

Smart Monitoring of Household Composting: An ultra-low-cost IoT-based approach for methane emission reduction in the context of smart cities

Sofía Olivero¹, Alejandro Cifuentes¹, Mauricio Loyola¹

¹Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile

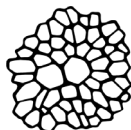
sofia.olivero1@gmail.com; alecifu1699@gmail.com; mauricio.loyola.v@uai.cl

Abstract. Organic waste mismanagement significantly contributes to methane emissions, exacerbating climate change. To address this, many municipalities in Chile promote home composting, yet effectiveness relies heavily on proper management. This study proposes an IoT-based low-cost monitoring system to distinguish correct composting practices from improper ones. Two smart composters were monitored over two months using sensors measuring temperature, humidity, and gas concentrations. One composter was properly managed, while the other intentionally received inappropriate materials. Statistical analyses (Mann-Whitney U, Shapiro-Wilk, PELT) revealed significant differences in temperature stability, humidity balance, and gas emissions between the composters, particularly following misuse. Key findings included identifying clear statistical thresholds for early detection of improper compost management. Results demonstrate that continuous, sensor-based monitoring effectively differentiates between proper and improper composting, providing a robust basis for scalable IoT systems that enhance composting efficiency, promote sustainable practices, and reduce greenhouse gas emissions.

Keywords: Composting, Environmental monitoring, Smart sensors, Smart Cities

1 Introducción

Para combatir el cambio climático, una de las principales estrategias clave es la reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Entre ellos, el metano (CH₄) tiene alta prioridad, pues su potencial de calentamiento global es 84 veces mayor que el CO₂ en 20 años (IPCC, 2021). Las principales fuentes de metano son la actividad ganadera y la descomposición de residuos orgánicos en vertederos. En Chile, aproximadamente el 60% de los residuos domiciliarios corresponden a desechos orgánicos, principalmente restos de comida, que



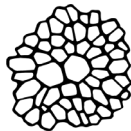
terminan en vertederos generando alrededor de 15.000 kt CO₂eq de emisiones significativas de metano anuales (Chile Sin Basura, 2023; Ministerio del Medio Ambiente, 2020; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN], 2023).

Para mitigar este impacto ambiental, el Ministerio del Medio Ambiente de Chile elaboró una Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO) que propone una serie de acciones para llegar a la meta de reciclar el 66% de los residuos orgánicos generados a nivel municipal el año 2040 (Ministerio del Medio Ambiente, 2020). Uno de los actores más protagónico de esta estrategia son las municipalidades (gobiernos locales comunales), a través de campañas locales de incentivo al reciclaje y compostaje domiciliario.

Diversas municipalidades, como Puente Alto, La Florida, Peñalolén y Santiago, ya han comenzado a desarrollar programas de incentivo al compostaje domiciliario, proporcionando kits de compostaje a los vecinos. Hasta febrero de 2025, se han distribuido más de 5.000 kits (Fundación Chile, 2024). Sin embargo, el éxito del compostaje domiciliario depende de un manejo adecuado de los residuos. Las composteras necesitan ser aireadas regularmente y mantener un equilibrio adecuado entre material “verde”, ricos en nitrógeno, y material seco o “café”, ricos en carbono, para que la humedad esté controlada y la descomposición sea efectiva (Programa Reciclo Orgánicos, 2019). De hecho, un compostaje mal realizado no solo es inefectivo, sino que puede generar condiciones anaeróbicas que incluso incrementan la producción de metano. Por ello, un aspecto crucial de los programas de compostaje ha sido el monitoreo del uso de las composteras a través de visitas domiciliarias de supervisores municipales. No obstante, esta estrategia uno-a-uno es intensiva en recursos humanos, muy costosa y vuelve inviable el programa a gran escala.

Este trabajo propone una alternativa basada en el uso de tecnologías de sensorización, IoT y técnicas análisis de datos para realizar monitoreo remoto automatizado del uso de las composteras, y así, facilitar la supervisión del programa a gran escala. En particular, el trabajo propone averiguar la factibilidad técnica de desarrollar un sistema basado en componentes de bajo costo (*ultra low-cost*) pero con suficiente confiabilidad y capacidad operativa como para escalarse a nivel comunal. El proyecto está enmarcado directamente en los principios de las ciudades inteligentes (*smart cities*), al integrar tecnologías digitales y diseño de sistemas para mejorar la sostenibilidad ambiental, la gestión municipal y la toma de decisiones basadas en datos (Batty et al., 2012).

Este artículo muestra los resultados de la primera fase investigativa de este proyecto. El diseño y prototipado del sistema de sensorización y su validación técnica como sistema de monitoreo escalable a nivel comunal.



después de la introducción del material inadecuado en la compostera “deficiente”.

2.3 Análisis estadístico

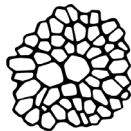
Se desarrollaron tres niveles de análisis estadístico con el objetivo de evaluar tanto tendencias generales como patrones temporales y puntos críticos de cambio que evidenciaran el uso correcto o incorrecto de las composteras.

Análisis general: Se calcularon estadísticas descriptivas básicas (media, mediana, desviación estándar, percentiles) para todo el período y para cada uno de los dos subperíodos: antes y después de la introducción de material inadecuado en la compostera “deficiente”. Este primer análisis permitió identificar cambios significativos y diferencias globales en las variables entre composteras y períodos.

Análisis semanal mediante medias móviles y varianza: Para captar la dinámica temporal y reducir el ruido en las señales, se aplicó una media móvil semanal (ventana de 168 horas) que suavizó las series de tiempo de temperatura, humedad y gases. Junto a esto, se calculó la desviación estándar móvil para estimar la variabilidad local en el tiempo. Este enfoque facilitó la visualización de tendencias sostenidas y episodios de inestabilidad que pueden estar asociados a eventos específicos en el manejo del compostaje.

Análisis avanzado: detección de puntos de cambio y pruebas estadísticas: Se utilizó la técnica de detección de rupturas en series temporales mediante el algoritmo PELT (*Pruned Exact Linear Time*) un método exacto que minimiza una función de coste penalizada y que ofrece complejidad computacional lineal en el número de observaciones (Killick, Fearnhead & Eckley, 2012.) Además, se aplicaron pruebas de significancia estadística: pruebas paramétricas t (t-test) cuando los datos mostraron normalidad (evaluada previamente con Shapiro-Wilk), y pruebas no paramétricas (Mann-Whitney U) en caso contrario. Estos tests se emplearon para comparar los valores antes y después del 8 de mayo, fecha del cambio de manejo en cada compostera, permitiendo contrastar directamente las diferencