MARIA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHAVEZ

ASESORES

M.C. ROSA ELENA ZAMUDIO ALEMAN

DR. IRVING DAVID PEREZ LANDA

MAYO 2022

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO



Boca del Río, Ver **9/JUNIO/2022**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

DÁMARIS RASGADO GÓMEZ
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la **TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO**, desarrollada por usted cuyo título es:

**“NIVEL DE ACIDEZ DE LA LLUVIA EN LA ZONA CONURBADA VERACRUZ-
BOCA DEL RÍO”**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica@
Por nuestros mares responderemos

DR. JUAN DAVID GARAY MARIN
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB
c.c.p. Expediente



ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro A-01106-220620

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 10 del mes de junio de 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

“NIVEL DE ACIDEZ DE LA LLUVIA EN LA ZONA CONURBADA VERACRUZ-BOCA DEL RÍO”

Que presenta el (la) alumno(a):

DÁMARIS RASCADO GÓMEZ
Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:



DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA
Director



**DRA. MARIA DEL REFUGIO CASTAÑEDA
CHAVEZ**
Co-Director



M.C. ROSA ELENA ZAMUDIO ALEMAN
Asesor



M.C. IRVING DAVID PÉREZ LANDA
Asesor





“2020, Año del Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Boca del Río, Veracruz, 01/junio/2022

Asunto: **CESION DE DERECHOS Y NO PLAGIO**

**H. CONSEJO DE POSGRADO
PROGRAMA DE POSGRADO MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
PRESENTE**

En la Ciudad de Veracruz, Veracruz a los **01** días del mes **junio** del año **2022**. La que suscribe **Dámaris Rasgado Gómez** por mi propio derecho y en calidad de autor de la tesis titulada: “ **Nivel de acidez de la lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río**” (en lo sucesivo la “TESIS”) manifiesto que cedo a título gratuito la totalidad de los derechos patrimoniales de autor que sobre ella me corresponden, a favor del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo el “TecNM”). Lo anterior en términos de los antecedentes y consideraciones siguientes:

- I. Que la presente cesión de derechos de la “TESIS” se transfiere en virtud de lo estipulado en los establecido en los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, sin reservarme acción legal de ningún tipo.
- II. Manifiesto bajo protesta de decir verdad, que la “TESIS” es original, inédita y propia, no existiendo impedimento de ninguna naturaleza para la cesión de derechos que se está haciendo, respondiendo además por cualquier acción de reivindicación, plagio u otra clase de reclamación que al respecto pudiera sobrevenir.
- III. Que la titularidad de derechos de autor de la “TESIS” en términos del artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor (reproducción, en todas sus modalidades, transformación o adaptación, comunicación pública, distribución y en general cualquier tipo de explotación que de la “TESIS” se pueda realizar por cualquier medio conocido o por conocer, son propiedad única y exclusiva del “TecNM”, adquiriendo el derecho de reproducción en todas sus modalidades, el derecho de transformación o adaptación, comunicación pública, distribución y en general cualquier tipo de uso que de la “TESIS” se pueda realizar por cualquier medio conocido o por conocer. La cesión de derechos se realiza con carácter permanente e irrevocable.
- IV. El TecNM podrá exhibir la “TESIS” a través de cualquier medio, en cualquier parte del mundo, incluso ser modificada, comprendida, traducida y de cualquier forma explotada en su totalidad o parcialidad.
- V. Que no he otorgado, ni otorgaré por ningún motivo, consentimiento alguno para la utilización de la “TESIS” por cualquier medio y su materialización en productos o servicios de cualquier naturaleza, a favor de ninguna persona física o moral, distinta a el “TecNM”.
- VI. Estoy enterado del contenido y alcance legal de la presente cesión de derechos, firmando al final del presente documento para su certificación.





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2020, Año del Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Señalo como correo electrónico para recibir futuras notificaciones: **m20990012@bdelrio.tecnm.mx**.

Agradeciendo de antemano sus atenciones, le envío un cordial saludo

ATENTAMENTE

Damaris Rasgado Gómez

NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE DE POSGRADO

c.c.p. Archivo



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P.94290
Boca del Río, Veracruz. Tel. (229) 690-5010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx



DEDICATORIA

A mis padres, las personas más importantes en mi vida, mi soporte más fuerte, el apoyo invaluable que me han ofrecido a lo largo de estos 2 años fueron indispensables para poder seguir.

A mi hermana, gracias por desvelarte conmigo y apoyarme cuando los días se tornaron negros.

A mi tía y mi prima, por recordarme que no importa lo difícil que pueda ser, siempre se puede lograr.

A mis abuelos, no hay día que no piense en ustedes, este logro espero lo disfruten allá donde se encuentran.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado económicamente (beca número 005071) por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Tecnológico Nacional de México.

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río por las instalaciones, la facilitación de los laboratorios y el personal que labora en él.

A mi comité por apoyarme en las dudas, ayudarme en las correcciones y en la búsqueda del material para mi investigación.

RESUMEN

El presente trabajo estudia la lluvia ácida y cómo, a través de los años, pasó de ser un problema focalizado en determinadas áreas a convertirse en un efecto nocivo a nivel global. La lluvia ácida está ligada con la alta producción de H_2SO_4 o H_2CO_3 donde al mezclarse con la condensación del cielo, hace que éstas se precipiten con niveles ácidos. Se exponen los resultados obtenidos de los meses mayo – septiembre 2021. El rango de pH promedio fue entre 4.55 y 5.10, se presentaron los niveles de mayor acidez a partir de junio y hasta septiembre; mientras que, en mayo, a pesar de ser una diferencia mínima, presentó el valor promedio más bajo en pH. Los niveles presentados en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río, muestran una tendencia a la acidez en el agua de lluvia al precipitarse, por lo que se concluye que la acidez en los niveles de pH del agua de lluvia está ligada a la actividad industrial y turística en la zona. Es por eso que el objetivo de este trabajo fue determinar el nivel de acidez que presenta el agua de lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río.

Palabras clave: Lluvia ácida; precipitaciones ácidas; niveles de acidez; costas; producción de H_2SO_4 .

ABSTRACT

This paper studies acid rain and how, over the years, it went from being a problem focused on certain areas to becoming a harmful effect on a global level. Acid rain is linked to the high production of H_2SO_4 or H_2CO_3 where, when mixed with condensation from the sky, it causes them to precipitate with acid levels. The results obtained from the May - September 2021 season are presented. The average pH range was between 4.55 and 5.10, presenting the most concentrated acidity from June to September; while in May, despite being a minimal difference, it presented the lowest average value in pH. The levels presented in the Veracruz-Boca del Río metropolitan area show a tendency to acidity in rainwater when it precipitates, so it is concluded that the acidity in the pH levels of rainwater is linked to industrial activity. and tourism in the area. That is why the objective of this work was to identify the acidity level of rainwater in the Veracruz-Boca del Río metropolitan area.

Keywords: Acid rain, acid rain fall, acidity levels, coastal, H_2SO_4 production.

Índice

RESUMEN	2
ABSTRACT	5
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
1. INTRODUCCIÓN	10
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	12
2.1 <i>Conceptos</i>	12
2.1.1 Lluvia ácida	12
2.1.2 Medición de la lluvia ácida	14
2.2 <i>Tipos de lluvias</i>	14
Lluvia normal	14
Lluvia radiactiva	15
Lluvia ácida	15
Formas de deposición ácida	16
Causas de la lluvia ácida	17
Efectos de la lluvia ácida	19
Efectos de la lluvia ácida en los peces y la vida silvestre	20
Efectos de la lluvia ácida en plantas y árboles	21
Acidificación episódica	21
Marco legislativo actual	22
3. MARCO DE REFERENCIA	24
3.1 Antecedentes	24
3.2 Lugar de estudio	26
3.3 Vacío del conocimiento	27
3.4 Frontera del conocimiento	28
4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	29
4.1 Situación problemática	29
4.2 Planteamiento del problema	31
4.3 Justificación	31
4.4 Pregunta de investigación	32
5. HIPÓTESIS	33
6. OBJETIVOS	33
6.1 General	33
6.2 Particulares	33

7. MATERIALES Y MÉTODOS	33
7.1 Fase preliminar:	38
7.2 Fase experimental:	39
7.2.1 Muestreo y obtención de datos	39
7.3 Fase de procesamiento y análisis de la información:	42
8. RESULTADOS Y DISCUSIONES	44
Análisis meteorológico	44
Análisis parámetro pH	44
9. CONCLUSIONES	75
10. RECOMENDACIONES	77
11. LITERATURA CITADA	78

Índice de cuadros

Cuadro 1. Efectos de la lluvia ácida.....	22
Cuadro 2. Clasificación del agua de lluvia de acuerdo con el pH.....	44
Cuadro 3. Valores estadísticos de pH obtenidos mediante Minitab®.....	45
Cuadro 4. Intervalo de correlación.....	47
Cuadro 5. Valores del gráfico de cajas.....	61

Índice de figuras

Figura 1. Escala pH. Fuente: EPA, s.f.	14
Figura 2. Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante.....	23
Figura 3. Mapa de macro localización del estado de Veracruz, México.	26
Figura 4. Mapa de macro localización de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, México ..	27
Figura 5. Planteamiento del problema, plano ambiental.....	30
Figura 6. Gabinete de acero inoxidable.	34
Figura 7. Conexiones internas del dispositivo.....	35
Figura 8. Sistema mecánico de captación.....	35
Figura 9. Placa detectora de lluvia mod SRR01.....	36
Figura 10. Diagrama de bloques de circuito electrónico 54.....	36
Figura 11. Sistema de datos operando.....	37
Figura 12. Mapa de zona conurbada Veracruz – Boca del Río mediante ArcGis.....	39
Figura 13. Sistema mecánico de captación.....	40
Figura 14. Estructura interna del dispositivo.....	40
Figura 15. Estructura externa del dispositivo.....	41
Figura 16. Medidor de prueba de agua multiparamétrico.....	42
Figura 17. Promedio de precipitación en mm.....	42
Figura 18. pH de la lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río en función del tiempo	46
Figura 19. Correlación entre promedio mensual pH Veracruz - Boca del Río y la precipitación en mm	49
Figura 20. Mapa de calor de nivel de acidez promedio total por sitio.....	50
Figura 21. Correlación Precipitación vs pH sitio 1	51
Figura 22. Correlación Precipitación vs pH sitio 2	52
Figura 23. Correlación Precipitación vs pH sitio 3	53
Figura 24. Correlación Precipitación vs pH sitio 4	54
Figura 25. Correlación Precipitación vs pH sitio 5	55
Figura 26. Correlación Precipitación vs pH sitio 6	56
Figura 27. Correlación Precipitación vs pH sitio 7	57
Figura 28. Correlación Precipitación vs pH sitio 8	58
Figura 29. Correlación Precipitación vs pH sitio 9	59
Figura 30. Correlación Precipitación vs pH sitio 10	60
Figura 31. Diagrama de cajas para pH	62
Figura 32. Mediciones promedio mensuales de pH.....	63
Figura 33. pH promedio semanal sitio 1	64
Figura 34. pH promedio semanal sitio 2	65
Figura 35. pH promedio semanal sitio 3	66
Figura 36. pH promedio semanal sitio 4	67
Figura 37. pH promedio semanal sitio 5	68
Figura 38. pH promedio semanal sitio 6	69
Figura 39. pH promedio semanal sitio 7	70
Figura 40. pH promedio semanal sitio 8	71
Figura 41. pH promedio semanal sitio 9	72
Figura 42. pH promedio semanal sitio 10	73

1. INTRODUCCIÓN

La lluvia ácida es un fenómeno fisicoquímico con alteraciones ligadas a la alta producción del consumo de combustibles fósiles y de ciertas prácticas agrícolas. Depende, principalmente, de las combustiones que liberan óxido de azufre y de nitrógeno (Gárces y Hernández, 2004).

A la vez, la lluvia es modificada por alteraciones antropogénicas; por lo que, al precipitarse en la tierra genera daños en la fauna, la flora, la salud humana e incluso en los edificios; esto debido a los niveles de acidez que caen en ellos (Gárces y Hernández, 2004).

Las primeras apariciones de este fenómeno se dieron en Suecia en el año 1848 y en Inglaterra en 1877, no fue hasta principios de los 90's que los países europeos comenzaron a prestar atención del porque el aumento de la acidez en la lluvia, pues la lluvia ácida son aquellas precipitaciones en forma de lluvia cuyas concentraciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) y ácido carbónico (H_2CO_3) son más altas de lo habitual (Granados et al., 2010).

Las causas a las que se le han atribuido el origen de este fenómeno son las emisiones atmosféricas por el uso de combustibles fósiles en las operaciones industriales, transporte, agricultura y calefacción domestica; la utilización de fertilizantes y otros productos químicos en la agricultura, y la combustión de desechos industriales, urbanos y agrícolas (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007) .

Por otra parte, los contaminantes atmosféricos, provienen de dos tipos de fuentes: las fuentes móviles como el tráfico rodado-y las fuentes fijas de combustión como las industrias, las casas y algunos procesos de eliminación de residuos. Éstos contaminantes se pueden calificar como contaminantes primarios y secundarios (Ballester, 2005).

Los contaminantes primarios son aquellos que provienen de la fuente de emisión. La contaminación del aire ocurre por la presencia de sustancias de diversos orígenes y composición que, en ciertas cantidades y períodos de tiempo, pueden resultar nocivas. Las más comunes por sus efectos perjudiciales para la salud y el bienestar de los humanos son las partículas menores a 10 y 2.5 μm (PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente), los óxidos de azufre (SO_x) y nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO) y el ozono troposférico (O_3) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017).

A diferencia de Europa y América del Norte, en Asia las emisiones de contaminantes del aire están aumentando rápidamente resultado del incremento poblacional, y los sistemas asociados de consumo y producción de energía (Balasubramanian et al., 1999; Higashino et al., 1997).

Los problemas de contaminación del aire en Asia se deben, principalmente, a las altas emisiones y la proximidad entre los principales centros industriales y urbanos como lo son: Tokio, Seúl, Hong Kong, Bangkok, Kuala Lumpur, Singapur y Yakarta (Balasubramanian et al., 2003).

La composición química del agua de lluvia varía de sitio a sitio y de región a región, debido a la influencia de fuentes locales. El control de proceso de la composición de la lluvia es complejo y es influenciado por ambas fuentes, naturales y antropogénicas (Kulshrestha et al., 2003)

La característica principal de la lluvia ácida es que es formada exclusivamente por las actividades antropogénicas, por lo que, al no ser un fenómeno natural, no puede ser mitigada con facilidad. Para analizar este fenómeno en la zona conurbada de Veracruz – Boca del Río, ubicamos la zona con mayor tráfico rodado y la zona industrial, ya que es conocido que la mayoría de las empresas o industrias del estado, por lo que los contaminantes que son emitidos por estas, al mezclarse con el aire, se liberan componentes de óxido de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), formadores de la lluvia ácida.

Veracruz y Boca del Río, son las ciudades más importantes de toda la región en el estado de Veracruz por lo que determinar la acidez que hay en sus precipitaciones, es de importancia local. Con ello, podremos tener resultados que nos indiquen la presencia de lluvia ácida en la zona conurbada y poder justificar un monitoreo que aporte la ocurrencia local de este comportamiento.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

La mayor fuente de contaminación atmosférica es el uso de combustibles fósiles como energéticos: petróleo, gas y carbón son usados en grandes cantidades, aproximadamente 36,800,000 de toneladas de CO₂ por día, y los desechos de su combustión se arrojan a la atmósfera en forma de polvo, humo y gases. Los dos primeros se pueden ver y desagradan, pero los gases que no se pueden ver, y son los más peligrosos (Likens & Bormann, 1974).

De la misma manera, la actividad industrial y el tráfico rodado son generadores de grandes cantidades de sustancias químicas, por lo que aún con los mecanismos correctos de remoción de impurezas en el aire, estas emisiones empiezan a convertirse en un problema mayor y peligroso para el planeta y la salud humana. Se propone un modelo a utilizar en este trabajo de investigación que será la instalación de un recolector de muestras en 10 puntos establecidos más adelante con criterios predeterminados para la recolección del agua de lluvia.

El desarrollo del tema de investigación en este punto se basa en el objeto de estudio, que es la lluvia ácida y su interacción con las precipitaciones de lluvia, como interactúa en el medio ambiente y como se forma, de modo que, mediante la observación, la experimentación y la percepción, da un margen más amplio en la manera de conocer el fenómeno, esto gracias a nuestro aspecto gnoseológico.

Por medio de este estudio, se espera lograr un conocimiento geográfico local acerca de los eventos del fenómeno en la zona Veracruz-Boca del Río. Como se ha mencionado antes, se pretende generar un conocimiento de tipo cuantitativo a partir de diversas mediciones y observaciones para poder obtener un análisis con sustento científico de este comportamiento, que avale los aspectos relevantes y los factores que en esta zona ocasionan el fenómeno.

2.1 *Conceptos*

2.1.1 Lluvia ácida

La lluvia ácida, es un fenómeno ligado a la alta producción dependiente, principalmente, del consumo de combustibles fósiles y de ciertas prácticas agrícolas como las quemas, que liberan óxido de azufre y de nitrógeno (Gárces y Hernández, 2004).

Los contaminantes atmosféricos, normalmente medidos en la atmósfera urbana, provienen de fuentes móviles o tráfico rodado y de fuentes fijas, como la combustión (industrias, usos residenciales y procesos de eliminación de residuos.)

Se distingue entre contaminantes primarios y secundarios. Los primeros son los que proceden directamente de la fuente de emisión. Los secundarios se producen como consecuencias de las transformaciones y reacciones químicas y físicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera, distinguiéndose, sobre todo, la contaminación fotoquímica y la acidificación del medio (Ballester, 2005).

La lluvia ácida se forma de los NO_x , junto con los compuestos orgánicos volátiles (COV), desempeñan un papel primordial en la formación de ozono troposférico, al tratarse éste de un contaminante fotoquímico y secundario, requiere de contaminantes primarios para su formación y de la presencia de radiación solar (Galán y Fernández, 2006).

El dióxido de azufre y óxido de nitrógeno, son contaminantes que contribuyen en gran parte a la formación de la lluvia ácida. Estos contaminantes se elevan hasta alcanzar las capas superiores de la atmósfera, donde en ocasiones pasan a formar parte de las nubes como núcleos de condensación de las gotas de lluvia, para luego transformarse en ácido sulfúrico y ácido nítrico, por medio de los procesos de oxidación e hidrólisis (Campbell, 1977; Stern, 1976).

Con referencia a la química atmosférica de los óxidos de nitrógeno, existe una clara diferenciación de ésta, según se trate de química diurna o química nocturna, es decir, por la presencia o no de la luz solar. En ambos casos, la química de los óxidos de nitrógeno va a dar lugar a la formación de compuestos secundarios. La máxima diferencia, entre la química diurna y la química nocturna de los óxidos de nitrógeno radica en la formación de ozono (Galán & Fernández, 2006).

Durante la química diurna, el dióxido de nitrógeno sufre un proceso de reconversión a monóxido de nitrógeno, como resultado de su fotólisis, permitiendo la generación de ozono. Sin embargo, durante la química nocturna, al existir ausencia de luz solar, el dióxido de nitrógeno no sufre un proceso de fotólisis convirtiéndose lentamente en trióxido de nitrógeno, quien a su vez reacciona con dióxido de nitrógeno para generar ácido nítrico (Galán y Fernández, 2006).

2.1.2 Medición de la lluvia ácida

La acidez y la alcalinidad se miden usando una escala de pH para la cual 7.0 es neutral. Cuanto más bajo es el pH de una sustancia (menos de 7), más ácida es; cuanto más alto es el pH de una sustancia (mayor que 7), más alcalina es. La lluvia normal tiene un pH de aproximadamente 5.6; es ligeramente ácido porque el dióxido de carbono (CO_2) se disuelve en él formando ácido carbónico débil. La lluvia ácida suele tener un pH entre 4.2 y 4.4 (EPA, 2020b).

El pH de la lluvia es un parámetro fundamental, pero que por sí solo no es suficiente con la caracterización de la acidez en la lluvia, se requiere determinar la alcalinidad en conjunto con el pH. Esto se debe a que la disolución del CO_2 también disminuye el pH de la lluvia (Verma et al., 2015).

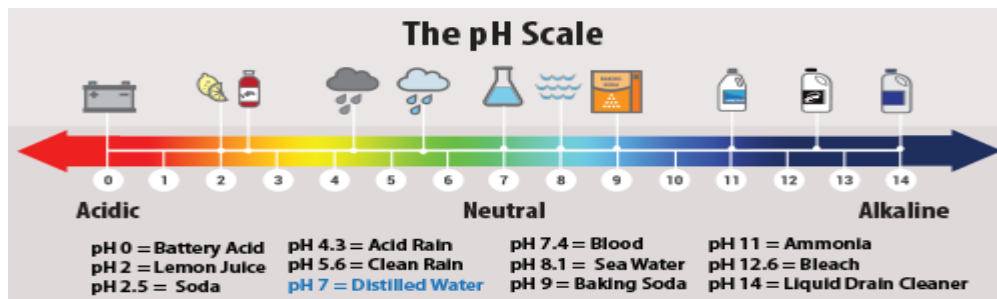


Figura 1. Escala pH. Fuente: EPA, s.f.

2.2 Tipos de llluvias

Lluvia normal

La lluvia se forma cuando las moléculas de vapor de agua se condensan sobre cristales de hielo o de sal en la atmósfera, o sobre minúsculas partículas de polvo en las nubes, para formar gotitas de agua que responden a la gravedad terrestre y caen formando lluvia.

A medida que la lluvia cae atraviesa la atmósfera, y va arrastrando elementos y productos químicos y otros contaminantes (Stumm, Sigg, & Schnoor, 1987). El agua de la atmósfera natural registra un pH de 5.0 a 5.5 por lo que es considerada ácida, ya que contiene ácido carbónico que viene de la disolución del dióxido de carbono (Stumm et al., 1987).

Lluvia radiactiva

La lluvia radiactiva son deposición de partículas, liberadas en la atmósfera por explosiones nucleares o escapes de instalaciones y centrales nucleares, sobre la superficie de la Tierra. Este fenómeno se observó desde el periodo de las pruebas nucleares atmosféricas a gran escala realizadas en la década de 1950 y 1960.

Se realizaron discusiones sobre sus efectos nocivos durante muchos años, pero hasta 1984 cuando un juez federal de Utah dictaminó que 10 personas habían enfermado de cáncer debido a la negligencia del gobierno en lo referente a la exposición de los ciudadanos a la lluvia radiactiva en aquel estado.

En 1985 el Tribunal de apelación de pensiones de Inglaterra y Gales llegó a una conclusión similar en el caso de un veterano de las pruebas nucleares británicas en las islas Christmas durante la década de 1950. Desde la firma del tratado de limitación de pruebas nucleares en 1963, los niveles de lluvia radiactiva han disminuido en todo el mundo (Lee & Weber, 1982).

Lluvia ácida

La lluvia se vuelve ácida debido al descenso del pH, encontrándose de 4.0 a 4.2 esto debido a la combinación con dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos gases pueden alcanzar niveles muy altos en la atmósfera, donde se mezclan y reaccionan con agua, oxígeno y otras sustancias químicas, para dar paso a la formación de la lluvia ácida (Lee & Weber, 1982).

Señalemos que el agua pura neutra tiene una concentración de ion hidrógeno de 10^{-7} moles por litro. Luego, el pH será: Una disolución ácida tiene mayor concentración de ion hidrógeno que el agua pura y por lo tanto, su pH será menor de 7.

Una disolución básica le ocurre a la inversa y su pH será mayor de 7. Las medidas prácticas del pH se encuentran entre los valores 0 a 14.

Formas de deposición ácida

- Deposición húmeda

La deposición húmeda es lo que comúnmente pensamos como lluvia ácida. Los ácidos sulfúrico y nítrico que se forman en la atmósfera caen al suelo mezclados con lluvia, nieve, niebla o granizo (EPA, 2020b).

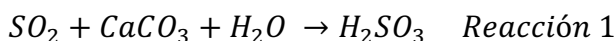
El proceso de generación de las precipitaciones ácidas húmedas, sigue entonces, dos etapas (Instituto de Hidrología, 2016):

1. Etapa fotoquímica: que ocurre en fase gaseosa. El dióxido de azufre (SO_2) y el óxido de nitrógeno (NO), se oxidan a trióxido de azufre (SO_3) y dióxido de nitrógeno (NO_2) respectivamente, gracias a la energía proporcionada por la radiación ultravioleta del sol y por los demás agentes oxidantes de la atmósfera.
2. Etapa catalítica: Tiene lugar en fase líquida y consiste en la transformación del SO_2 original en ácido sulfúrico (H_2SO_4), por disolución acuosa, siendo catalizada principalmente, por la reacción con sales de hierro y de manganeso presentes en las gotas de agua. Parte de este ácido es neutralizado en la atmósfera por el amoníaco, originándose iones amonio (NH_4^+), el resto aparece disuelto en las gotas de lluvia, acidificándola, en forma de iones sulfato SO_4^{2-} y iones de hidrógeno H^+ . Los óxidos de nitrógeno pasan a formar ácido nítrico (HNO_3) que también aparece disociado en forma iónica en las gotas de lluvia.

- Deposición seca

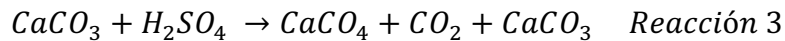
Las partículas y los gases ácidos también pueden depositarse de la atmósfera en ausencia de humedad como deposición seca. Las partículas ácidas y los gases pueden depositarse en superficies (cuerpos de agua, vegetación, edificios) rápidamente o pueden reaccionar durante el transporte atmosférico para formar partículas más grandes que pueden ser dañinas para la salud humana. Cuando los ácidos acumulados son eliminados de una superficie por la siguiente lluvia, esta agua ácida fluye por encima y a través del suelo y puede dañar las plantas y la vida silvestre, como insectos y peces (EPA, 2020b).

Química de la lluvia ácida



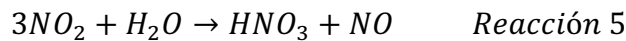
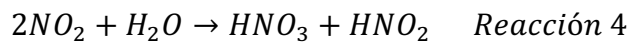
El SO_2 es altamente soluble en agua y relativamente estable en la atmósfera. Actúa como agente oxidante o reductor y reacciona fotoquímicamente o catalíticamente con otros componentes en

la atmósfera. El SO₂ puede producir SO₃, H₂, SO₄ y sales de ácido sulfúrico como se presenta en las reacciones 1 y 2, siendo uno de los mayores precursores de la lluvia ácida.

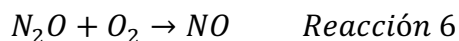


Los carbonates son reemplazados por sulfatos, los cuales son más solubles en agua, el sulfato de calcio o yeso, formado en este proceso es lavado de nuevo dejando una superficie descolorida y “picada”. Esto mostrado en la reacción 3.

Sin embargo, cuando el CO₂ entra en contacto con el agua de mar, reacciona para formar ácido carbónico (CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃) y, cuando el CO₂ antropogénico es absorbido por el agua de mar, el pH disminuye y a este proceso se le conoce como acidificación de los océanos (Caldeira y Wickett, 2003).



Los óxidos de nitrógeno incluyen los compuestos gaseosos: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxido nitroso (N₂O), entre otros. El NO₂ es un buen absorbedor de energía. Por lo tanto, juega un papel importante en la producción de contaminantes secundarios y con el vapor de agua existente en el aire por la humedad forma ácido nítrico, ácido nitroso y óxido nítrico como se indica. Ambos ácidos producen acidez en el agua lluvia. Además, se combinan con el amoníaco (NH₃) de la atmósfera para formar nitrato de amonio (NH₄NO₃). Esto se encuentra señalado en la reacción 4 y 5.



El óxido nítrico (NO) es emitido a la atmósfera en cantidades mayores que el dióxido de nitrógeno (NO₂). Se forma en procesos de combustión a altas temperaturas cuando el oxígeno atmosférico se combina con el nitrógeno (Gárces y Hernández, 2004).

Causas de la lluvia ácida

Las partículas y gases descargados a la atmósfera pueden tener diferente comportamiento (Romero et al., 2006) :

- Desplazamiento en el sentido de la dirección del viento con difusión progresiva lateral y vertical.

- Transformación física y química de los contaminantes primarios dando origen a otros más tóxicos (contaminantes secundarios) por la acción fotoquímica de la fracción ultravioleta de la luz.
- Eliminación de la atmósfera por diversos procesos naturales.

Los contaminantes emitidos a la atmósfera pueden atribuirse principalmente a dos tipos de fuentes, las fuentes naturales y las fuentes artificiales denominadas antrópicas, ya que se derivan de la actividad humana (Vélez et al., 2010).

Cuando se habla de clasificación de los contaminantes se puede especificar en tres formas:

- Clasificación según su naturaleza física, en la cual se distinguen contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos.
- Clasificación según su composición química, encontrando material articulado, compuestos de azufre, de nitrógeno, orgánicos, halogenados, entre otros.
- Clasificación según su formación, en la cual se encuentran los contaminantes primarios que son emitidos directamente a la atmósfera y afectan la calidad del aire sin sufrir ninguna modificación química, y los contaminantes secundarios que son los que han sufrido cambios químicos o son el producto de la reacción entre dos o más contaminantes primarios

La lluvia ácida, es un fenómeno relativamente nuevo, por lo que aún hoy en día es difícil conocer puntualmente cual puede ser la causa de este, a pesar de que se sabe cuáles son los contaminantes primarios que están asociados a ella, las causas pueden ser diversas. Las erupciones volcánicas, los terremotos, los incendios naturales, los relámpagos y algunos procesos microbianos liberan dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno a la atmósfera. No obstante, es la acción humana la causante de la mayor parte de las emisiones de dióxido de azufre como consecuencia de la quema de combustibles en la industria y las centrales energéticas, así como de la mitad de las emisiones de óxidos de nitrógeno debido a los gases producidos por los vehículos a motor. Asimismo, las explotaciones ganaderas intensivas producen amoníaco a partir de la descomposición de la materia orgánica.

Estos tres contaminantes (NO_x , SO_x y CO_2), que pueden ser transportados a grandes distancias desde sus focos de origen, se oxidan en contacto con la atmósfera y dan lugar a la formación de

ácido sulfúrico y ácido nítrico. Dichos ácidos se disuelven en las gotas de agua de las nubes y caen a la superficie terrestre mediante la denominada lluvia ácida, que puede presentarse también en forma de nieve o niebla.

Efectos de la lluvia ácida

La lluvia ácida provoca diversos efectos en la atmósfera, pero los principales y más dañinos, se localizan en el suelo y el agua. De igual manera se habla del daño a la salud tanto humana como animal y el deterioro en las diversas edificaciones, incluyendo aquellas que se formaron de manera natural. Como previamente se expuso en párrafos anteriores, la lluvia ácida es solo uno de los varios fenómenos que se forman gracias a los contaminantes primarios tóxicos.

Los contaminantes tóxicos actúan como agentes ambientales no infecciosos que tienen variados efectos, desde la irritación hasta la muerte de las células y tejidos, incluso, el organismo. Por ello, los agentes contaminantes pueden ser formas de energía como calor y radiaciones, toxinas y vegetales como algunos alcaloides o productos sintéticos (xenobióticos). Existe una clase particular que produce algún tipo de alteración en el material genético o en sus componentes asociados, por lo que se les reconoce como agentes genotóxicos (Zuluaga et al., 2009).

Dos de los principales compuestos formadores de la lluvia ácida, en México son considerados parte de los contaminantes primarios, esto es debido a que están normados en las Normas Oficiales Mexicanas y en ellas, se establecen límites máximos permisibles de concentraciones en el aire, esto con el objetivo principal de proteger la vida humana y preservar la fauna y flora del ambiente.

Dos de los compuestos que forman la lluvia ácida (dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre), forman en México parte de los contaminantes primarios, esto debido a que están normados y se establece un límite máximo permisible de su concentración en el aire, esto con el fin de proteger la vida humana y preservar la fauna y flora del ambiente.

Los contaminantes criterio son sustancias que se liberan en grandes cantidades de gran variedad de fuentes y presentan un riesgo a la salud y bienestar humano en grandes regiones, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, material particulado y ozono son los contaminantes criterio.

Los efectos que causan estos contaminantes principalmente son agudos y no cancerígenos. De los efectos agudos, se ha identificado que el incremento en la concentración ambiental de partículas (PM₁₀) y ozono se encuentran relacionadas a un incremento en la tasa de mortalidad prematura (García et al., 2007).

La acidificación de las aguas de lagos, ríos y mares dificulta el desarrollo de vida acuática en estas aguas, lo que aumenta en gran medida la mortalidad de peces. Igualmente, acaba con los microorganismos fijadores de nitrógeno y afecta directamente a la vegetación, por lo que produce daños importantes en las zonas forestales. (Ovando, 2017).

El término “lluvia ácida” abarca la sedimentación tanto húmeda como seca de contaminantes ácidos que pueden producir el deterioro de la superficie de los materiales, concretamente, por su carácter corrosivo, la lluvia ácida deteriora las construcciones y las infraestructuras. Puede disolver, por ejemplo, el carbonato de calcio (CaCO₃), y afectar de esta forma a los monumentos y edificaciones construidas con mármol o caliza (Sánchez et al., 2010).

Mientras tanto, el potencial de problemas de contaminación del aire en Asia es alto por las emisiones y la proximidad de muchos de los principales centros industriales y urbanos (p. ej. Tokio, Seúl, Hong Kong, Bangkok, Kuala Lumpur, Singapur y Yakarta) (Balasubramanian et al., 2003).

Efectos de la lluvia ácida en los peces y la vida silvestre

Los efectos ecológicos de la lluvia ácida se ven con mayor claridad en entornos acuáticos, como arroyos, lagos y marismas, donde puede ser perjudicial para los peces y otros animales salvajes. A medida que fluye a través del suelo, el agua de lluvia ácida puede lixiviar aluminio de las partículas de arcilla del suelo y luego fluir hacia arroyos y lagos. Cuanto más ácido se introduce en el ecosistema, más aluminio se libera (EPA, 2020a).

Algunos tipos de plantas y animales pueden tolerar aguas ácidas y cantidades moderadas de aluminio. Otros, sin embargo, son sensibles a los ácidos y se perderán a medida que disminuya el pH.

Generalmente, las crías de la mayoría de las especies son más sensibles a las condiciones ambientales que los adultos.

A pH 5, la mayoría de los huevos de peces no pueden eclosionar. A niveles más bajos de pH, algunos peces adultos mueren. Algunos lagos ácidos no tienen peces. Incluso si una especie de pez o animal puede tolerar el agua moderadamente ácida, es posible que los animales o plantas que come no lo hagan.

Por ejemplo, las ranas tienen un pH crítico alrededor de 4, pero las efímeras que comen son más sensibles y pueden no sobrevivir a un pH por debajo de 5.5 (EPA, 2020a).

Efectos de la lluvia ácida en plantas y árboles

Los árboles muertos o moribundos son una vista común en áreas afectadas por la lluvia ácida. La lluvia ácida lixivia el aluminio del suelo. Ese aluminio puede ser dañino tanto para las plantas como para los animales. La lluvia ácida también elimina los minerales y nutrientes del suelo que los árboles necesitan para crecer (EPA, 2020a).

A grandes alturas, la niebla ácida y las nubes pueden quitar los nutrientes del follaje de los árboles, dejándolos con hojas y agujas marrones o muertas. Entonces, los árboles son menos capaces de absorber la luz solar, lo que los debilita y los hace menos capaces de soportar temperaturas bajo cero (EPA, 2020a).

Acidificación episódica

La nieve derretida y las lluvias torrenciales pueden provocar lo que se conoce como acidificación episódica. Los lagos que normalmente no tienen un alto nivel de acidez pueden experimentar temporalmente los efectos de la lluvia ácida cuando la nieve que se derrite o el aguacero trae mayores cantidades de deposición ácida y el suelo no puede amortiguarlo. Esta corta duración de mayor acidez (es decir, pH más bajo) puede resultar en un estrés a corto plazo en el ecosistema donde una variedad de organismos o especies pueden resultar dañados o muertos (EPA, 2020a).

A continuación, se listan los efectos principales de la lluvia ácida.

Cuadro 1. Efectos de la lluvia ácida. Fuente: Benitez (1993), Kirkwood y Longley (1995)

Especies/Medio	Efectos
Lagos y corrientes de agua	Muerte de crustáceos, insectos acuáticos y moluscos, desaparición del fitoplancton.
Suelo	Penetra en la tierra y afecta las raíces, a las hojas las vuelve amarillas, generado un envenenamiento en las plantas que termina con su muerte
Edificios y construcciones de hormigón	Vuelve porosa la construcción y causa la pérdida de resistencia en los materiales.
Animales	Pérdida de pelo y desgaste prematuro de las mandíbulas.
Seres humanos	Incremento en las afecciones respiratorias (asma, bronquitis crónica, síndrome de Krupp, etc.) y aumento en casos de cáncer.

Marco legislativo actual

Los niveles de acidez en la lluvia no se encuentran reglamentadas en las normas existentes del país mexicano, por lo que es de suma importancia generar manuales para las empresas y sus emisiones en la producción. Sin embargo, existen normas que regulan las emisiones contaminantes formadoras de la lluvia ácida, tales como el dióxido de azufre y sus valores normados.

En el marco legal nacional tenemos a la **NOM-022-SSA1-2010** que habla de los criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población (DOF, 2010).

En el marco internacional tenemos a la **Air Enforcement - EPA**, que nos habla de la revisión de fuentes nuevas y Prevención de deterioro significativo (NSR y PSD respectivamente, por sus siglas en inglés). Estos requisitos exigen que determinadas instalaciones industriales grandes

instalen equipos de control de la contaminación de avanzada al construir nuevas instalaciones o hacer modificaciones en las ya existentes (EPA, 2016).

El último informe sobre Calidad del Aire de la SEMARNAT fue emitido en 2014 y exponen los contaminantes principales emitidos en territorio mexicano.

Los contaminantes emitidos en mayor proporción por fuentes antropogénicas en 2014, sin considerar a las fuentes móviles, fueron los COV (3.4 millones de toneladas; 30.5%), el monóxido de carbono (CO; 3.2 millones de toneladas; 28.2% del total) y el bióxido de azufre (SO₂; 1.3 millones de toneladas; 11.9%). Al resto de los contaminantes correspondió un porcentaje entre el 6 y el 9%. Las fuentes de área emitieron en mayor proporción COV (38% del total emitido por este tipo de fuente) y CO (34%), mientras que las fuentes fijas generaron principalmente SO₂ (47%) y NO_x (24%). Las fuentes naturales emitieron principalmente COV (86%) y NO_x (14%) (SEMARNAT, 2018).

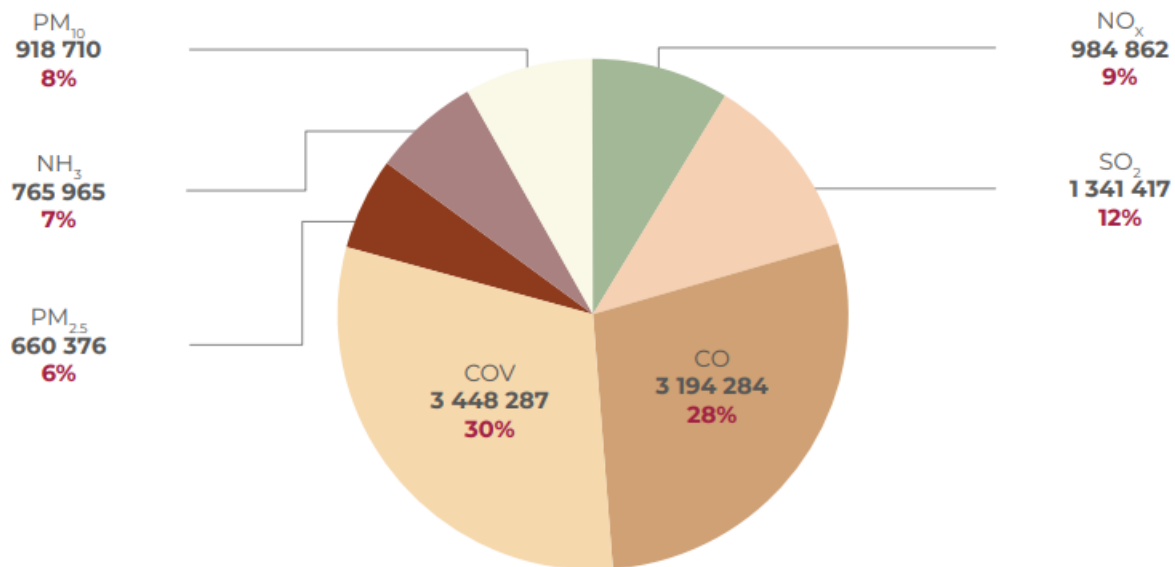


Figura 2. Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante. Fuente: (SEMARNAT, 2018).

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Antecedentes

Verma et al. (2002) presentaron el procedimiento para analizar la alcalinidad el pH y la concentración de especies carbónicas en una muestra de lluvia, utilizando del método de titulación de Gran. Las muestras de agua de lluvia fueron recolectadas en la estación San Juan Xiutetelco de los Humeros en Puebla, encontrando ligera presencia de acidez en las muestras de agua.

Bravo et al. (2003) utilizaron muestras de roca caliza cerca de Tulum, en un sitio arqueológico maya localizado al noroeste de Quintana Roo. El sitio de donde se recolectaron las muestras de lluvia ácida para irrigar a la roca caliza, obtuvo de la Estación de Biología Marina de Puerto Morelos, esto, con un colecto de precipitación húmeda (Aeruchem Metrics Collector).

El monitoreo de la lluvia durante el periodo 1994-2002, se realizó mediante la implementación de una red pluviométrica distribuida estratégicamente en la zona metropolitana de Guadalajara. Los pluviómetros utilizados para los muestreos corresponden a especificaciones estándar internacionales para este tipo de muestreo, constituidos por una botella de polietileno de alta densidad conectada con un tubo a un embudo de 25 cm (García et al., 2007)

De igual manera, Ramírez et al. (2010) recolectaron muestras de agua de lluvia provenientes del municipio de San Nicolas de la Garza, Monterrey, por un periodo de Enero a Diciembre en 2007, fue usado un muestreador automático seco-húmedo (Anchor International, modelo TE-78-100), con cubos de polietileno de alta calidad.

Ariza et al. (2013) fabricaron muestreadores para SO₂ para determinación de sulfatos en la atmosfera, por el método de platos de sulfatación (vía húmeda), dejándolos de 2 a 3 meses de exposición antes de analizar en el laboratorio. En el campus Mocambo de la Universidad Veracruzana en Boca del Río como punto principal.

Sosa et al. (2018) realizaron un estudio donde se utilizó una estación de muestreo equipada con un pluviómetro de acuerdo con las especificaciones de la WMO para obtener el volumen diario. Se llevó a cabo en la temporada de lluvias que comprende de junio a noviembre y en la temporada seca que comprende de octubre a mayo. Fue recolectada en La Mancha, Veracruz.

Balasubramanian et al. (2003) recolectaron muestras lluvias de la Estación de Investigación Atmosférica, ubicada en la azotea del edificio E2 (67 m sobre el nivel del mar) en el campus de la Universidad Nacional de Singapur desde noviembre de 1999 hasta octubre de 2000. El sitio de muestreo está a aproximadamente 1 km del mar abierto y libre de emisiones contaminantes importantes. Las industrias químicas están ubicadas al suroeste de la estación e industrias pesadas hacia el noroeste.

Khan y Sarwar (2014) recolectaron 20 muestras de agua de lluvia de las dos áreas residenciales de la ciudad Karachi, Pakistán: nueve en University Road (UR) y 11 en la Buffer Zone (BZ) durante la temporada de monzones del suroeste de 2009 (junio a julio).

Las muestras de precipitación se recolectaron durante los primeros minutos de cada evento, cuando estaba presente la mayor concentración de contaminantes (Dupre et al., 1994; Tuncel y Ungor, 1998). En caso de la lluvia continua, se recolectaron muestras consecutivas del mismo evento cada 6 h. Las muestras se analizaron en cuanto a alcalinidad, pH y conductividad dentro de los 24-48 h.

Las muestras de agua de lluvia se recolectaron según el evento de monzones con recolectores solo húmedos, por un período de un año (julio 2000 - junio de 2001), en un campus universitario ubicado casi en la parte central del área de estudio en Tirupati situado al sur de la península india. (Chandra et al., 2005) Al llegar al laboratorio, el pH fue medido en una alícuota de la muestra usando un medidor de pH (Metrohm-632). Para eliminar los contaminantes inorgánicos, los filtros fueron prelavados con 200 ml de DDW (Bagchi y Haddad, 1986) y secado a 100 °C, y los filtros en blanco no mostraron contaminación.

Los aniones mayormente inorgánicos de F, Cl, NO₃, SO₄, Na, K, Mg, Ca y NH₄, fueron determinados cuantitativamente mediante cromatógrafo iónico, que proporciona una simple, rentable, rápida, precisa respuesta y es un método altamente sensible para la determinación de iones en niveles bajos en muestras ambientales (Ali-Mohamed y Jaffer, 2000).

El análisis de aniones fue realizado por Metrohm Modulor IC. (Chandra et al., 2005)

Las investigaciones sobre lluvias ácidas en nuestro país son recientes. Los estudios sistemáticos iniciaron en 1980, enfocándose principalmente en la determinación del pH, SO_4^{2-} , NO_3^- y cloruros (Cl^-) (García et al., 2007)

Las pérdidas directas e indirectas causadas por la corrosión atmosférica son grandes, lo que hace lógico si consideramos que la mayor parte del equipo y construcciones metálicas se encuentran en el exterior, más del 50 % de las pérdidas causadas por corrosión son producidas por esa situación (Betancourt et al., 2002).

A pesar de la importancia del estudio del depósito de N y S, los esfuerzos realizados en México se han enfocado a ecosistemas ubicados en las cercanías de áreas contaminadas, como el Desierto de Los Leones y Zoquiapan en el Valle de México (Cerón et al., 2018)

Por último, tenemos que los contaminantes emitidos a la atmosfera pueden atribuirse principalmente a dos tipos de fuentes, las fuentes naturales y las fuentes artificiales denominadas antrópicas, ya que se derivan de la actividad humana. (Vélez et al., 2010).

3.2 Lugar de estudio

La zona conurbada Veracruz-Boca del Río cuenta con una población total de 751, 759. Su clima predominante es cálido húmedo y cálido subhúmedo, la temperatura media anual es de 23°C y la máxima está en 32°C. La precipitación media en el estado es de 1,500 mm anuales. De mayo a octubre, se presenta la época de lluvias y ciclones en el estado (INEGI, 2020).



Figura 3. Mapa de macro localización del estado de Veracruz, México. Fuente: (INEGI, 2022)



Figura 4. Mapa de macro localización de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, México.
Fuente: (INEGI, 2022)

3.3 Vacío del conocimiento

En el estado de Veracruz, no se realizan estudios para la identificación de acidez en la lluvia. Como previamente se ha explicado, la lluvia ácida no es un fenómeno natural, es un fenómeno alterado debido a la influencia antrópica por lo que determinar sus componentes principales puede ser complicado, Espinosa et al. (2013) realizaron un muestreo en diversas estaciones de la cuenca baja del río Coatzacoalcos. Esto era con el fin de analizar los COPS (contaminantes orgánicos persistentes) en la ciudad de Coatzacoalcos y ver si existía influencia en eventos de degradación en este suelo.

Cómo se externa previamente, Veracruz no tiene un monitoreo para identificar la acidez en la lluvia, a pesar de que se tienen avances y muestreadores en otros estados acerca de esta problemática.

Debido a esta situación, es difícil elaborar leyes o normas que permitan ayudar en la mitigación de estos contaminantes formadores de lluvia ácida, pero de igual manera, controlar las emisiones de NO_x y SO_x es un tema complicado en materia social y ambiental.

En general existe muy poca información de la lluvia ácida en el estado de Veracruz o a nivel nacional, por lo que implementar un seguimiento para conocer los niveles de acidez en la zona conurbada, podría ser pionero en poder seguir estudiando este fenómeno en la región.

3.4 Frontera del conocimiento

En la actualidad, hay muy pocos estudios acerca de la lluvia ácida que sean recientes, esto se convierte en una problemática debido a que, si bien las muestras que se recolectaran y muestrearan para conocer los índices de acidez de la lluvia en la zona conurbada, no se tiene un marco de referencia actual en esta zona con la cual comparar y poder ver si a través de los años algo ha cambiado.

Cerón et al. (2018) ubico su estudio en el valle de Orizaba, Veracruz, allí expuso que las fuentes locales para NH_4^+ fueron vehículos automotores, industrias y actividades agrícolas desarrolladas en las áreas rurales cercanas. El SO_4^{2-} se originó en fuentes regionales, cuya contribución fue más alta, cuando el Valle estuvo bajo la influencia de vientos alisios durante la época de lluvias y a vientos del Norte durante la temporada de frentes fríos. Hubo un incremento en los niveles de fondo de SO_4^{2-} debido al transporte a gran escala de emisiones regionales de SO_2 liberadas en fuentes ubicadas viento arriba del Valle, aún inclusive desde fuentes muy distantes.

Los pocos estudios concluyentes que hay nos hablan acerca de las trayectorias de retroceso mostraron dos patrones básicos de transporte de masas de aire: del Norte y del Este; presentándose estos en la temporada seca y lluviosa, respectivamente. Lo que conlleva que las principales fuentes precursoras son de estas regiones (Sosa et al., 2018).

No obstante aquellos estudios donde los resultados de las cinéticas de pérdida de masa en el deterioro de las aleaciones metálicas, indican que con el incremento de la acidez de la lluvia en aleaciones como aceros al carbón y aceros HSLA, el ácido sulfúrico es el que se encarga del proceso de corrosión, mientras que en presencia de lluvia ligeramente ácida (pH aproximadamente de 5) el ácido nítrico es el que tiene el efecto corrosivo (Padilla et al., 2016).

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 Situación problemática

A través de este documento, se ha mencionado como la lluvia ácida causa afectaciones al medio ambiente. La contaminación del aire ha jugado un papel fundamental en la formación de lluvia ácida, esto debido a que la liberación de NO_x en el ambiente como componentes principales de la lluvia ácida.

El control de la contaminación atmosférica representa altos costos que se generan a partir de la mitigación de los efectos negativos de esta problemática, afectando de manera significativa la competitividad de las ciudades (Franco, 2012).

Cada año, la población crece significativamente y junto con esto, la demanda de recursos, esto nos da como resultado que, en la actualidad, existe un incremento en el uso de combustibles y la industria tienen un crecimiento importante con impacto, por la alta liberación de componentes como los SO_x y material particulado en la atmósfera, lo que provoca que fenómenos naturales como las precipitaciones en la tierra, se estén convirtiendo en precipitaciones ácidas. La lluvia ácida solo fue descubierta a partir de los desastres ecológicos que causó en algunos países de Europa (Gárce y Hernández, 2004).

La zona conurbada Veracruz – Boca del Río, es una de las zonas locales que pueden ser considerada una industria con nivel alto en el país, la mayoría de la industria metal – mecánica se ubica aquí. Challenger y Caballero (1998) se demostró que, en México, la industria petroquímica ha ocasionado daños ecológicos irreversibles en diferentes ecosistemas, ejemplo de ello es la cuenca del Río Coatzacoalcos, en Veracruz. Pero no solamente ellos, el Puerto de Veracruz se ha convertido en el más importante del país, haciendo que la mayoría del movimiento marítimo se concentre en la ciudad costera, esto nos ocasiona también grandes liberaciones de NO_x, SO_x y materiales particulados a la atmósfera, que pueden terminar dañando las ciudades aledañas debido a que la contaminación podría ser la causante en la formación de la lluvia ácida. En la zona conurbada Veracruz – Boca del Río, así como en algunas otras ciudades mexicanas donde existen fuentes emisoras de dióxido de azufre y nitrógeno de origen antropogénico, tales como las fuentes móviles con el tráfico rodado (motocicletas, automóviles, tráileres, aviones, etcétera) así como las fijas donde destacan principalmente las chimeneas industriales que utilizan combustibles fósiles en procesos de producción.

Esto por separado podrían ser controlables, y en ocasiones, insignificantes debido a la dispersión de estos gases en la atmosfera de manera natural, el problema es que, en conjunto, causan daños importantes al medio ambiente.

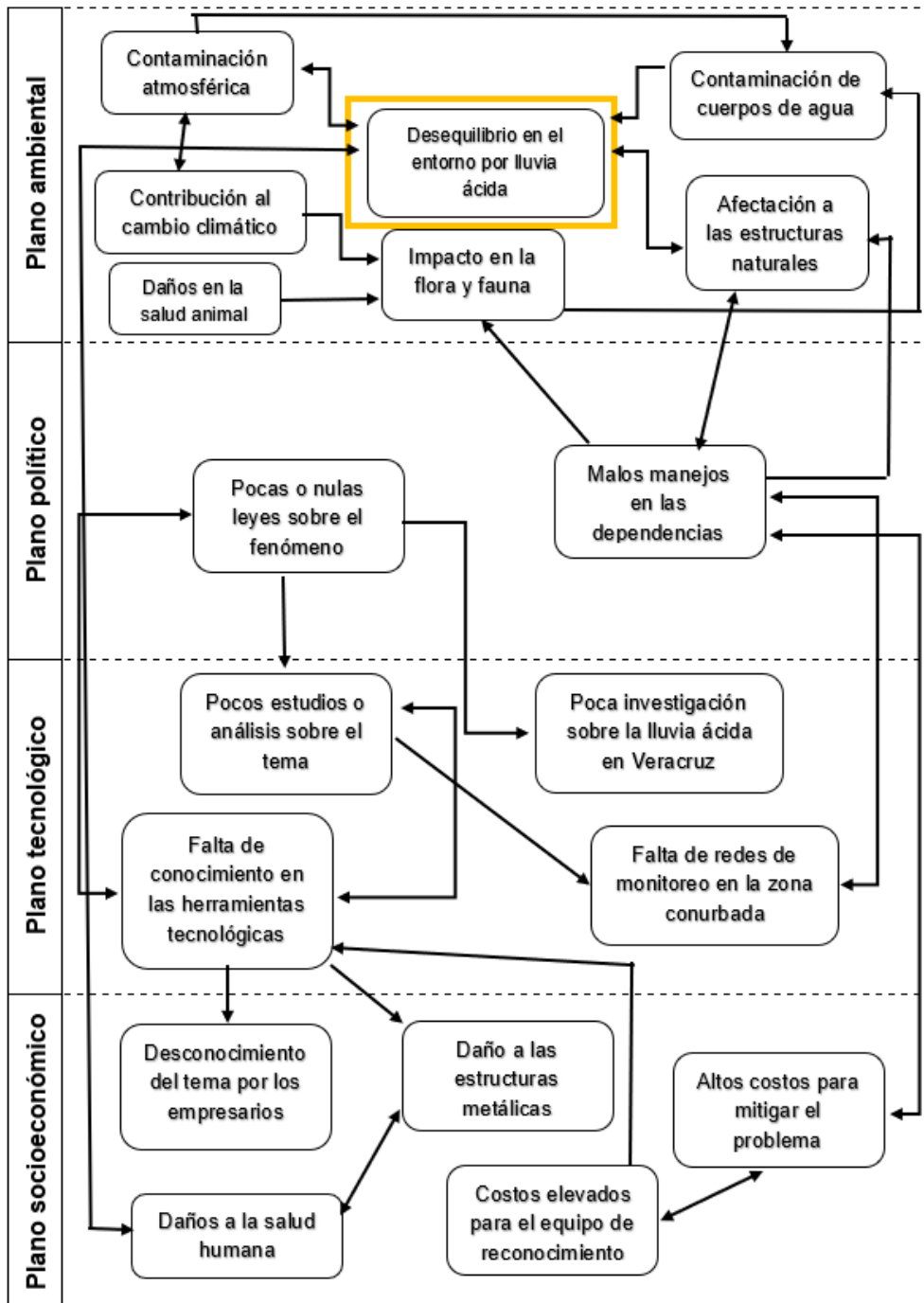


Figura 5. Planteamiento del problema, plano ambiental.

4.2 Planteamiento del problema

Pereyra y Atzín (1990) habla de que “uno de los mayores problemas con los que se tiene que enfrentar actualmente la humanidad es la lluvia ácida”.

Como ya se mencionó previamente, las actividades antropogénicas, como por ejemplo la quema de combustible en la industria o el tráfico vehicular, son las causantes de este fenómeno al liberar a la atmosfera contaminantes, el problema principal es que en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río, no se tiene un monitoreo acerca de este fenómeno, por lo que no se conoce si existe acidez en las precipitaciones que caen en estos dos municipios.

Con base a lo anterior, surge la siguiente investigación, para conocer el nivel de acidez de la lluvia en la zona conurbada Veracruz - Boca del Río. Para poder abordar el tema, es importante conocer el aspecto gnoseológico, en esta investigación el racionalismo fue la corriente utilizada, pues ha sido necesaria la razón, por lo que previamente se localizaran los puntos estratégicos de monitoreo en la zona conurbada, para la instalación de nuestro dispositivo muestreador de lluvia. Posterior a eso, para proceder con el punto de vista ontológico, aquí es necesario ya haber identificado conocer el objeto de estudio y su realidad, que para esta investigación es la lluvia ácida, con lo cual será preciso conocer cómo es que esta se forma, debido a que influyen diversos componentes, por lo que también se van a definir los principales compuestos químicos presentes en la lluvia que se precipita en ambos municipios.

Cómo anteriormente se había explicado, debido a la naturaleza de nuestro tema, para esta investigación nos posicionaremos bajo el positivismo lógico ya que necesitaremos una comprobación científica para la identificación de la acidez en la lluvia, ya que, aunque la lluvia es un fenómeno natural, la lluvia ácida pasa a ser un fenómeno alterado por la influencia social, gracias a sus actividades antropogénicas.

4.3 Justificación

Las emisiones de gases industriales, en particular los óxidos de azufre y nitrógeno han sido una preocupación constante con la humedad de la atmosfera producen ácido sulfúrico (H_2SO_4) y nítrico (HNO_3), respectivamente. Estos ácidos se disuelven en las lluvias, ocasionando la lluvia ácida. Este proceso origina una disminución del pH a valores que fluctúan entre 5 y 3, en algunos casos incluso pueden ser menores (Verma et al., 2002).

La zona conurbada Veracruz-Boca del Río hasta el momento no ha desarrollado equipos de captación de lluvia para detectar la acidez en ella, por lo que el presente trabajo sienta un precedente en el estudio de acidez en lluvia mediante un potenciómetro, y nos permite considerar un sistema automatizado para la detección de niveles ácidos en las precipitaciones conservando el agua de lluvia para también permitir análisis posteriores.

4.4 Pregunta de investigación

¿Qué nivel de acidez tiene la lluvia que se precipita en la zona conurbada Veracruz - Boca del Río?

5. HIPÓTESIS

La zona conurbada Veracruz - Boca del Río presenta lluvia ácida, debido a los niveles de acidez encontrados por las altas concentraciones de compuestos químicos presentes en el aire.

6. OBJETIVOS

6.1 General

Determinar el nivel de acidez que presenta el agua de lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río

6.2 Particulares

OP1. Identificar puntos para establecer la localización de los muestreos locales.

OP2. Registrar los eventos de lluvia en la zona conurbada Veracruz - Boca del Río.

OP3. Representar los niveles de acidez en las muestras de lluvia utilizando un sistema GIS.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

El recolector utilizado en el presente estudio fue diseñado en el programa de MCIAMB del Instituto Tecnológico de Boca del Río por el M.C.I.A Juan García Hernández en el 2020, por lo que es importante mencionar los pasos que dicho alumno realizó para el ensamble del recolector con el objetivo de entender que las mediciones procedieron con precisión exacta.

Paso 1.

El cilindro vertical esta soportado en la parte superior del gabinete, fijado por un conector tipo mampara de latón y tuerca. La medida del coplee es de 19.0 mm exterior por 12.7 mm de interior. El tubo central ejerce toda la fuerza y a su vez alimenta un depósito de acero inoxidable y soldadura plata alemana 45 % de aleación como se muestra en la Las uniones de la tapa y gabinete se utilizó soldadura tipo argón, para evitar filtraciones de líquidos hacia el interior (García, 2020).

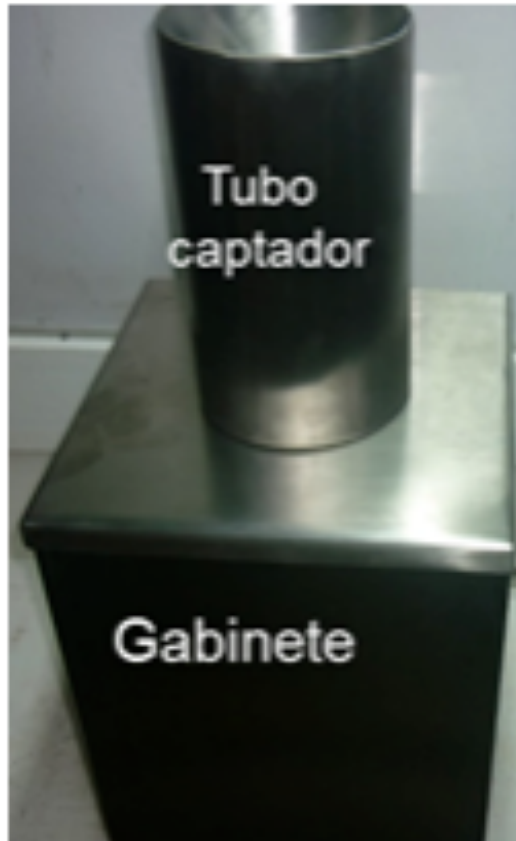


Figura 6. Gabinete de acero inoxidable. Fuente García (2020).

Cuenta con un tubo captador horizontal de 12.7 mm de diámetro, soportado en un tubo vertical de 15.8 mm de diámetro y soldado en plata alemana 45 %. El material del que está hecho el tubo es acero inoxidable (García, 2020).

El volumen del depósito es de 500 ml y dentro de él un sensor de nivel, en la parte inferior tiene un conector de 12.7 mm para una electroválvula de descarga de líquido (García, 2020).

El depósito tiene una tapa de acrílico con dos orificios, uno para la alimentación de electroválvula y el segundo para conector tipo mampara y en su interior de 11.1 mm para soporte de electrodo o sensor de pH, también conocido como potenciómetro y que estará conectado al sistema de control como se muestra en la Figura 5 (García, 2020).



Figura 7. Conexiones internas del dispositivo. Fuente García (2020).

La captación se realiza cuando la tapa superior es removida de su posición mediante un desplazamiento de 0 a 180°. El soporte de la tapa es manipulado por un servomotor, en el momento que se detectan las primeras gotas de agua, el sistema empieza a realizar su trabajo como se muestra en la Figura 6 (García, 2020).



Figura 8. Sistema mecánico de captación. Fuente García (2020).

El sensor que le informa al controlador cuando comienza a llover está construido con base en una placa detectora de deposición húmeda, la cual se utiliza como un switch normalmente abierto que se cierra con la presencia del agua. Al detectar la lluvia, dicha placa le envía la orden al microcontrolador para abrir la tapa, activando un servomotor, y exponer el captador a la atmósfera. (García, 2020).

Al inicio y al final de cada precipitación mantendrá al captador fuera de contaminantes externos. Tendrá una respuesta rápida procurando evitar un retraso entre el inicio y la apertura del colector (García, 2020).



Figura 9. Placa detectora de lluvia mod SRR01. Fuente García (2020).

Paso 2.

Se diseñaron los circuitos eléctricos y electrónicos para el sistema Arduino con módulos. El sistema de control de pH cuenta con 8 módulos, de los cuales 7 son alimentados con 5 voltios y 1 con 24 voltios. Todo el sistema es controlado con el sensor de lluvia mediante un interruptor deslizable para la apertura de la tapa (García, 2020).

El funcionamiento del circuito se describe en un diagrama a bloques y se compone de varios sensores como el de nivel de líquidos, el sensor de pH y el sensor de lluvia como se muestra en la Figura 8 (García, 2020).

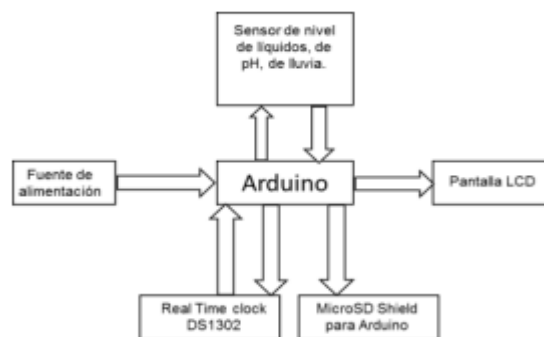


Figura 10. Diagrama de bloques de circuito electrónico 54. Fuente García (2020).

Para almacenar la información generada por el sensor de pH, contará con una memoria SD Estándar de 1 GB. La memoria va estar conectada al microcontrolador a través de un microSD shield, el cual es una placa que brinda al Arduino comunicación con la tarjeta microSD (Banzi, 2011).

Para el llevar el control de la hora y fecha se hace del uso de un sensor DS1302. Para la interacción con el usuario se tiene que instalar una pantalla de cristal líquido (LCD) que representara las variables que se estudiaran, con una capacidad para mostrar 32 caracteres en dos filas (García, 2020).

La representación de datos van a estar expuestas en la pantalla, las lecturas de valores tomados de la muestra captada en un chubasco en tiempo mínimo o máximo, conociendo el tiempo que tendrá para la obtención de datos como se muestra en la Figura 9 (García, 2020).



Figura 11. Sistema de datos operando. Fuente García (2020).

Cuando el sistema de control detecta liquido o humedad, la sección mecánica conjuntamente con el motor servo empieza a realizar su trabajo, el sistema mecánico se energiza y en ese momento la tapa compuerta superior del captador tiende a destapararlo, para así obtener el acumulamiento de líquido que desciende en el momento requerido, por lo tanto, teniendo en cuenta que el equipo llega a los parámetros requeridos (García, 2020).

Por lo consiguiente, cuando el sistema de control no detecta liquido o humedad, el sistema mecánico empieza a trabajar a la inversa y en ese momento la tapa empieza a

descender hasta que el captador queda sellado. Solamente funciona, cuando el sistema detecta las primeras gotas de agua, entra en un proceso de captación, por lo consiguiente, la seguridad de que esté energizado el mecanismo antes es nula (García, 2020). A continuación, se sintetizan las fases que fueron parte del proyecto para determinar el nivel de acidez en el agua de lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río.

7.1 Fase preliminar:

Para esta fase se realizó la compilación de los elementos que formaron la investigación.

7.1.1. Inventario de la información: El colector que se utilizó, fue construido en el programa de maestría de ingeniería ambiental (García, 2020). Con este instrumento se midió el pH. Emplea una sonda incorporada al sistema electrónico, a su vez almacena, mediante una memoria SD, los datos que se recolectaron durante el tiempo transcurrido de la precipitación. Se establecieron los puntos de muestreo, realizando un reconocimiento de la zona conurbada acerca de las principales actividades antropogénicas, con lo cual, se ubicó la instalación del colector en las zonas más cercanas a actividades industriales o de tipo turístico.

El gabinete fue diseñado en acero inoxidable con medidas de 300 x 300 x 400 mm de altura, con tapa superior desmontable 300 x 300 x 25 mm de altura y en la parte inferior se le colocó una tapa lisa (García, 2020).

En la tapa superior se montó un cilindro en posición vertical en acero inoxidable con medidas de 150 mm de diámetro y una altura de 250 mm y dentro del mismo contará con un embudo (García, 2020).

Para resguardar todo el sistema del equipo, tendrá una puerta de acceso. Para mantener cerrado el cilindro de la parte superior, se le diseñó una tapa. Esto es para evitar que le caiga basura, excremento de aves o partículas ambientales contaminadas en el interior del cilindro (García, 2020).

Para que la tapa se mantenga en posición cerrado o abierto tendrá un servomotor en su base. En cierto modo tendrá un sistema automatizado para que realice lo requerido de controlar y así poder tener la obtención de datos (García, 2020).

También se le diseñó un circuito eléctrico y un circuito electrónico (García, 2020).

7.2 Fase experimental:

A partir de la fase 7.1, se hace un reconocimiento de las principales actividades antropogénicas de la zona, donde se eligen las zonas aledañas a industrias o actividades turísticas más representativas para ubicar los colectores. Los criterios de selección de puntos de zona fueron:

- Accesibilidad: Que la zona fuera de fácil acceso, protegido por personal de confianza para evita el robo y evitar derrames del agua de lluvia.
- Personal de confianza: Que la persona encargada de resguardar la muestra conozca el proyecto y cuide de ésta hasta su recolección.
- Área protegida: Que la zona se encuentre resguardada por el personal de confianza para evitar contaminación de las muestras.

La Figura 11, ilustra la ubicación y distribución de los colectores para el muestreo de agua de lluvia, el mapa se creó con el programa ArcGis® Versión 10.8 una vez delimitada el área y obtenido las coordenadas.

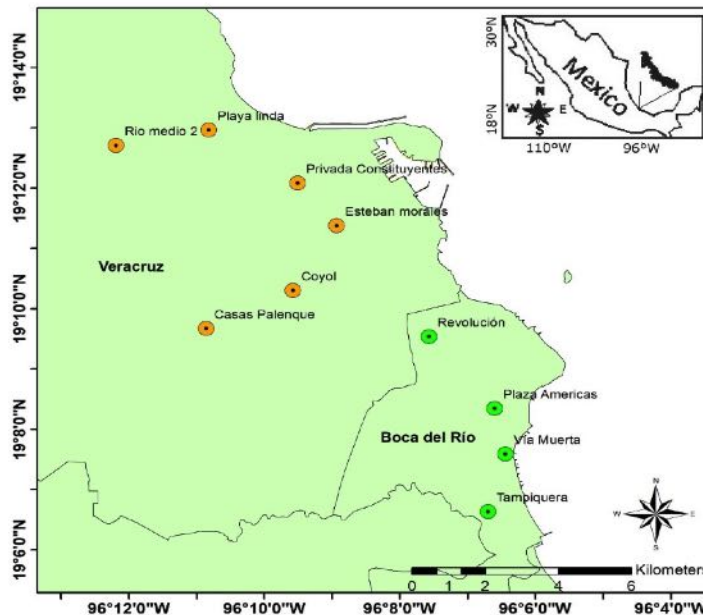


Figura 12. Mapa de zona conurbada Veracruz – Boca del Río mediante ArcGis

7.2.1 Muestreo y obtención de datos

Se distribuyeron de diez puntos estratégicos, de la zona conurbada, el colector principal y colectores secundarios. Las tomas de muestra se recolectaron de mayo a septiembre del 2021.

El colector principal, fue diseñado, previamente, en el Instituto Tecnológico de Boca del Río. Emplea un sistema de control automatizado del tipo ON-OFF de lazo cerrado, para el control de la apertura y cierre de la tapa. Usa el microcontrolador del sistema Arduino Mega.

Para la medición del PH, se utilizó un controlador tipo proporcional (P). La implementación permitió recopilar datos de lluvia ácida. Dicho sistema cuenta con baterías recargables para asegurar su movilidad y así obtener la información instantáneamente en cada monitoreo.

Para contener resguardado todos los componentes, se construyó una estructura y un gabinete de acero inoxidable grado 304 opaco para evitar la corrosión del sistema. El sensor de acidez se calibró con soluciones de calibración (buffers) neutro (7) y ácido (4). Los niveles de acidez medidos se almacenaron en una memoria SD (García, 2020).

El pH se midió *in situ* con la sonda de medición del colector.

Figura 13. Sistema mecánico de captación. Fuente: García (2020).

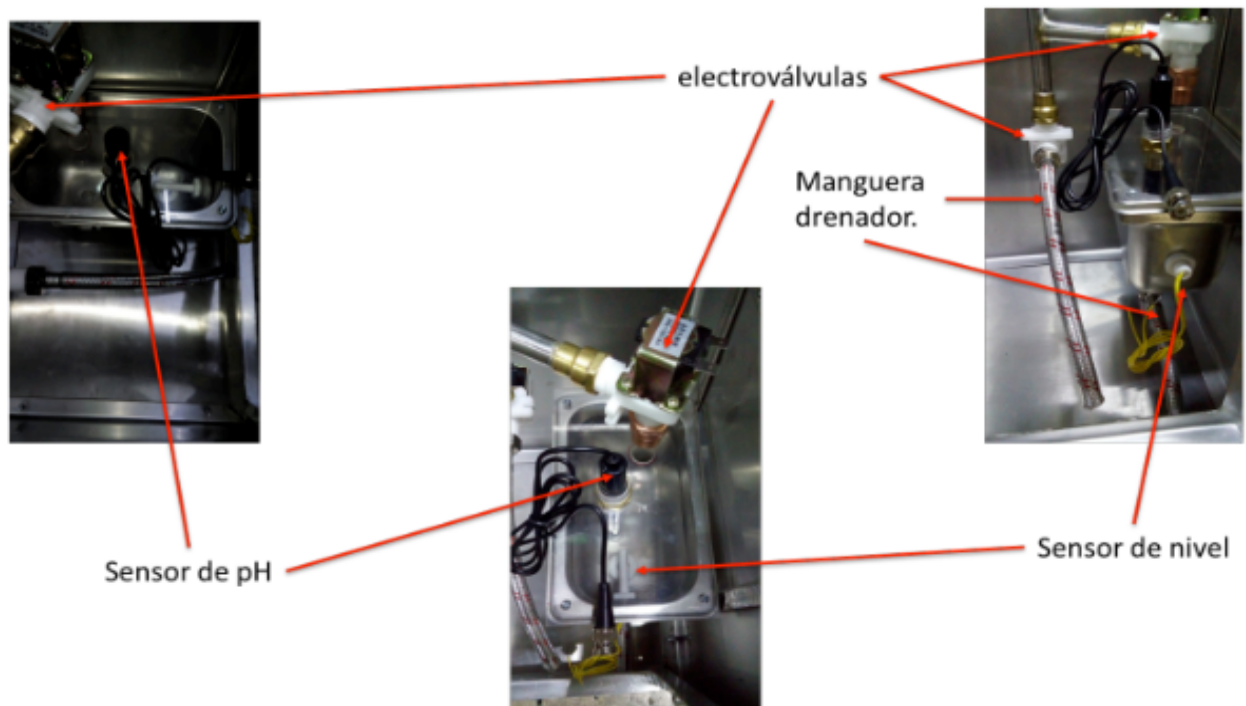


Figura 14. Estructura interna del dispositivo. Fuente: García (2020)



Figura 15. Estructura externa del dispositivo. Fuente: García (2020)

El recolector secundario fue medidor de prueba de agua multiparamétrico 6 en 1 de la marca Abanopi, se recolectaba la lluvia en cuencos con capacidad de 1 L hechos de vidrio.

Se utilizó la NMX-AA-008-SCFI-2016 ANÁLISIS DE AGUA. MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. MÉTODO DE PRUEBA, para tratar las muestras.

El valor de pH puede cambiar rápidamente en la muestra de agua como resultado de procesos químicos, físicos o biológicos. Por esta razón, es recomendable medir el pH directamente del cuerpo de agua, si esto no es posible, tomar al menos 500 mL de muestra de agua en un recipiente de muestreo y medir sin exceder las 6 h después de la toma de muestra, cuando éste sea el caso señalar en el informe final de laboratorio el tiempo en que se midió el pH. Cuando se está recolectando la muestra, evitar el intercambio de gases, ejemplo la liberación de dióxido de carbono entre las muestras y el aire de ambiente. Llenar el recipiente completamente y taparlo adecuadamente evitando en la medida de lo posible la formación de burbujas. Las muestras deberán mantenerse a $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en la obscuridad o protegido de la luz solar, durante su transporte y almacenamiento (NMX-AA-008-SCFI-2016, 2016).

Para asegurar la buena funcionalidad del electrodo de pH, se debe realizar el mantenimiento, limpieza y verificación periódica, de acuerdo con las instrucciones del fabricante y a lo establecido por el propio laboratorio, todo lo anterior debe quedar documentado (NMX-AA-008-SCFI-2016, 2016).



Figura 16. Medidor de prueba de agua multiparamétrico. Fuente: Walmart (2021)

7.3 Fase de procesamiento y análisis de la información:

7.3.1 Análisis descriptivo

- Caracterización de parámetros meteorológicos

Se caracterizó un parámetro meteorológico: precipitación. El análisis de esta variable se realizó a través de Minitab® Versión 21.1.0 (Figura 15). Los datos se basan en un análisis estadístico de informes climatológicos históricos por hora desde el 1 de enero de 2021 hasta el 30 de septiembre de 2021 (WeatherSpark, 2021).

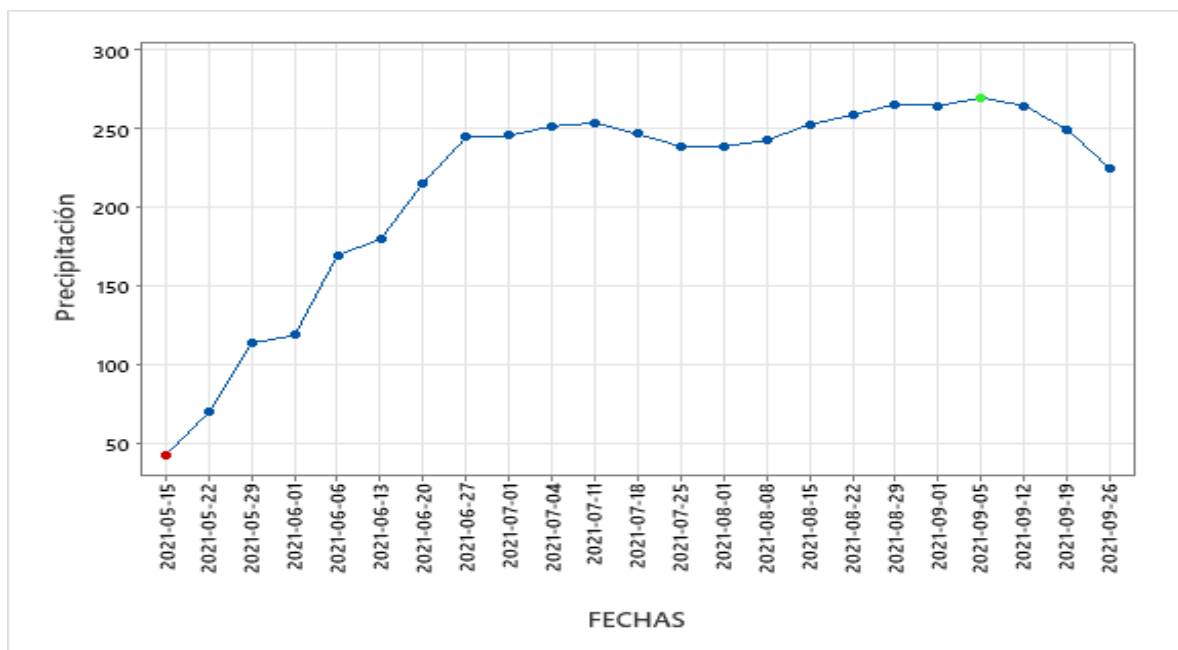


Figura 17. Promedio de precipitación en mm. Fuente: WeatherSpark (2021)

En la figura 17, observamos como las precipitaciones inician en una escala pequeña entre 48 mm y 50 mm al inicio de la temporada de lluvias en la segunda semana de mayo, conforme se avanza, el nivel de precipitación va creciendo, alcanzando picos entre 249 mm y 252 mm, en los meses de julio y agosto, para comenzar nuevamente a descender cuando se está por finalizar la temporada de lluvias acercándonos a septiembre.

7.3.3 Análisis comparativo

Se establecieron las posibles relaciones existentes entre el pH medido y analizado durante la investigación y los parámetros meteorológicos.

7.3.4 Generación de resultados

Las estructuras de piedra y metálicas pueden sufrir debido a la lluvia ácida.

Con base en los resultados obtenidos, se creará una base local para generar futuros mapas de distribución espacial y sus valores promedio en cuanto a pH. De igual manera podemos establecer valores máximos y mínimos e incluso una desviación estándar para futuros estudios.

8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentan los resultados, los análisis y las correlaciones tomando en cuenta el pH medido en el sitio y la base meteorológica histórica correspondiente al periodo comprendido de mayo a septiembre de 2021.

- Análisis meteorológico.

Para este apartado, se utiliza la base histórica del periodo del análisis en el estado de Veracruz, esto corresponde a; precipitación. El clima de la zona conurbada Veracruz – Boca del Río se considera caliente – templada, el promedio de lluvia total anual es de 203 mm. El periodo de lluvias comprende de dos fenómenos, lluvias y ciclones tropicales, este año siendo proyectadas del 1 de junio al 30 de noviembre de 2021 (PC, 2017). La temperatura promedio del agua fue de mayo a septiembre de 28 °C. La humedad relativa promedio del aire oscila entre 98 % al 100 % en el mismo periodo de tiempo, siendo los meses de junio, julio y agosto los más húmedos (WeatherSpark, 2021).

- Análisis parámetro pH

El 15 de mayo de 2021, se inició la recolección en los diez puntos seleccionados, con el fin de determinar la acidez en el agua de lluvia que cae sobre la zona conurbada. En el Cuadro 1, se establecen los criterios seleccionados para el reconocimiento de la acidez en la lluvia con base en su pH. La escala de pH, es una unidad de medida que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución y con esto, conocer la acidez y la alcalinidad en ella. A menor pH de una solución o sustancia (menos de 7), es más ácida. A mayor pH de una solución o sustancia (mayor a 7), es más alcalina. La lluvia tiene un pH aproximado de 5.6; es ligeramente ácido porque el dióxido de carbono (CO_2) disuelto en el pH y forma ácidos carbónicos débiles. La lluvia ácida suele tener un pH aproximadamente ≤ 4.3 y 4.7 (EPA, 2020b). (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación del agua de lluvia de acuerdo con el pH. Fuente: Instituto de Hidrología (2016)

pH	Clasificación de la lluvia
pH > 5.6	Lluvia no ácida
4.7 < pH ≤ 5.6	Lluvia ligeramente ácida
4.3 < pH ≤ 4.7	Lluvia medianamente ácida
pH ≤ 4.3	Lluvia fuertemente ácida

Cualquier suelo cuyo pH sea menor a 7 es considerado alcalino. Sin embargo, no todos los suelos alcalinos presentan las mismas características. En suelos alcalinos de zonas áridas y semiáridas predominan los sulfatos y carbonatos, debido a la baja precipitación que disminuye su lixiviación lo que provoca una acumulación de bases como: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K) (Carrow y Duncan, 2011).

A continuación, se muestran los valores correspondientes a pH y sus análisis estadísticos registrados en el experimento. Datos obtenidos a través de Minitab®.

Cuadro 3. Valores estadísticos de pH obtenidos mediante Minitab®.

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Sitio 1	23	0	4.5470	0.0210	0.1006	4.3300	4.4800	4.5300	4.6000	4.8300
Sitio 2	23	0	4.4987	0.0233	0.1117	4.3600	4.4400	4.4800	4.5300	4.9000
Sitio 3	23	0	4.7052	0.0263	0.1260	4.3300	4.6600	4.7300	4.8100	4.8400
Sitio 4	23	0	4.5543	0.0192	0.0923	4.4000	4.5000	4.5600	4.5900	4.8500
Sitio 5	23	0	4.8043	0.0199	0.0953	4.6400	4.7300	4.8000	4.8700	5.0500
Sitio 6	23	0	4.9635	0.0178	0.0852	4.8300	4.9000	4.9500	5.0000	5.2000
Sitio 7	23	0	4.8622	0.0186	0.0890	4.7000	4.8100	4.8500	4.9000	5.1000
Sitio 8	23	0	5.0852	0.0415	0.1990	4.4500	5.0700	5.1000	5.1600	5.3700
Sitio 9	23	0	4.7835	0.0291	0.1397	4.4000	4.7600	4.8200	4.8500	5.0000
Sitio 10	23	0	4.7865	0.0286	0.1369	4.5400	4.7200	4.7900	4.8300	5.2000

Simbología utilizada:

N = Número de muestras

N* = Número de valores faltantes

Q1 = Cuartil 1

Q3 = Cuartil 3

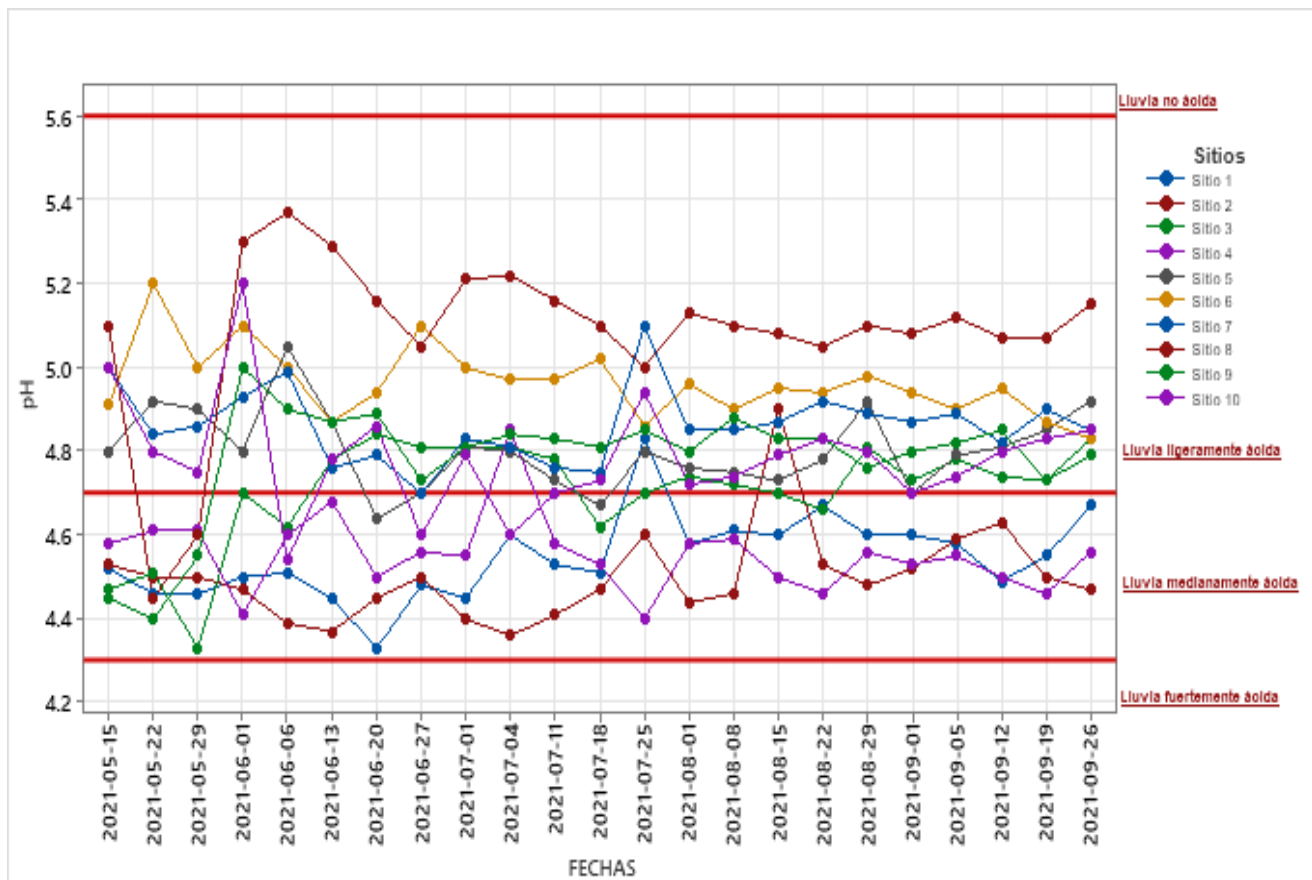


Figura 18. pH de la lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río en función del tiempo

Los valores de pH muestran un comportamiento similar en los diez puntos de recolección y durante el periodo de muestreo. El rango de pH se mantuvo entre 4.33 (Sitio 3) y 5.37 (Sitio 8), presentándose los mayores índices de concentrados de acidez a partir de junio y hasta septiembre; mientras que, en mayo, a pesar de ser una diferencia mínima, presentó el valor promedio más bajo en pH, esto puede atribuirse a las primeras lluvias del periodo de ciclones y lluvias.

Las diferencias entre los meses monitoreados no son significativas. Sin embargo, se determinó que por los valores alcanzados se presentó el fenómeno de lluvia ligeramente ácida a lluvia medianamente ácida. La desviación estándar muestra datos homogéneos pues los valores en ningún caso son mayores a 1 (Tabla 4).

Para poder escoger un modelo de correlación lineal que nos permitiera asociar los datos de precipitación y pH analizado, determinamos si los parámetros presentaban una distribución

normal, para ello utilizamos el modelo de Spearman, esto debido a que es el que mejor se adapta a las características de nuestro estudio.

Cuadro 4. Intervalo de correlación. Fuente (Hopkins et al., 1987)

Valores del coeficiente de correlación de Spearman	Interpretación
1	Correlación perfecta
0.7 – 0.9	Alta correlación
0.5 – 0.7	Correlación moderada
0.3 – 0.5	Baja correlación
0.1 – 0.3	Correlación despreciable
0	Incorrelación

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el programa Minitab® para la correlación de las precipitaciones semanales vs el pH obtenido en esas semanas por cada sitio.

Método

Tipo de correlación Spearman
 Número de filas 23
 utilizadas:

Correlaciones

Sitio 1	
Precipitación	0.423
Sitio 2	
Precipitación	0.273
Sitio 3	
Precipitación	0.381
Sitio 4	
Precipitación	-0.337
Sitio 5	

Precipitación -0.307

Sitio 6

Precipitación -0.150

Sitio 7

Precipitación -0.095

Sitio 8

Precipitación -0.108

Sitio 9

Precipitación 0.045

Sitio

10

Precipitación -0.278

Se selecciona el coeficiente de correlación de Spearman, estableciendo los siguientes parámetros:

- Es un problema de Asociación
- V_1 : Precipitación en mm
- V_2 : Promedio mensual pH Veracruz – Boca del Río
- H_0 : No hay relación lineal entre la precipitación y la acidez en el agua de lluvia en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río ($r=0$)
- Regla de decisión: Si $p \leq 0.05$ se rechaza H_0

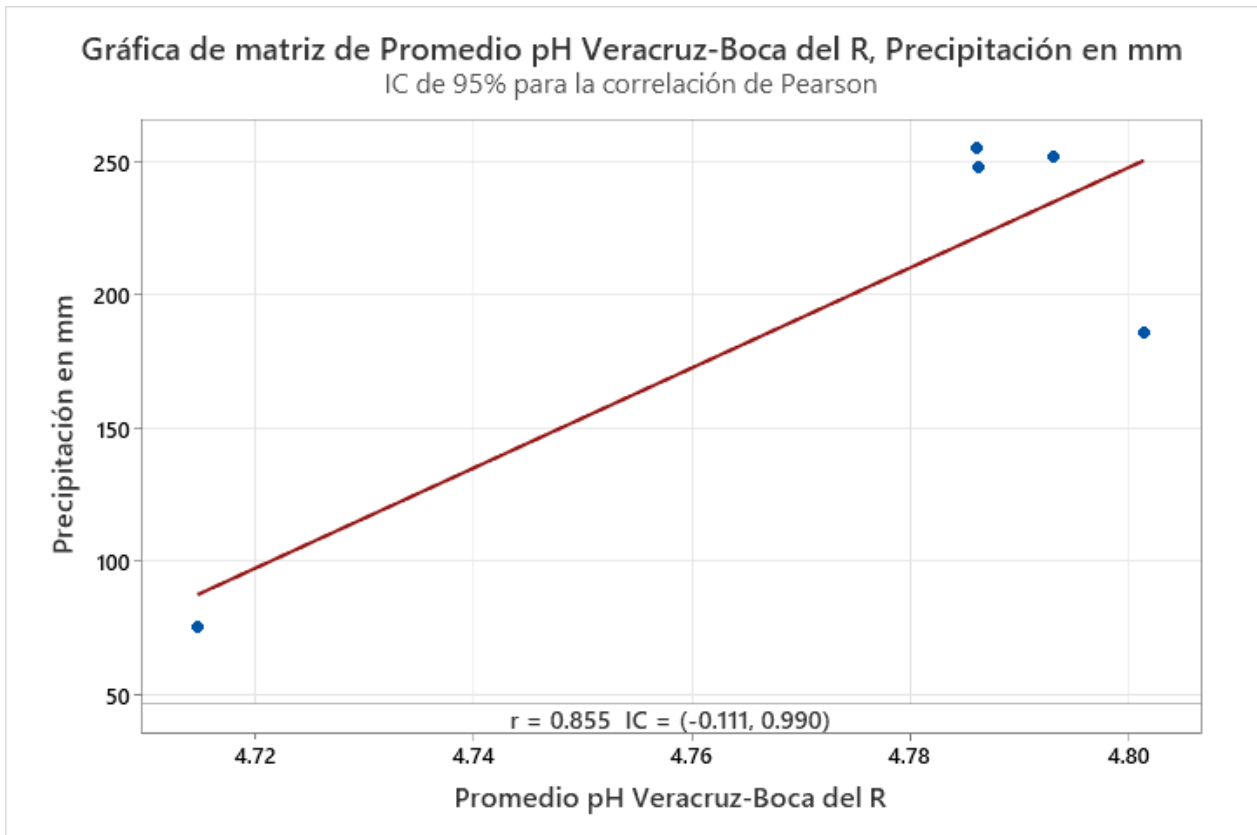


Figura 19. Correlación entre promedio mensual pH Veracruz - Boca del Río y la precipitación en mm

Se realizó una la correlación de niveles de acidez (pH) entre Veracruz y Boca del Río, obteniendo un nivel de significancia (0.855) mayor a 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula, entonces no existe relación lineal estadísticamente significativa, moderada y directamente proporcional entre la precipitación y la acidez en el agua de lluvia, en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río ($r_s = 0.855$, $p > 0.05$).

Por lo tanto, con base a los valores obtenidos el nivel de acidez en el pH de la lluvia no está asociado al nivel en mm de precipitaciones que caen en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río.

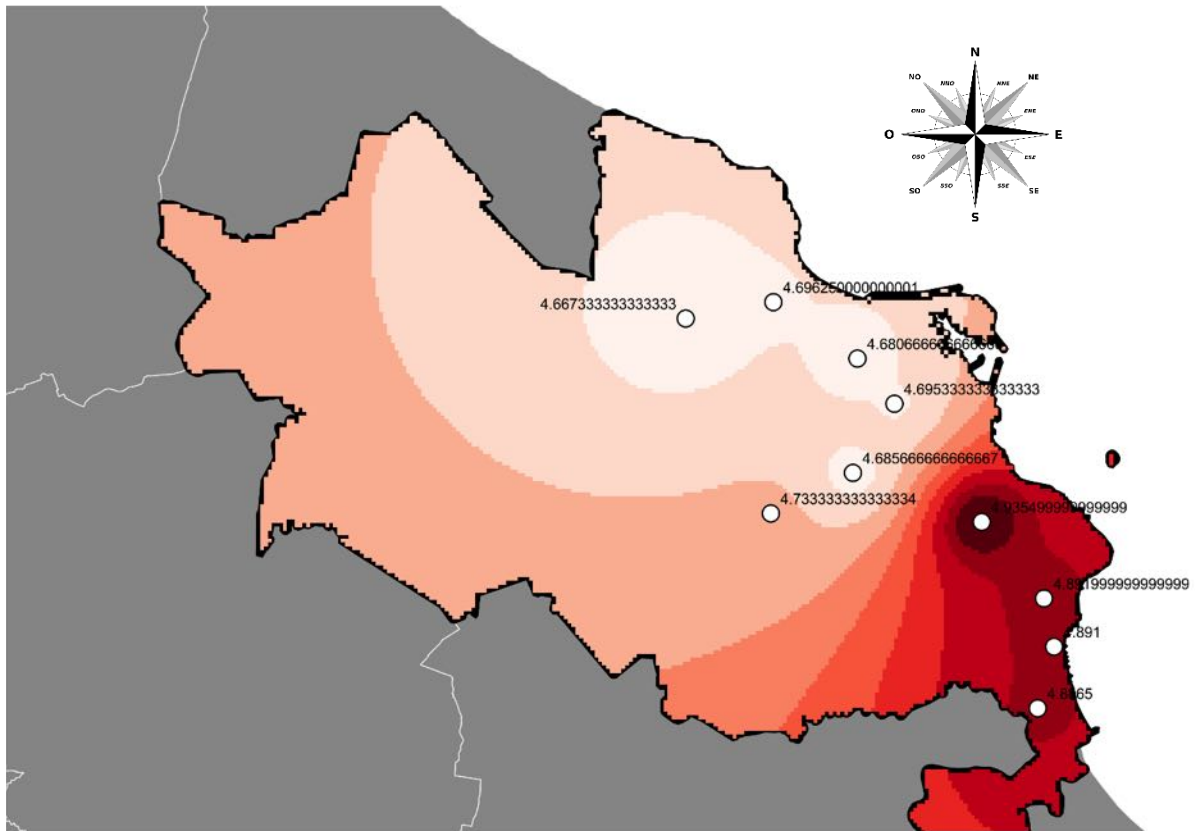


Figura 20. Mapa de calor de nivel de acidez promedio total por sitio

Utilizando el programa QGis versión 3.24.3, se realiza una interpolación con los valores promedios mensuales de cada uno de los sitios para realizar el mapa de calor.

Con ello observamos que las zonas más claras son donde se localiza la mayor concentración de acidez en rangos promedio de 4.663, 4.696 y 4.685. Los colores más oscuros tienen niveles ligeramente menos concentrados de acidez por lo que la lluvia se puede catalogar como ligeramente ácida

De igual manera, se muestran las gráficas por cada sitio, esto debido a las bajas correlaciones positivas y negativas, por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

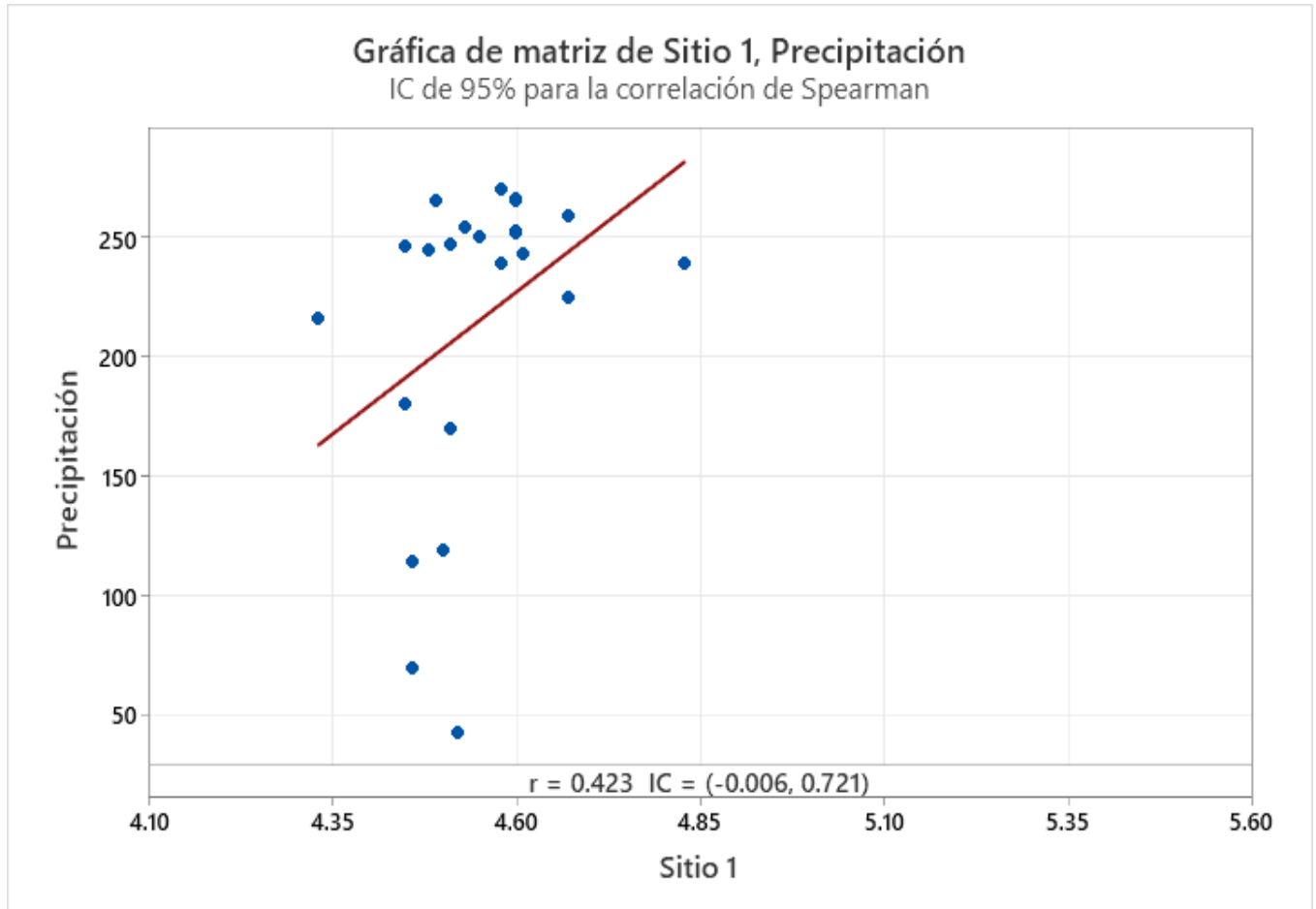


Figura 21. Correlación Precipitación vs pH sitio 1

En el sitio 1, observamos que la correlación es positiva y creciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

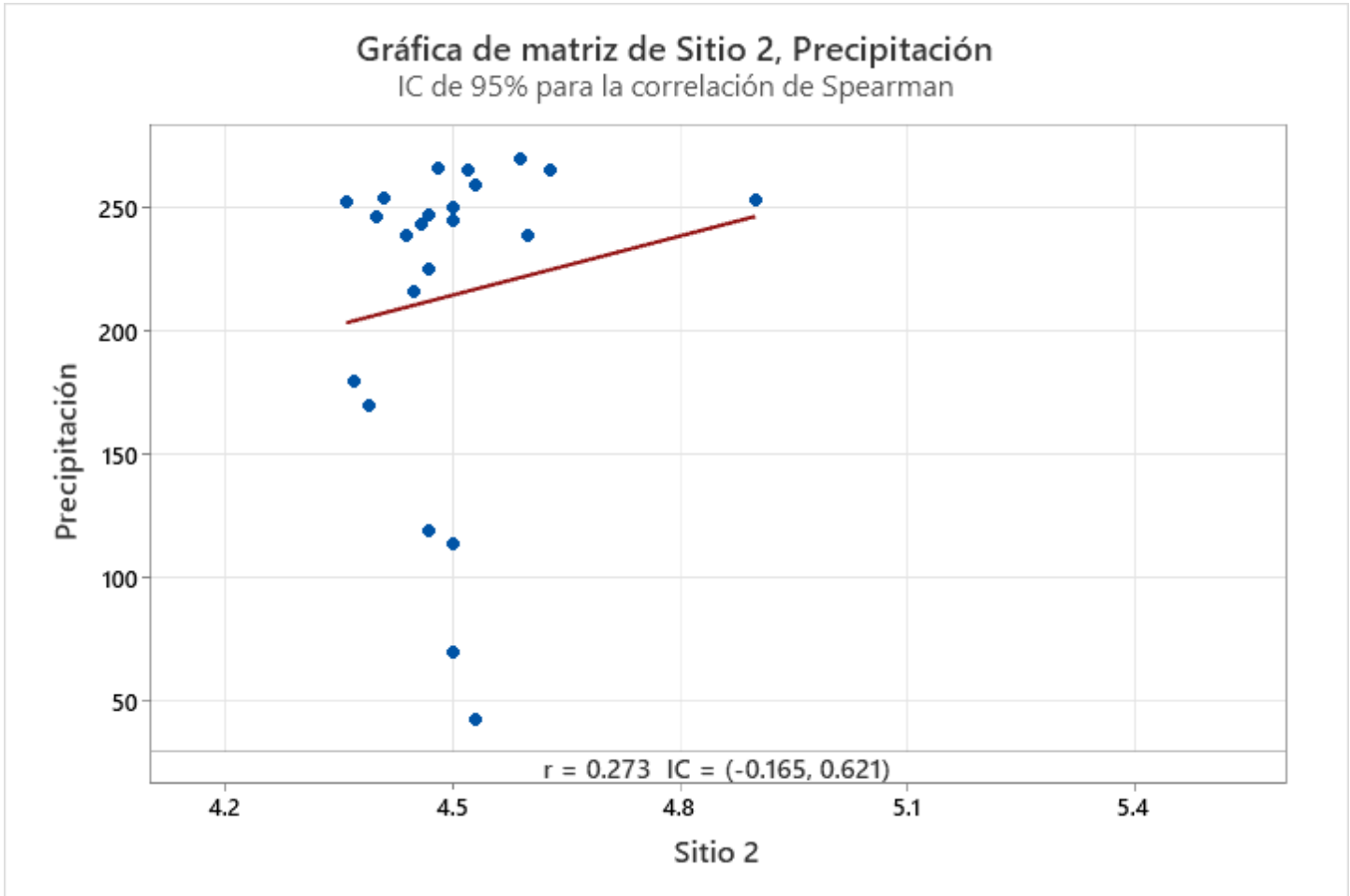


Figura 22. Correlación Precipitación vs pH sitio 2

En el sitio 2, observamos que la correlación es positiva y creciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

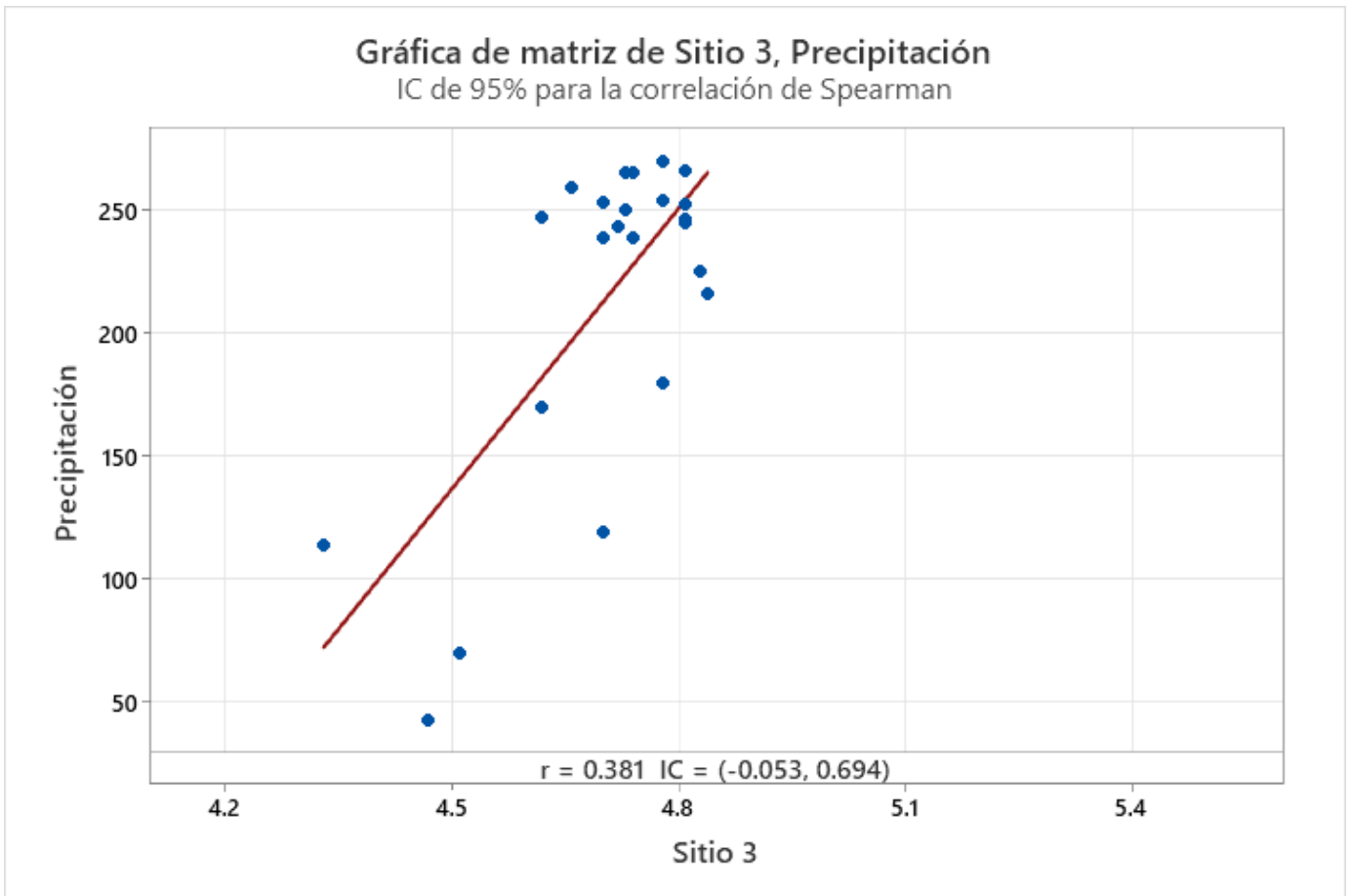


Figura 23. Correlación Precipitación vs pH sitio 3

En el sitio 3, observamos que la correlación es positiva y creciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

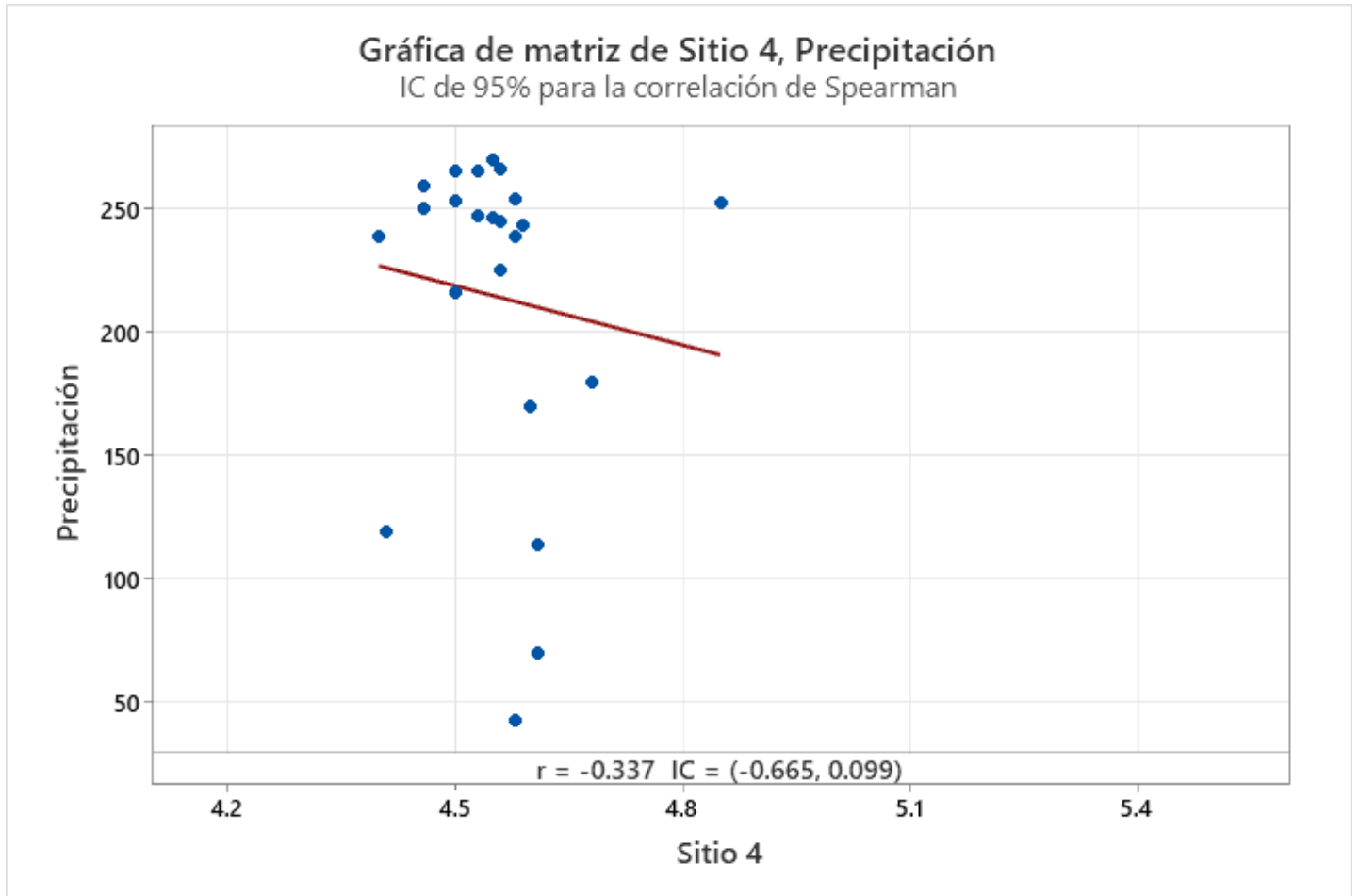


Figura 24. Correlación Precipitación vs pH sitio 4

En el sitio 4, observamos que la correlación es positiva y decreciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

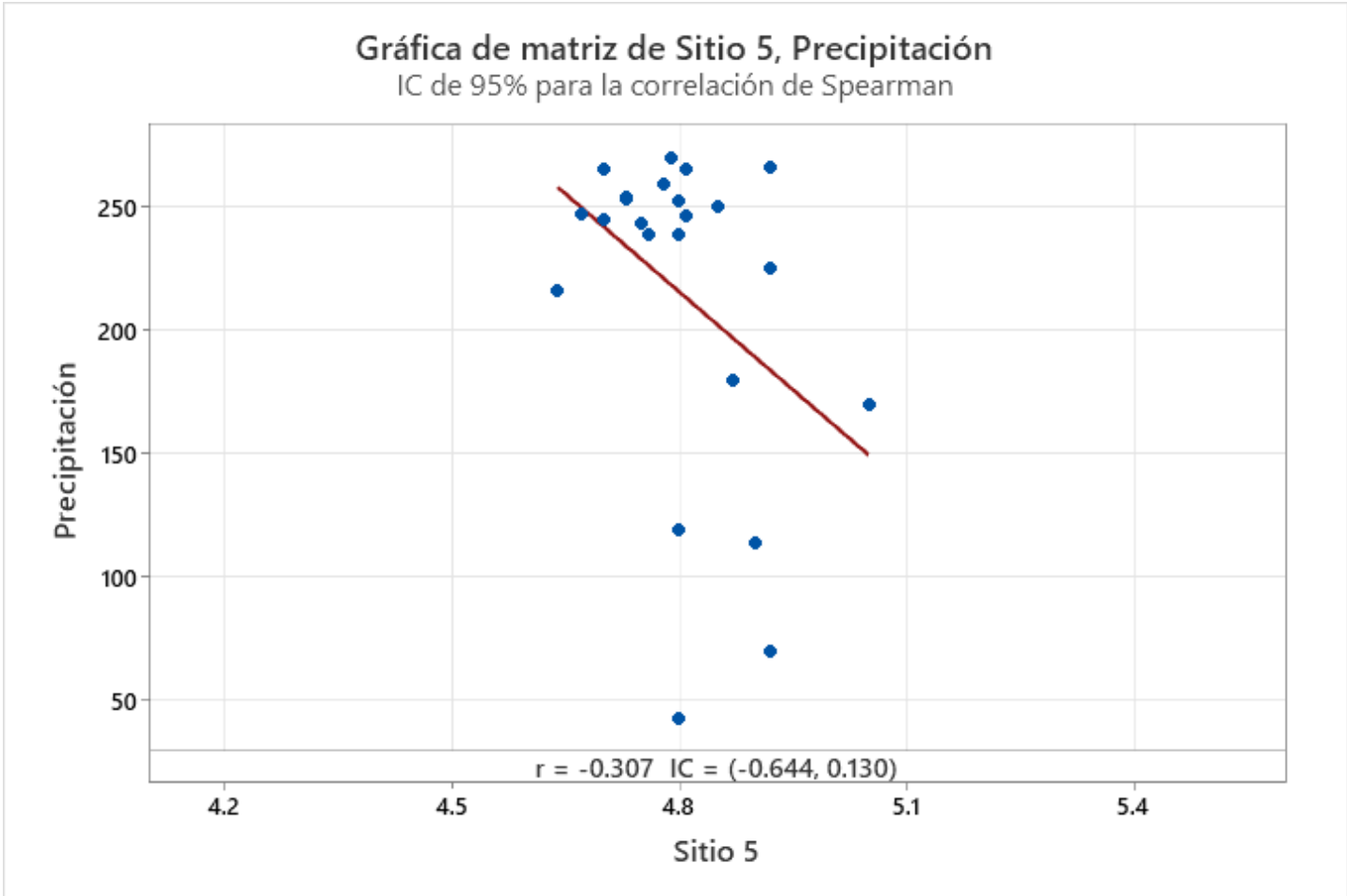


Figura 25. Correlación Precipitación vs pH sitio 5

En el sitio 5, observamos que la correlación es positiva y decreciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

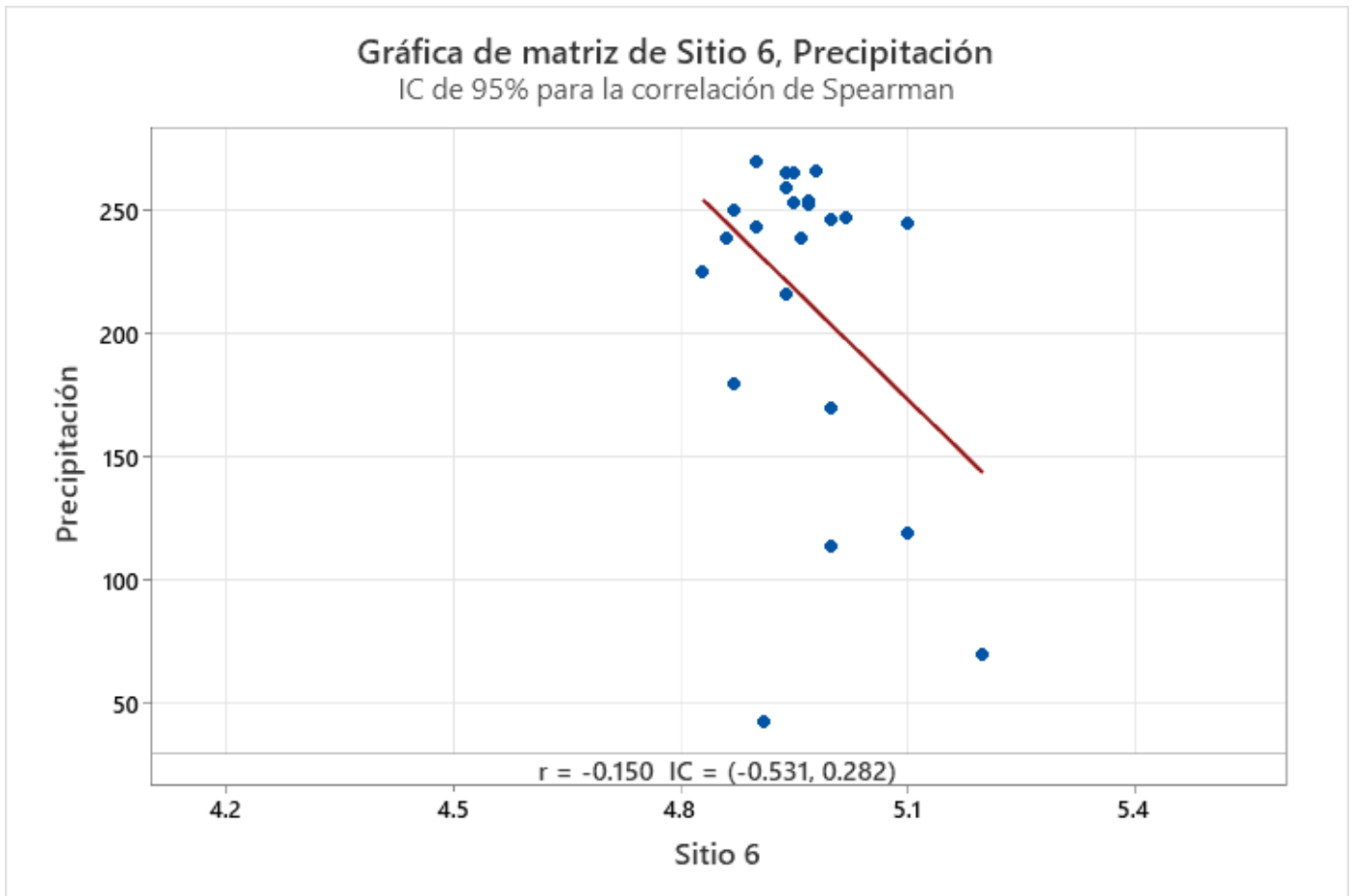


Figura 26. Correlación Precipitación vs pH sitio 6

En el sitio 6, observamos que la correlación es positiva y decreciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

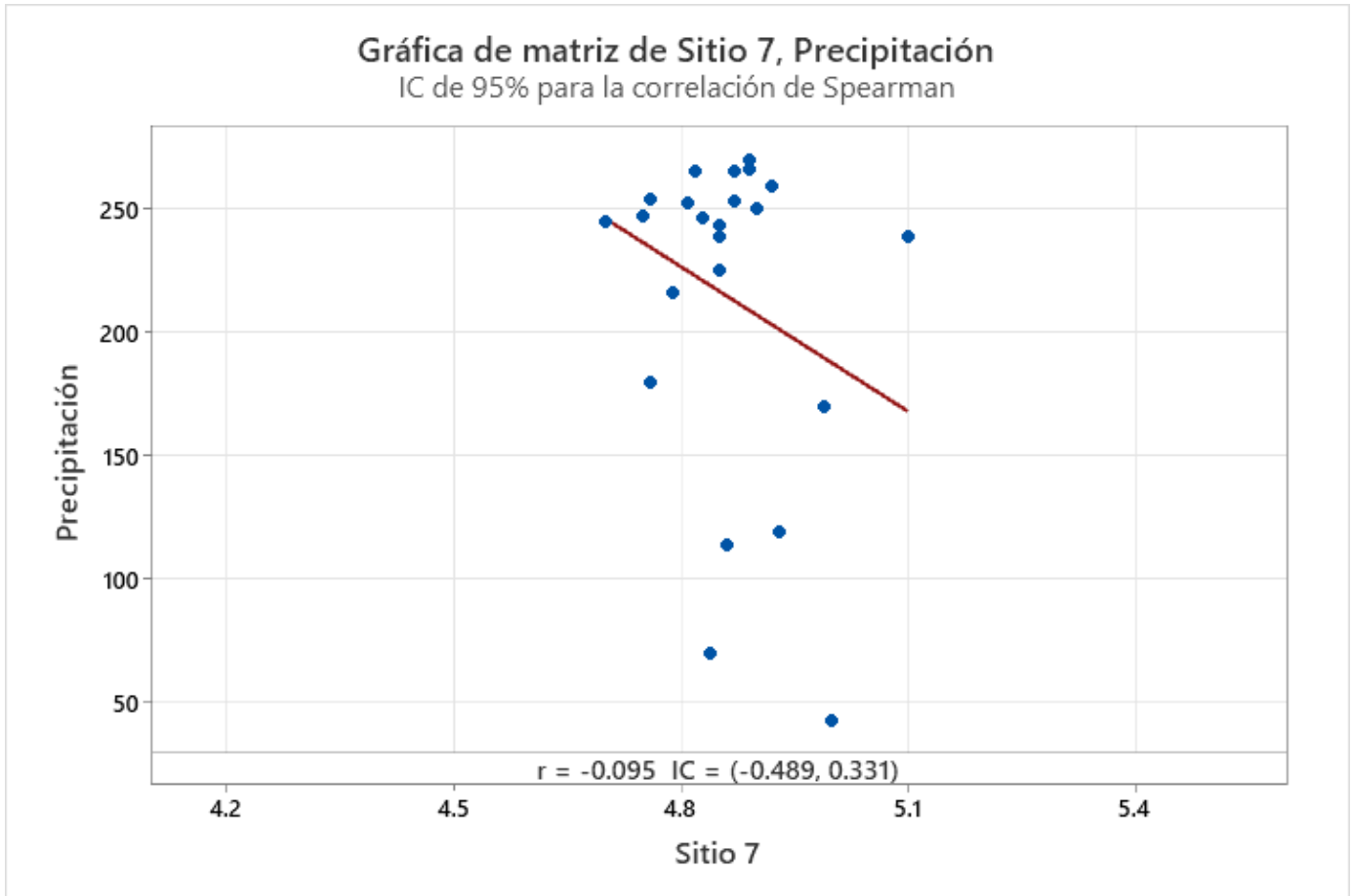


Figura 27. Correlación Precipitación vs pH sitio 7

En el sitio 7, observamos que la correlación es positiva y decreciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

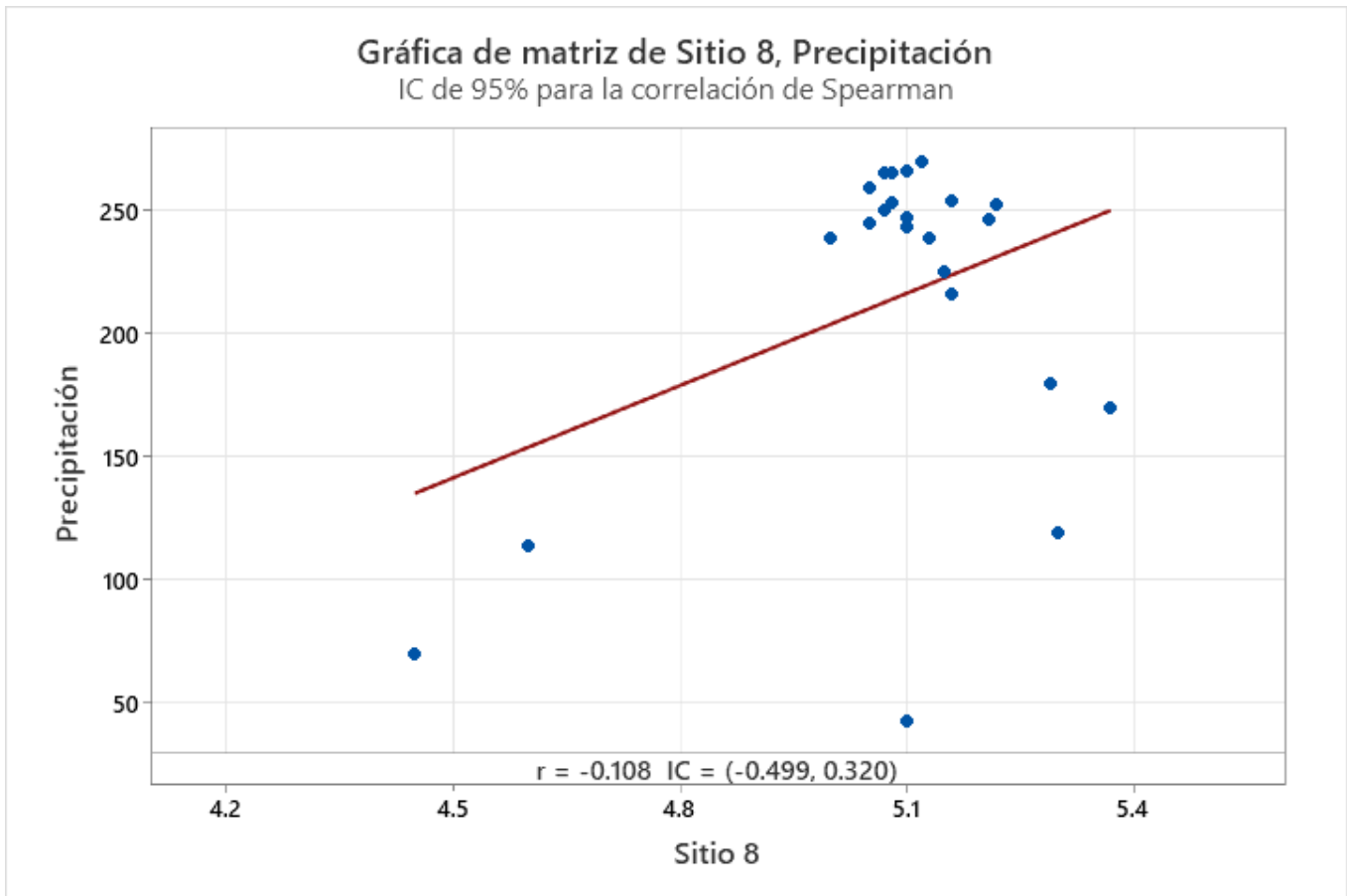


Figura 28. Correlación Precipitación vs pH sitio 8

En el sitio 8, observamos que la correlación es positiva y creciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

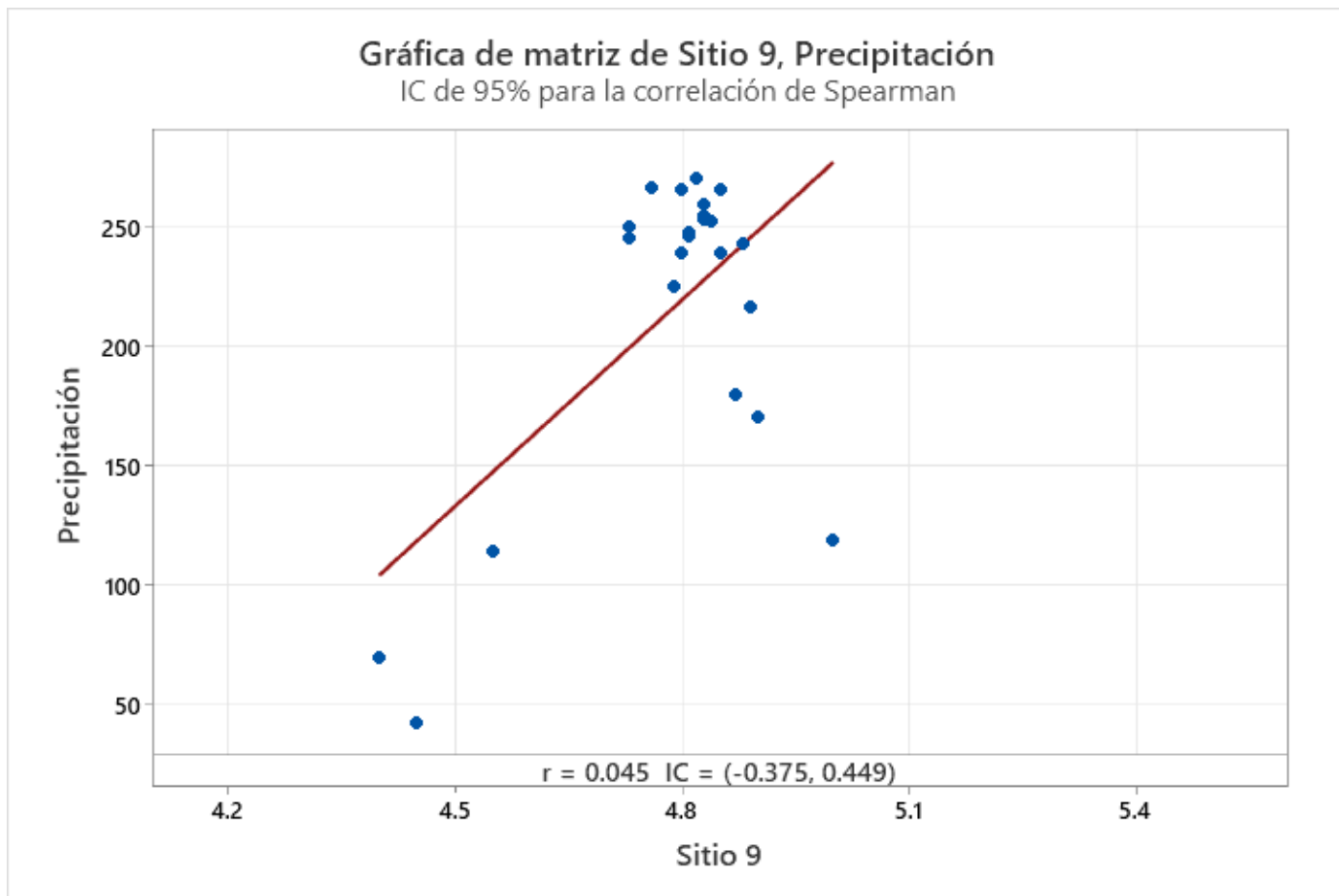


Figura 29. Correlación Precipitación vs pH sitio 9

En el sitio 9, observamos que la correlación es positiva y creciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

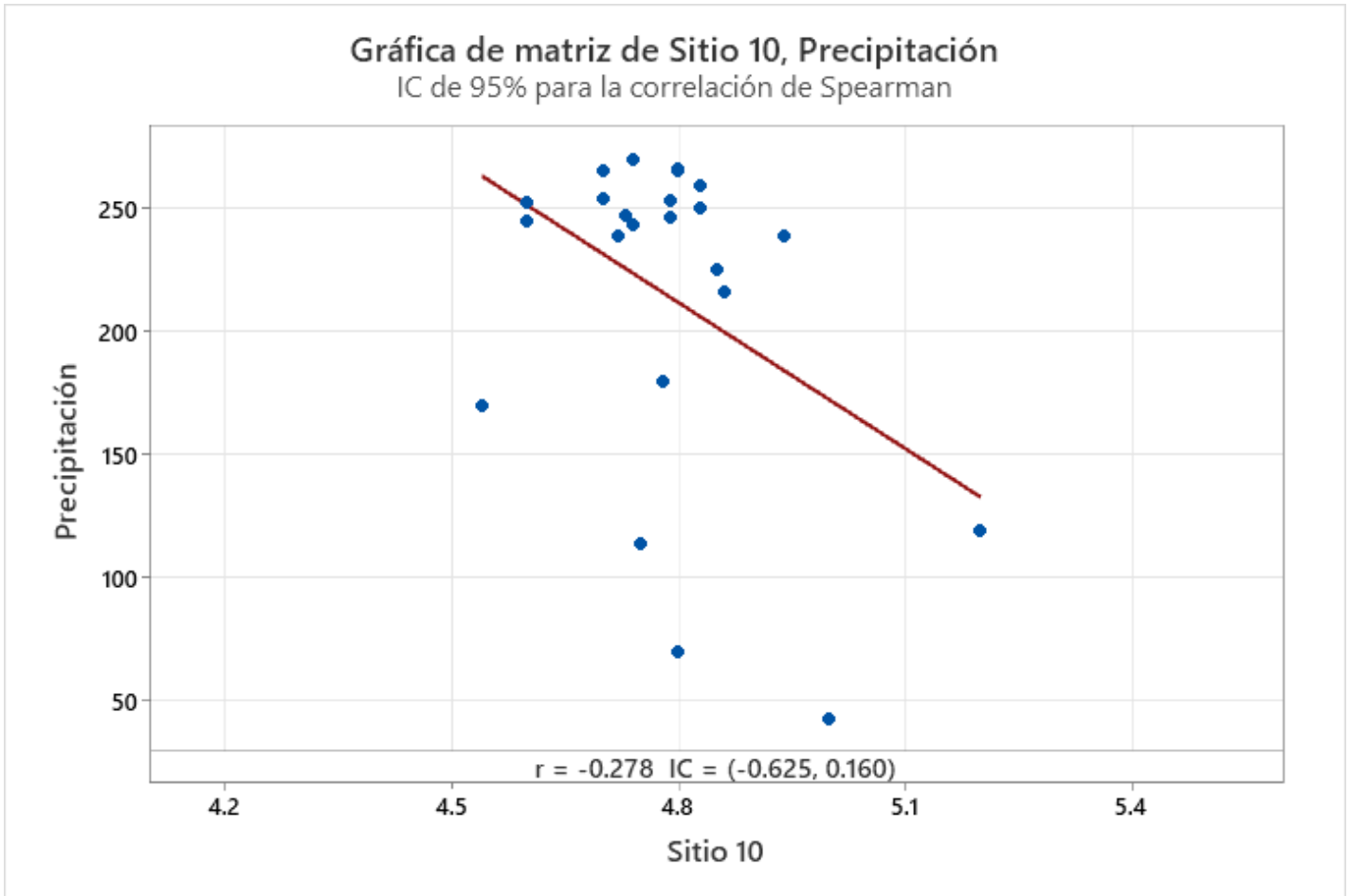


Figura 30. Correlación Precipitación vs pH sitio 10

En el sitio 10, observamos que la correlación es positiva y decreciente, pero con datos atípicos por lo que se deduce que el nivel de precipitación no tiene un efecto o asociación particular en la deposición de la acidez en el pH del agua de lluvia.

Se presenta un diagrama de cajas para los datos de pH obtenidos a través de los 10 sitios y en las 23 semanas de análisis, para esta estadística se realizó un promedio mensual por sitio y posterior a ello, se graficó el diagrama.

La mayoría de las lluvias tienen un pH entre 4.44 y 5.13, pero en algunas ocasiones, tuvo valores de 4.43 a 5.27. No se hallaron valores atípicos. Los valores medios de pH entre los sitios son similares pero los pH de algunos sitios muestran ligeras variables.

Se obtuvo una gráfica de cajas para cada tratamiento donde se observó que, la mediana asimétrica de la concentración entre semana por sitio, los cuartiles uno (Q_1) y tres (Q_3) y el rango intercuartil son los siguientes (Ver cuadro 5).

Cuadro 5. Valores del gráfico de cajas

Variable	Q_1	Q_3	Mediana	Intercuartil	Bigotes en	N
Sitio 1	4.467	4.598	4.578	0.131	4.454, 4.612	5
Sitio 2	4.442	4.552	4.51	0.11	4.436, 4.562	5
Sitio 3	4.58133	4.756	4.744	0.174667	4.43667, 4.762	5
Sitio 4	4.529	4.591	4.55	0.062	4.52, 4.6	5
Sitio 5	4.775	4.84367	4.812	0.686667	4.762, 4.87333	5
Sitio 6	4.922	5.13975	4.964	0.21775	4.898, 5.2775	5
Sitio 7	4.482	4.888	4.486	0.46	4.834, 4.9	5
Sitio 8	4.90433	5.186	5.098	0.281667	4.71667, 5.234	5
Sitio 9	4.63233	4.853	4.82	0.220667	4.46667, 4.878	5
Sitio 10	4.764	4.823	4.784	0.059	4.752, 4.85	5

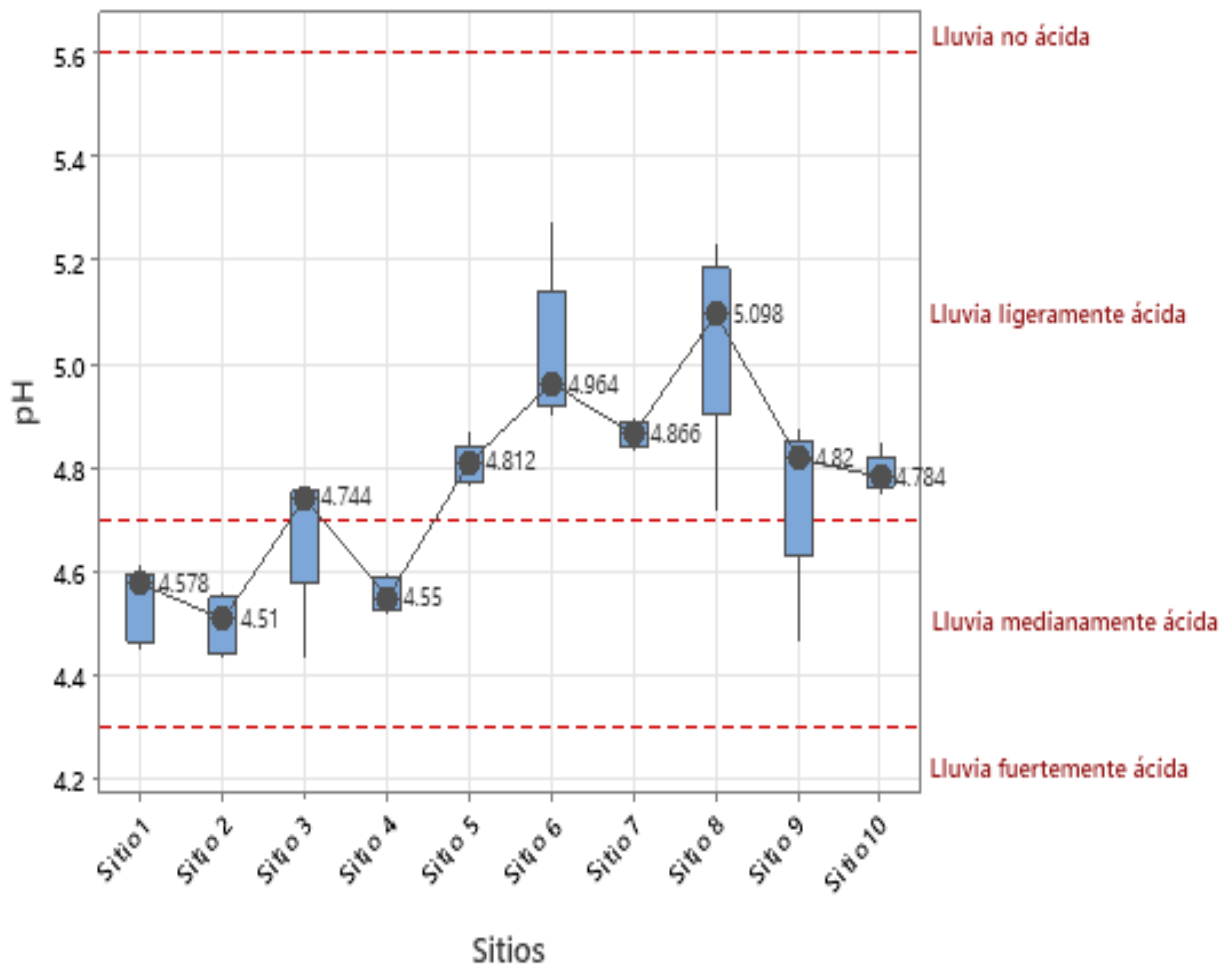


Figura 31. Diagrama de cajas para pH

Los límites en los que se mueve la variable fueron 4.578 y 5.098. No se encontraron valores atípicos. No existen valores atípicos representativos por lo que no fueron tratados.

La figura 30, se muestran los valores de pH promedio mensual de cada 1 de los 10 sitios. De igual manera, como en gráficas anteriores, se muestran los límites donde el agua de lluvia se considera ácida y su nivel.

El pH durante el periodo de estudio, presento niveles de ligeramente a medianamente ácidos, indicándonos en sitios más cercanos a eventos continuos y altos de tráfico rodado, quema de combustibles fósiles e industrias, por lo que los valores en sitios cercanos fueron evidenciados con valores más altos de pH en sus precipitaciones (agua de lluvia).

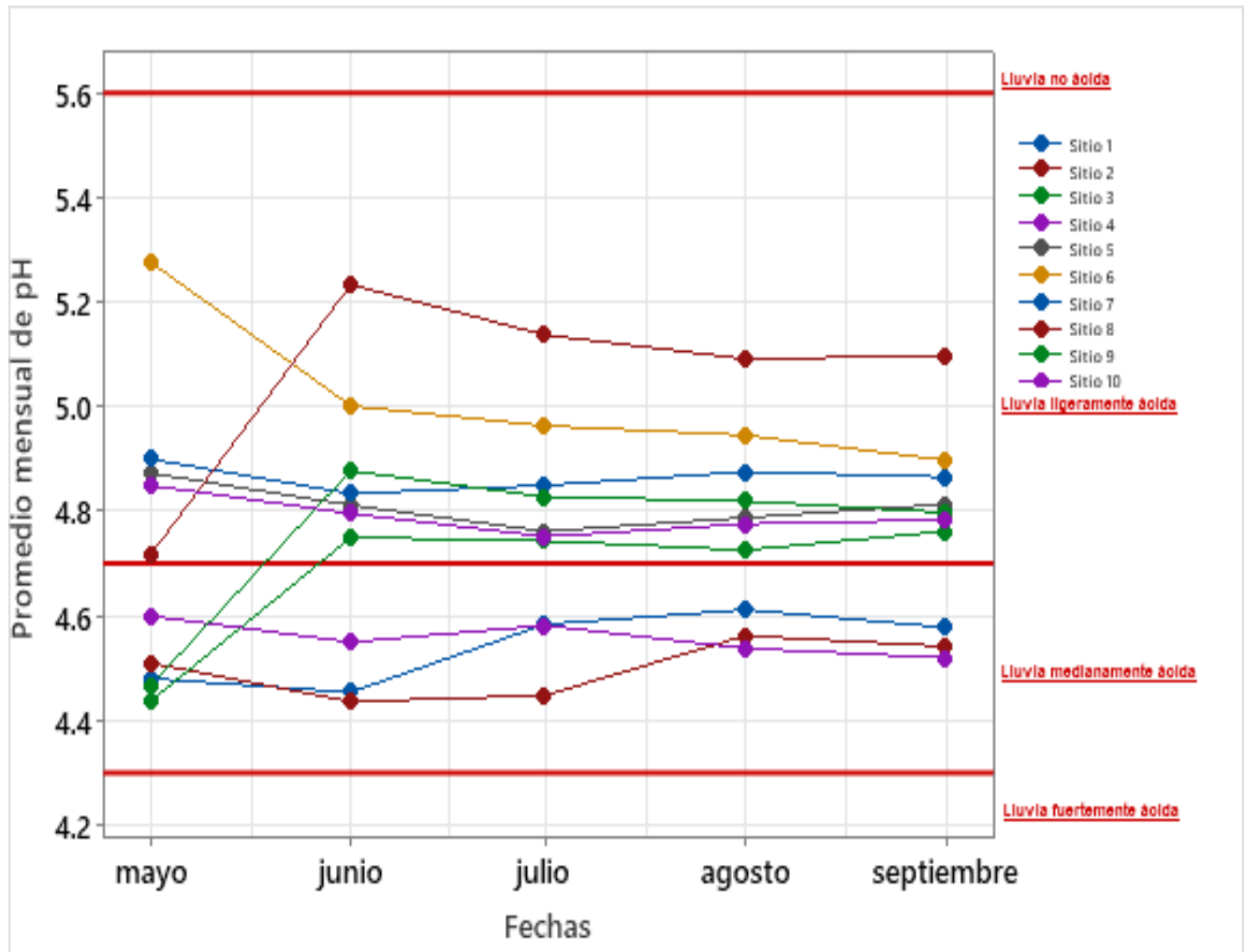


Figura 32. Mediciones promedio mensuales de pH

Las siguientes figuras, muestran el valor promedio semanal de pH por sitio para evidenciar los valores obtenidos.

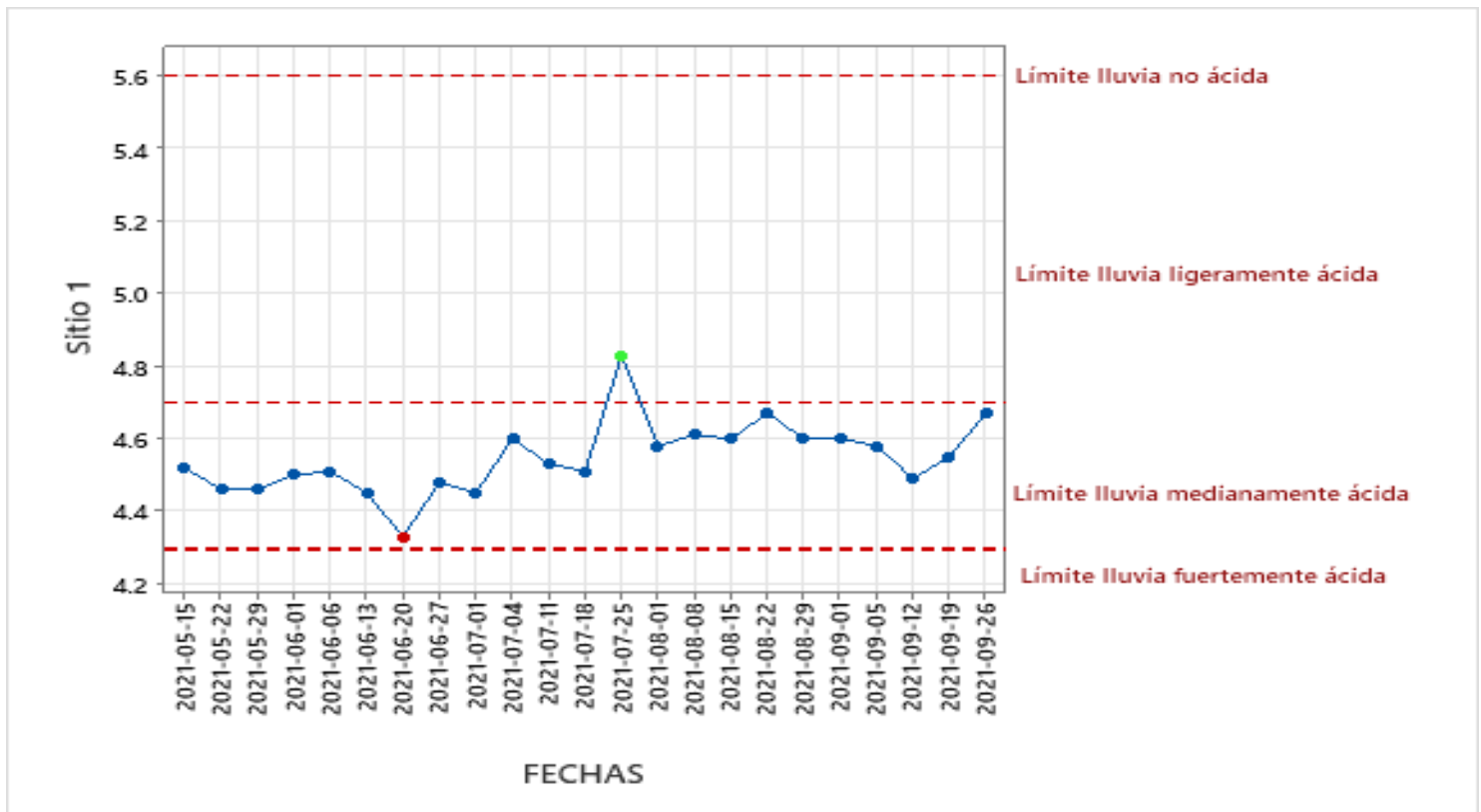


Figura 33. pH promedio semanal sitio 1

El sitio 1, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia fuertemente ácida en su pico más bajo en la tercera semana de junio de 2021 y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la tercera semana de julio de 2021, pero manteniendo un rango medianamente ácido. Es el sitio más cercano a la zona industrial, por lo que se deduce que estos valores pueden ser originados a los gases que liberan las industrias cercanas.

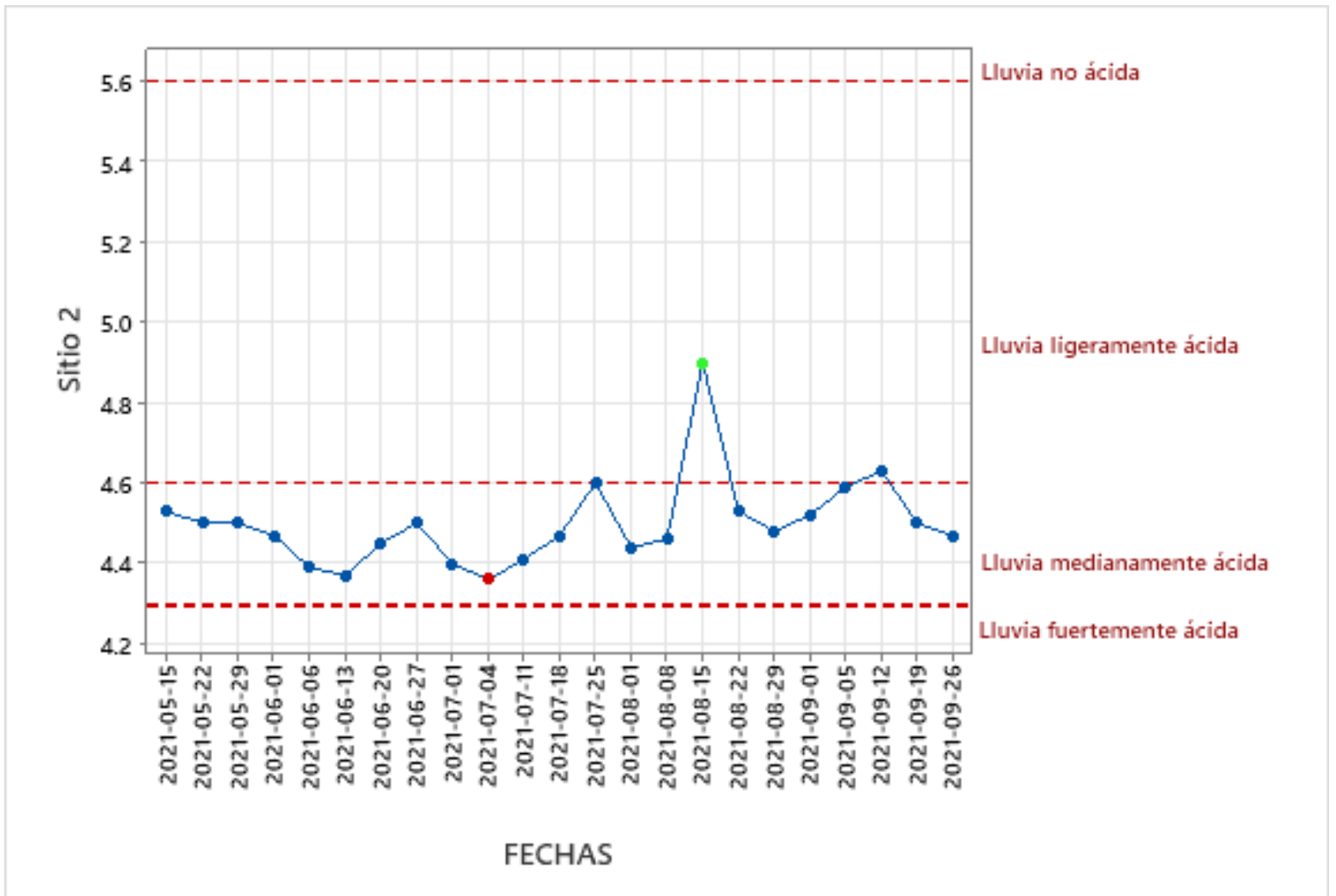


Figura 34. pH promedio semanal sitio 2

El sitio 2, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la primera semana de julio de 2021 y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la segunda semana de agosto 2021, pero manteniendo un rango medianamente ácido.

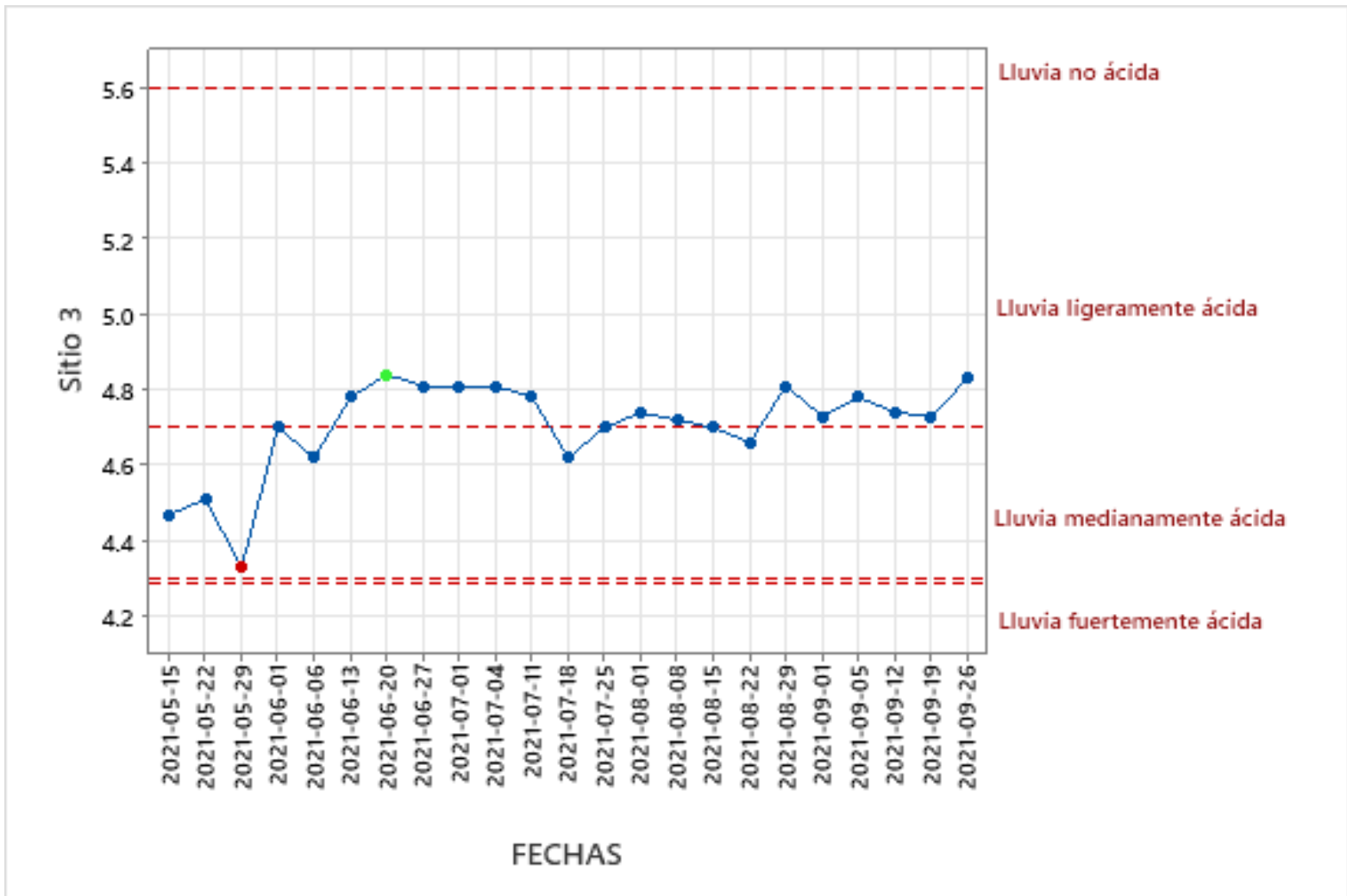


Figura 35. pH promedio semanal sitio 3

El sitio 3, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la segunda semana de mayo y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la segunda semana de julio 2021, pero manteniendo un rango entre ligera y medianamente ácida.

A pesar de estar cercano de igual manera a la zona industrial, es el sitio que se encuentra ligeramente aislado de tráfico rodado, por lo que se deduce que sus tendencias menos ácidas se deben a ello.

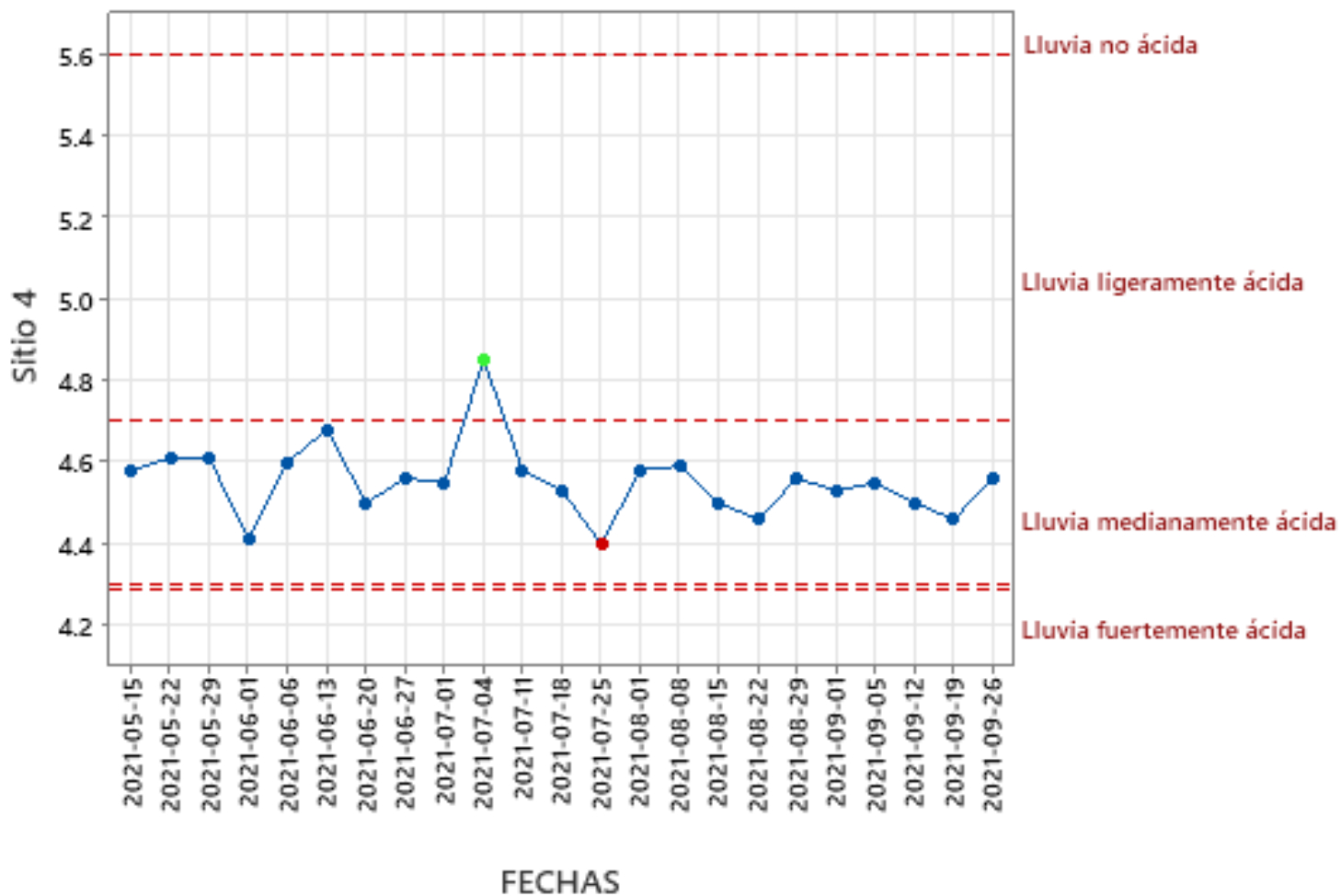


Figura 36. pH promedio semanal sitio 4

El sitio 4, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la tercera semana de julio y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la primera semana de julio de 2021, pero manteniendo un rango medianamente ácido.

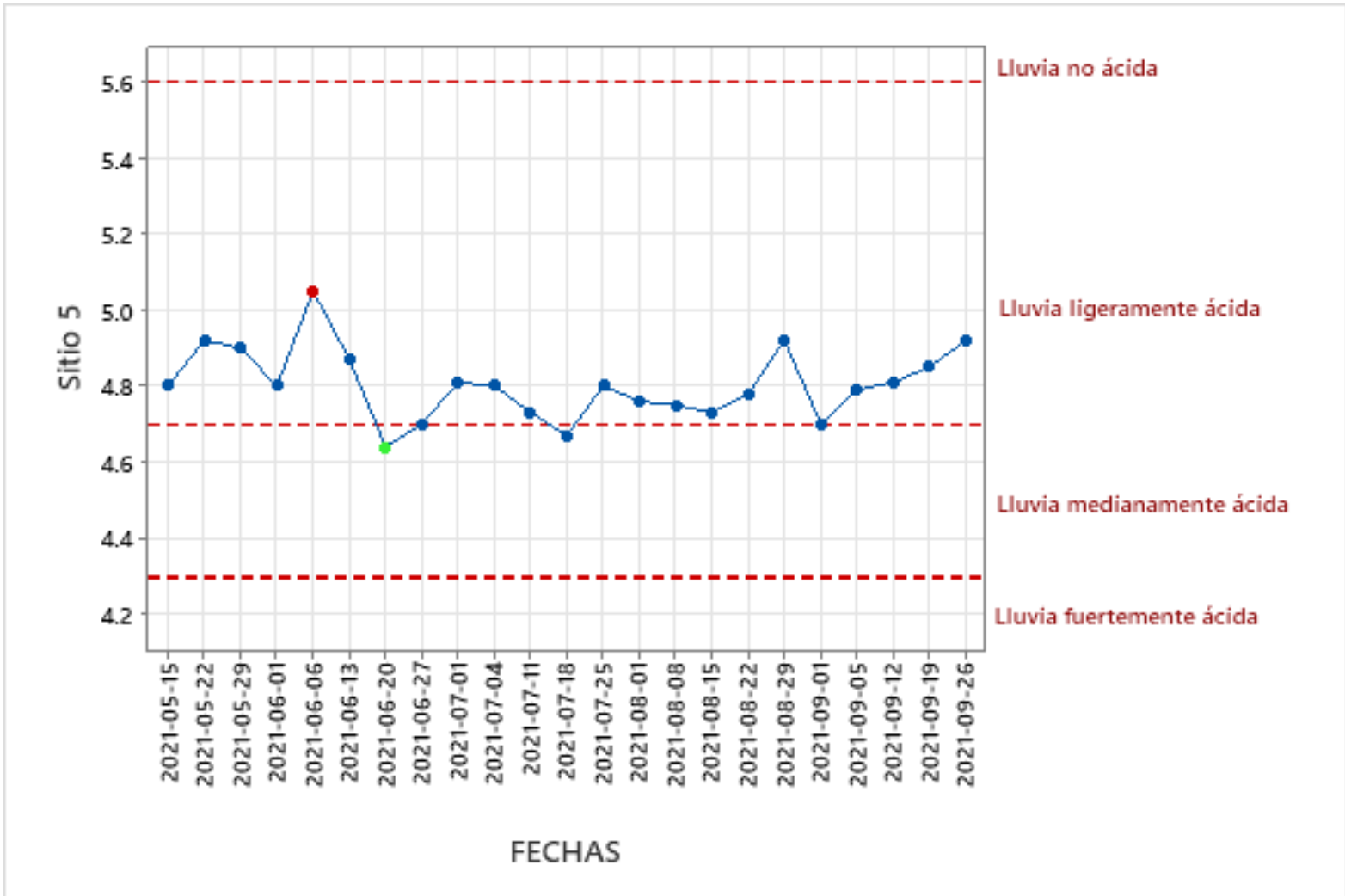


Figura 37. pH promedio semanal sitio 5

El sitio 5, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la segunda semana de junio y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la primera semana de junio de 2021, pero manteniendo un rango ligeramente ácido. Se deduce que, al estar en zona céntrica, alejada de la industria, los niveles de acidez comienzan a ser ligeros.

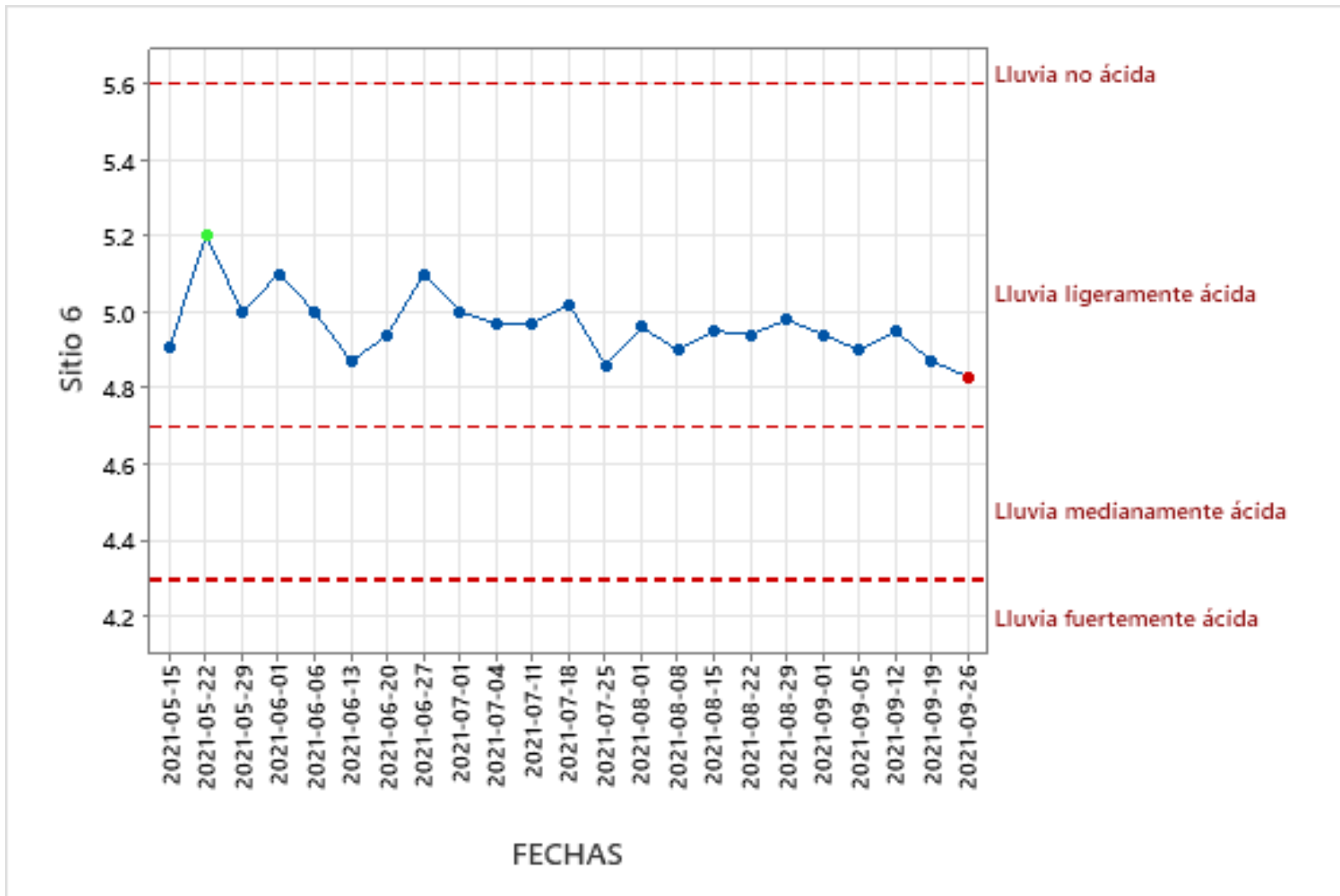


Figura 38. pH promedio semanal sitio 6

El sitio 6, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia ligeramente ácida en su pico más bajo en la tercera semana de septiembre y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la segunda semana de mayo de 2021, pero manteniendo un rango ligeramente ácido. Se deduce que, al estar en zona céntrica, alejada de la industria, los niveles de acidez comienzan a ser ligeros.

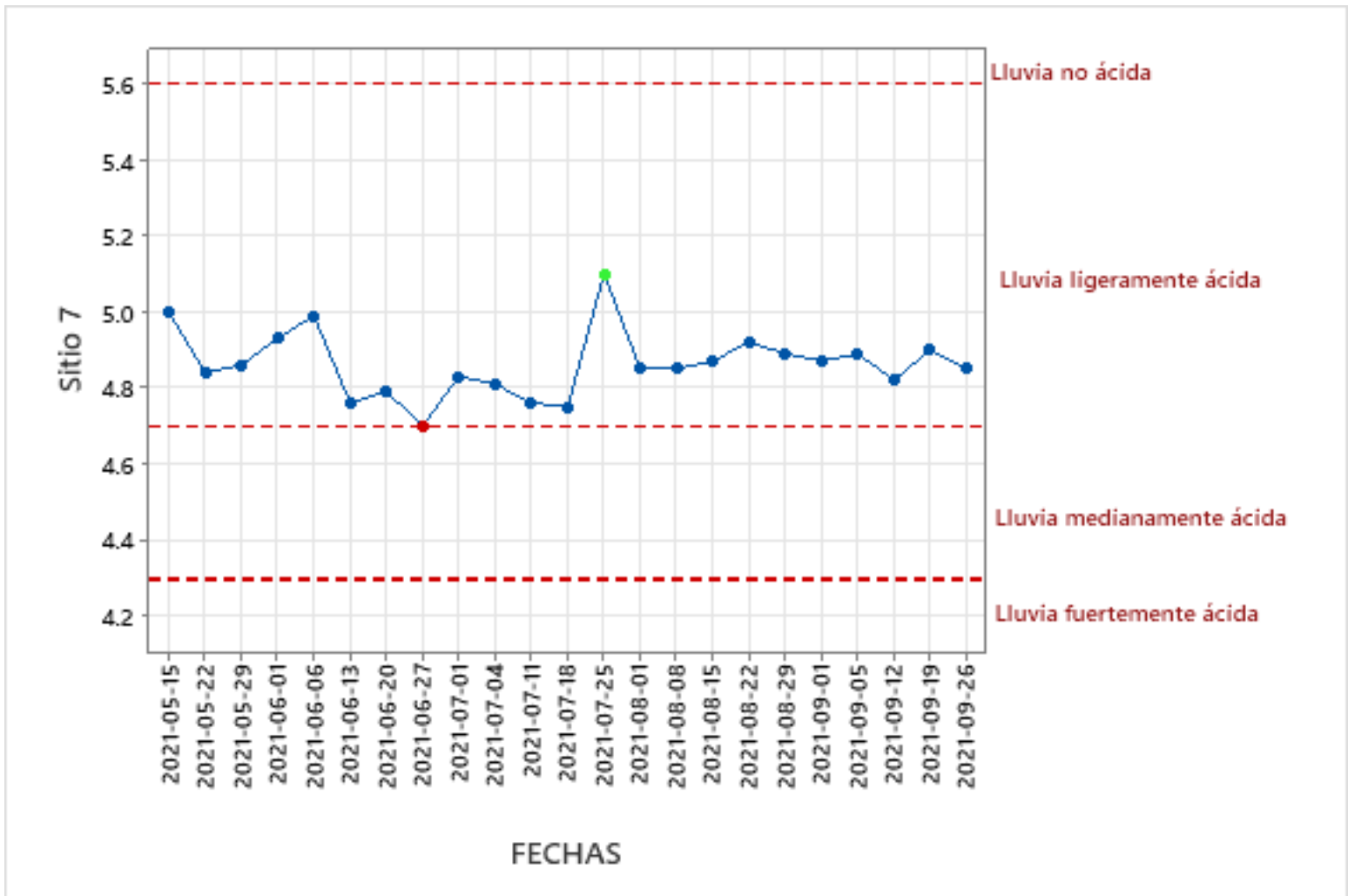


Figura 39. pH promedio semanal sitio 7

El sitio 7, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia ligeramente ácida en su pico más bajo en la segunda semana de junio 2021 y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la tercera semana de julio de 2021, pero manteniendo un rango ligeramente ácido.

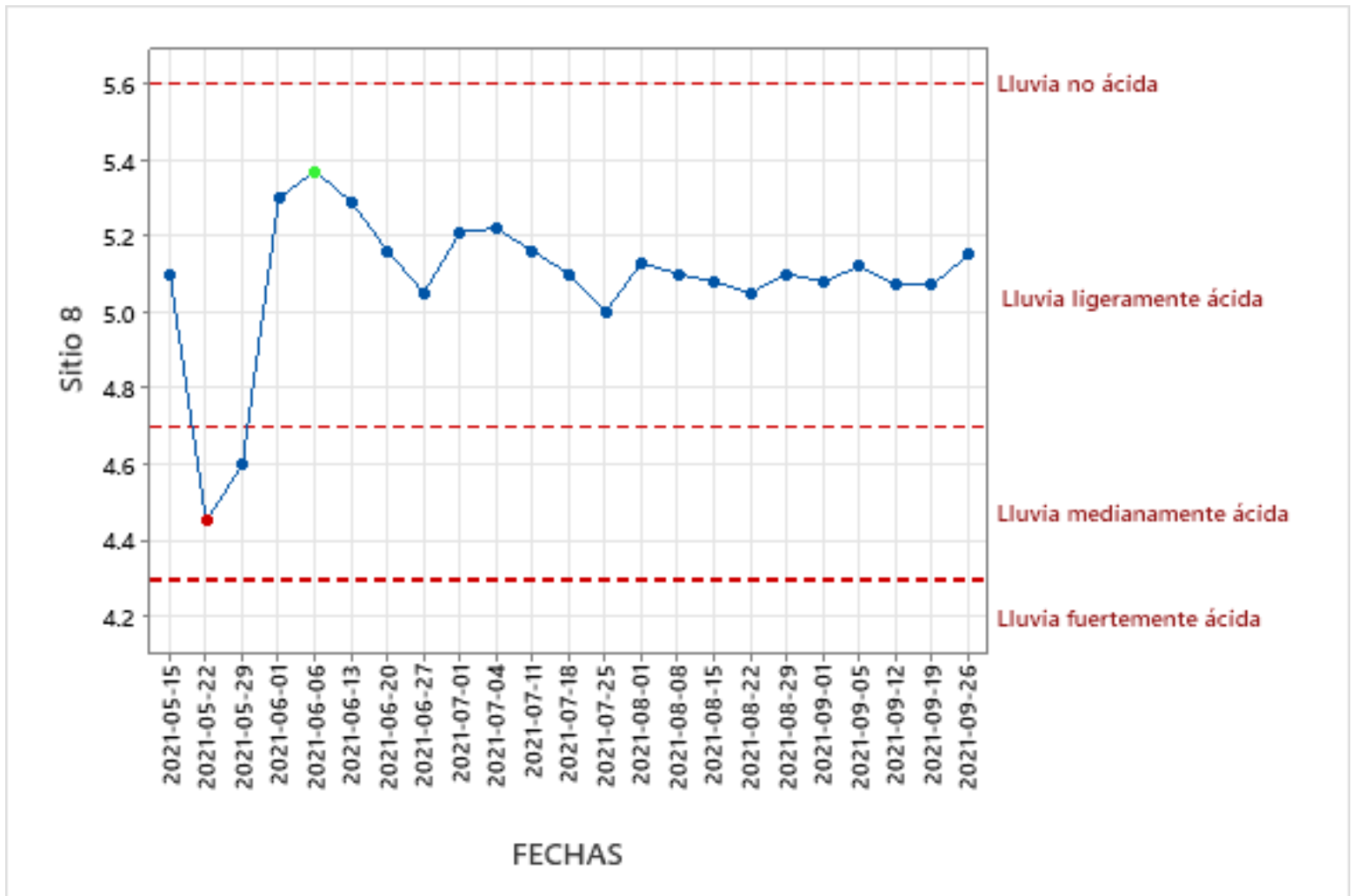


Figura 40. pH promedio semanal sitio 8

El sitio 8, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la tercera semana de mayo 2021 y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la primera semana de junio de 2021, pero manteniendo un rango ligeramente ácido.

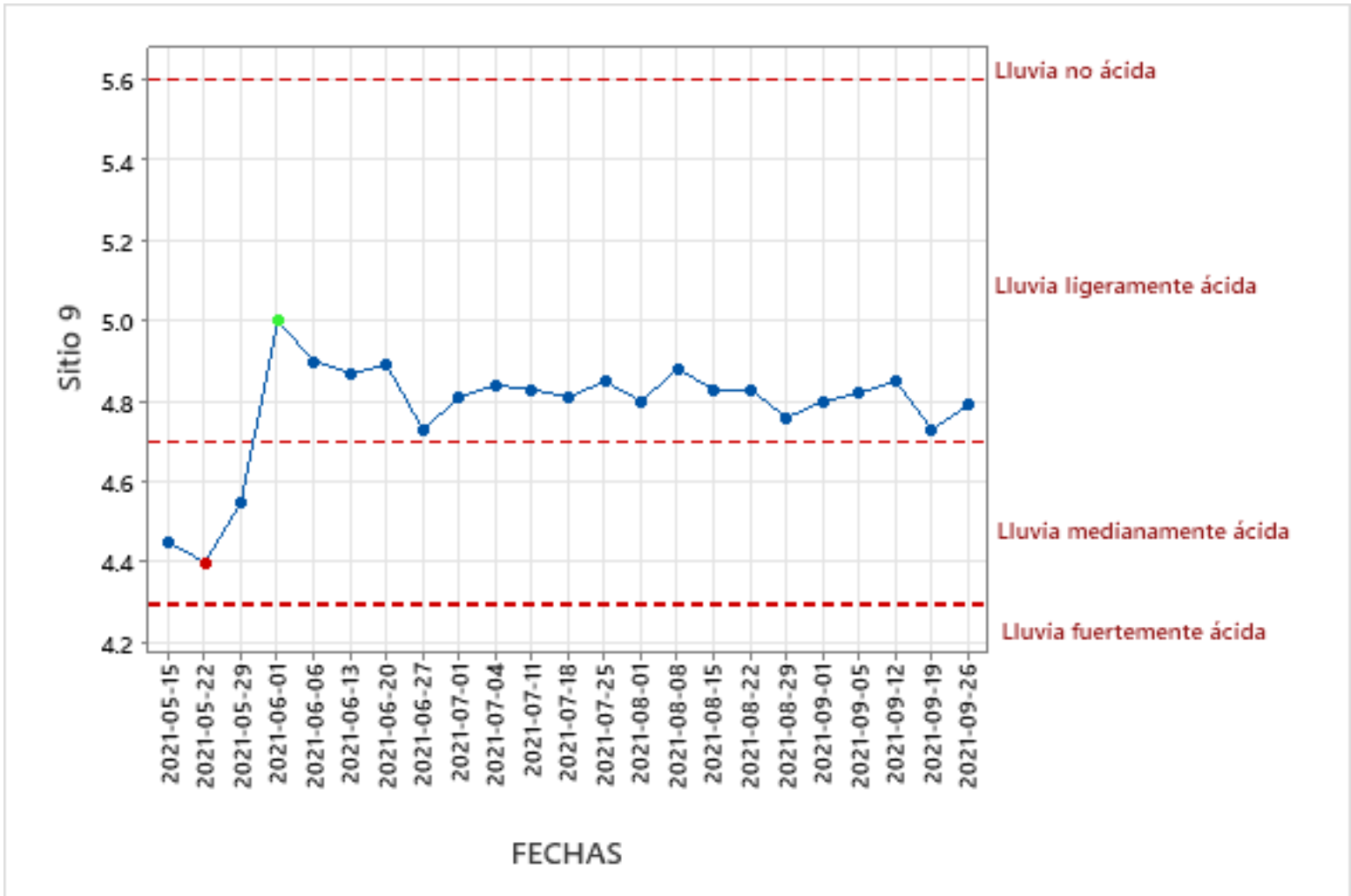


Figura 41. pH promedio semanal sitio 9

El sitio 9, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la tercera semana de mayo 2021 y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la primera semana de junio de 2021, pero manteniendo un rango ligeramente ácido.

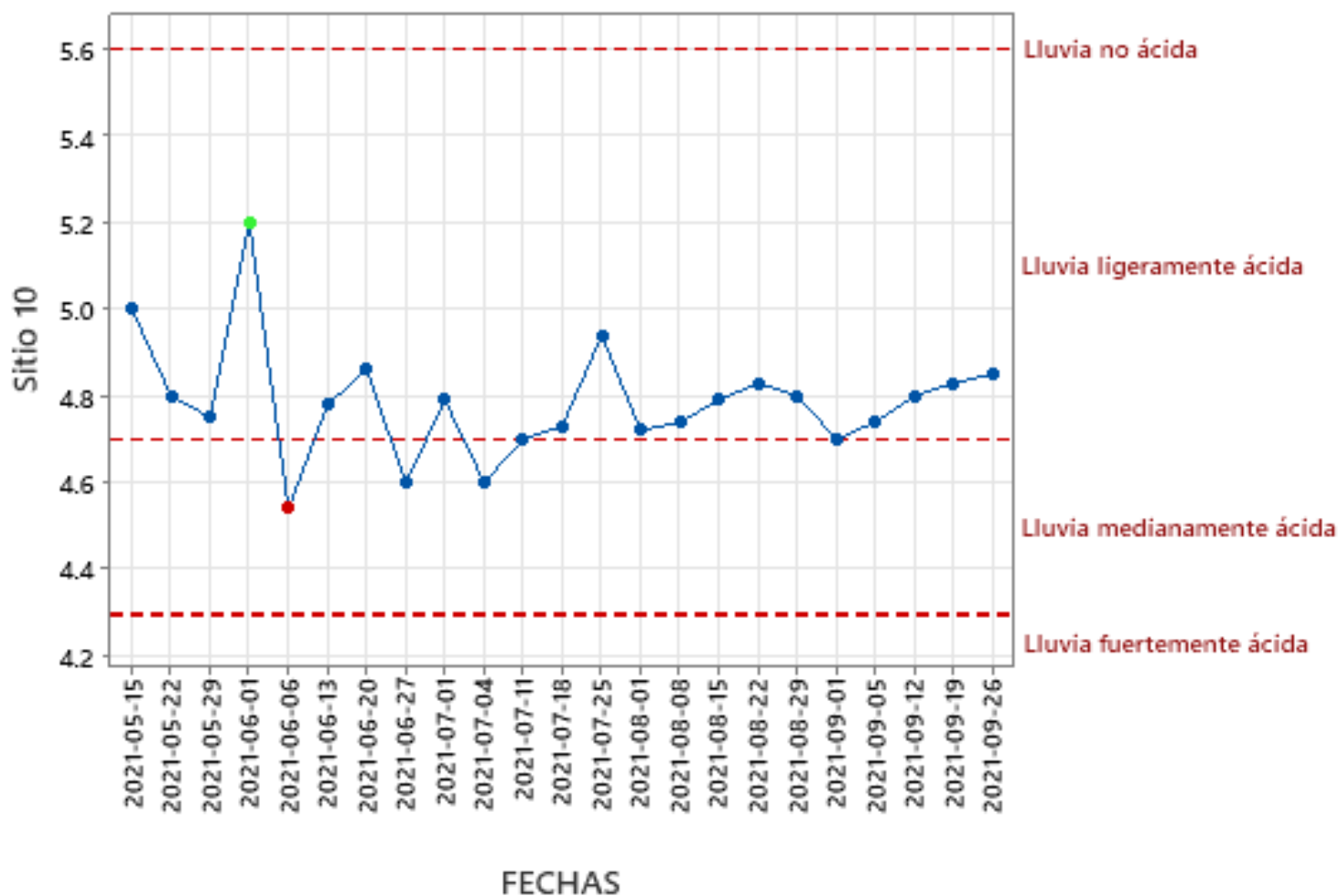


Figura 42. pH promedio semanal sitio 10

El sitio 10, muestra una tendencia en el valor promedio semanal de pH de lluvia medianamente ácida en su pico más bajo en la segunda semana de junio 2021 y lluvia ligeramente ácida con su pico más alto en la primera semana de junio de 2021, pero manteniendo un rango ligeramente ácido.

En el trabajo realizado por Ramírez et al (2010), las muestras de lluvia que se recolectaron en un periodo de Enero a Diciembre en 2007 al Noroeste de Monterrey con un muestreador automático que utilizaba platos de sulfatación, analizando volumen, pH y conductividades, en estas muestras, encontraron que el pH de los eventos de precipitación individuales variaban de 5.44 a 8.5, ambos con valores ácidos y alcalinos, en los registros realizados por el equipo de Ramírez, se observa como las precipitaciones a pesar de tener acidez no muestran indicios de ser lluvia ácida, siendo mayo, junio y agosto, los meses con mayor acidez similar a los meses con mayores acidez presentada en Veracruz – Boca del Río.

Sosa et al. (2018) realizaron un estudio en el periodo de 2003 a 2014, recopilando 759 muestras húmedas y posteriormente analizadas en el laboratorio de la UNAM, localizaron 4 muestreadores en las costas del Golfo de México en zonas como El Tajín, la estación ecológica de La Mancha, el Fuerte de San Juan de Ulúa y la Universidad Veracruzana campus Mocambo. Estos 4 sitios mostraron el fenómeno de lluvia ácida con pH menores a 5.6, siendo El Tajín el sitio con los valores más ácidos.

El pH mostró poca variabilidad en el sitio de La Mancha en los años 2003 a 2014 excepto 2007, 2011, 2013 y 2014, siendo el año 2007, 2008 y 2013 con los valores más bajos. Debido a que los muestreos se hicieron por año, esta fuera de las posibilidades una comparativa mensual como la realizada en el presente trabajo, aunque si podemos relacionar los registros de la mancha con datos cercanos a los obtenidos en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río.

Debido a los pocos trabajos realizados sobre el tema y la casi nula información obtenida con muestreos de hace varios años, es recomendable comenzar a hacer muestreos cada ciclo de lluvias en la zona conurbada para poder comenzar a caracterizar estas precipitaciones, así con ello, conocer cuales son los contaminantes con mayor concentración en la lluvia y cual de ellos es formador de lluvia ácida.

Con esto, la posibilidad de crear planes de mitigación incrementa y el apoyo de parte de la ciudadanía y el gobierno podría ser más grande al momento de la concientización.

9. CONCLUSIONES

Con base a los datos obtenidos, la hipótesis presentada es verdadera, ya que se concluye con los datos analizados durante 23 semanas de muestreo que sí hay acidez en la lluvia en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río, de igual manera, se concluye que el nivel de precipitación (mm) no tiene correlación en la acidez que presenta la lluvia al precipitarse, por lo que no importa si el nivel de lluvia es alto o bajo, esto no representa que el nivel de acidez en pH se eleve.

Conocer las precipitaciones de acidez de pH que existen en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río, ayuda a focalizar los problemas que podrían estar afectando a este fenómeno de lluvia y buscar medidas de mitigación. La evaluación del pH en la zona conurbada Veracruz – Boca del Río, asociadas a las variables climatológicas, a partir de mayo, en cuanto comienza el periodo de lluvias, la acidez en las precipitaciones se hace presente. Por lo anterior, se deduce que el fenómeno de lluvia ácida se encuentra presente en la zona. Los pocos eventos de lluvia comienzan a mediados de mayo, por lo que esto influyó en niveles menos ácidos respecto al comportamiento fisicoquímico del agua de lluvia. Posterior a ello, en junio, comienzan a aumentar los niveles de pH.

En los sitios donde la acidez se presentó de mediana a fuertemente acida, fueron cercanos a la zona industrial donde la mayoría de las empresas emiten los contaminantes de sus procesos mediante las chimeneas, por lo que se revela en los análisis, posiblemente no estén siguiendo las normas oficiales mexicanas establecidas para su emisión al aire.

Desafortunadamente, la falta de estudios en la región y en general en el país sobre lluvia ácida ha sido muy escueta y un campo poco estudiado, por lo que elaborar escenarios de daños en el medio ambiente y la calidad de agua serían especulaciones ya que, para emitir análisis sobre potenciales daños, se necesita más que un periodo de lluvia para establecerlo.

Por otra parte, tenemos que la zona conurbada Veracruz – Boca del Río está en constante expansión y esto, podría ser un factor importante en que los sulfatos, nitritos, entre otros contaminantes, aumenten conforme aumente la población empresarial.

Para finalizar, como se menciona antes, la falta de estudios e información en la región Veracruzana sobre el tema y la poca apertura de las empresas en el revelado de información de

sus emisiones anuales, muy poco puede hacerse para establecer medidas de mitigación, más que informar al gobierno actual para tomar medidas sobre el cumplimiento correcto de las normas oficiales mexicanas que atañen a las empresas en este rubro.

10. RECOMENDACIONES

En la zona conurbada Veracruz – Boca del Rio existen muy pocos estudios que estén analizando constantemente o en temporada de lluvias, el nivel de acidez que existen en las precipitaciones.

Por lo que se tiene un potencial campo de investigación poco explorado para comenzar a profundizar en las causas de la existencia de acidez o incluso en el aumento de estos, también se pueden hacer múltiples estudios para determinar cuáles son los contaminantes presentes en este fenómeno de lluvia ácida y obtener medidas de prevención o contención para evitar que los agentes contaminantes como gases derivados de la industria fósil o el tráfico rodado, terminen condensándose en las nubes y mezcladas con el vapor de agua de la zona costera en la que se encuentra Veracruz – Boca del Rio y pueda así reducirse el fenómeno de lluvia ácida.

Es importante destacar que no es necesario contar con cientos de recolectores con gabinetes de acero como el utilizado en el presente trabajo, existen equipos comerciales disponibles en el mercado actual, que tienen ya tomada una desviación mínima en errores en cuanto a diseño, por lo que sus datos nos arrojarán datos lo más cercanos a los obtenidos en un laboratorio, permitiendo así que se pueda explorar más el campo de la lluvia acida sin necesidad de invertir una gran cantidad de dinero en la creación y montaje de recolectores a lo largo de la zona conurbada.

11. LITERATURA CITADA

- Alcalá, J., Espinosa, M., García, M. E., de la Torre, O., Ramírez, H., Arellano, J., . . . García, F. (2006). Influencia de los contaminantes SO₂ y NO₂ en la formación de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *e-Gnosis*, 1-16.
- Ali-Mohamed, A. Y., & Jaffer, A. H. (2000). Estimation of atmospheric inorganic water-soluble aerosols in the western region of Bahrain by ion chromatography. *Chemosphere: Global Change Science*, 2(1), 85-94.
- Ariza, L. E., Cervantes, J., Cano, I., & Acosta, A. (2013). Mediciones de lluvia ácida en el campus Mocambo-UV y municipio de Boca del Río, Ver. Boca del Río, Veracruz.
- Bagchi, R., & Haddad, P. R. (1986). Contamination sources in the clean-up of samples for inorganic ion analysis. *Journal of Chromatography*, 541-547.
- Balasubramanian, R., Hu, G. P., & Wu, C. D. (2003). Chemical characterization of rainwater at Singapore. *Chemosphere*, 51, 747-755.
- Balasubramanian, R., Victor, R., & Begum, R. (1999). Impact of biomass burning on rainwater acidity and composition in Singapore. *Journal of Geographical Research*, 104(26), 881-890.
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española Salud Pública*, 159-175.
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). IDEAM. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/los-agentes-precursores-de-la-lluvia-acida>
- Benitez, J. (1993). *Process engineering and design for air pollution control*. USA: Prentice-Hall.
- Betancourt, N., Corvo, F., Cuesta, O., Labrador, R., González, M., Pérez, J., . . . Cruz, P. (2002). Influence of SO₂ and NO_x on atmospheric corrosion of steel. *Revista CENIC*, 71-75.
- Bravo, H., Sosa, R., Soto, R., & Sánchez, P. (2003). Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 196-205.
- Bravo, H., Soto, R., Sánchez, R., Alarcón, Luisa, A., & Ruíz, J. (2003). Degradación del material pétreo de la zona arqueológica de El Tajín, Veracruz, México, por efecto de la lluvia ácida. *Revista de la Sociedad Química de México*, 328-330.
- Caldeira, K., & Wickett, M. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 365-365.
- Campell, I. (1977). *Energy and the Atmosphere: a Physical-Chemical Approach*. Gran Bretaña: John Wiley y Sons LTD.
- Carrow, R. N., & Duncan, R. R. (2011). *Best management practices for saline and sodic turfgrass soils: Assessment and reclamation*. Boca Raton: CRC Press.

- Cerón, R. M., Cerón, J. G., Kahl, J., Lara, R. C., Rangel, M., & Rustrían, E. (2018). Influencia potencial de las emisiones y el transporte de N y S en el Valle de Orizaba, Veracruz, México. *Agrociencia*, 653-670.
- Challenger, A., & Caballero, J. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México, pasado, presente y futuro de México*. CONABIO, UNAM: Agrupación Sierra Madre.
- Chandra, P., Venkata, S., & Jayarama, S. (2005). Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Environment*, 39, 999-1008.
- Dupre, B., Seimille, F., Allegre, C. J., & Négrel, P. (1994). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio variation during a rain event. *Atmospheric Environment*, 617-620.
- Espinosa, G., Ilizaliturri, C., González, D., Mejía, J., Nava, A. D., Cuevas, M., & Cilia, G. (2013). *Contaminantes orgánicos persistentes en la cuenca baja del río Coatzacoalcos, Veracruz*. Mérida: UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV.
- Franco, J. F. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. *Revista EAN*, 193-204.
- Galán, D., & Fernández, R. (2006). Implicación de los NO_x en la química atmosférica. *Revista electrónica de medio ambiente UCM*.
- Galloway, J. N., & Cowling, E. B. (1978). The effects of precipitation on aquatic and terrestrial ecosystems: A proposed precipitation chemistry network. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 229-235.
- Gárces, L. F., & Hernández, M. L. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*, 67-72.
- García, J. A., Grutter, M., & Cintora, D. (2007). Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 169-175.
- Granados, D., López, G. F., & Hernández, M. A. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 187-206.
- Higashino, H., Tonooka, Y., Yanagisawa, Y., & Ikeda, Y. (1997). Emission inventory of SO₂, and NO_x in East Asia with grid. *Proceedings of the International Workshop on Unification of Monitoring Protocol of Acid Deposition and d Standardization of Emission Inventory, Tsukuba, Japan*, 124-144.
- Iberdrola, S.A. (S.f.). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/lluvia-acida>
- INEGI. (14 de 05 de 2022). *INEGI Mapas*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?ag=30>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2016*. . Colombia.

- Khan, M. N., & Sarwar, A. (2014). Chemical composition of wet precipitation of air pollutants: A case study in Karachi, Pakistan. *Atmósfera*, 35-46.
- Kirkwood, R. C., & Longley, A. J. (1995). *Clean Technology and the Environment*. Londres: Chapman & Hall.
- Kulshrestha, U. C., Kulshrestha, M. J., Sekar, R., Sastry, G. S., & Vairamani, M. (2003). Chemical characteristics of rainwater at an urban site of south-central India. *Atmospheric Environment*, 3019-3026.
- Lee, J. J., & Weber, D. E. (1982). Effects of sulfuric acid rain on major cation and sulfate concentrations of. *Journal of Environmental Quality*, 57-64.
- Ovando, C. J. (2017). Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos: lluvia ácida. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 5(2), 190-207.
- Padilla, H., Huape, G. A., Padilla, L. L., & Bejar, L. (2016). Degradación de aceros estructurales por lluvia ácida. *11° Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación* (págs. 1-5). Michoacán: CONACYT.
- Paz, F., Hernández, M. J., Sosa, R., & Vélazquez, A. S. (2019). *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Texcoco: Programa Mexicano del Carbono.
- Pereyra, D., & Atzín, J. (1990). Acidez de la lluvia de la ciudad de Xalapa, Veracruz. *Boletín de Vulcanología*, 15-22.
- Ramírez, E., Miranda, R., Gracia, Y., Balderas, I., Bravo, H., Sosa, R., . . . Kahl, J. (2010). Chemical composition of rainwater in Northeastern México. *Atmósfera*, 213-224.
- Romero, M., Diego, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 1-14.
- Sánchez, A. E., López, J. J., Rondón, H. A., & Moreno, L. A. (2010). *Ecologismo*. Obtenido de Influencia del agua en mezclas densas calientes tipo 2 (MDC-2): www.ecologismo.com/2011/09/26/lluvia-acida-2
- SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente en México*,. Ciudad de México. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap5_atmosfera.pdf
- Sosa, R., Bravo, H., Alarcón, A. L., Torres, M. C., Jaimes, M., Sánchez, P., & Granados, E. (2018). Acid rain in a Mexican site on the coast of the Gulf of Mexico. *Atmósfera*, 317-330.
- Stern, A. C. (1976). *Air Pollution; Air Pollutans, Their Transformation and Transport*. USA: Academica Press.
- Tuncel, S. G., & Ungor, S. (1998). Rainwater chemistry in Ankara, Turkey. *Atmospheric Environment*, 30, 2721-2722.
- Vélez, J. J., Valencia, M., Londoño, A., González, C. M., & Mariscal, J. P. (2010). *Contaminación del aire y Lluvia ácida: Diagnóstico del fenómeno para la ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia .

- Verma, M., Fernández, M. E., Tovar, R., Barrera, V., & Sandoval, F. (2002). Determinación de la alcalinidad y especies carbónicas. *Ingeniería hidráulica en México*, 79-88.
- Verma, M., Gutiérrez, S., Aragon, A., Sánchez, D., Fernández, M. E., Tello, E., . . . Sandoval, F. (2015). Determinación de la alcalinidad y especies carbónicas en la lluvia por el método de titulación de Gran. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 79-88.
- Zuluaga, M., Valencia, A. M., & Ortiz, I. C. (2009). Efecto genotóxico y mutagénico de contaminantes atmosféricos. *Medicina UPB*, 33-41.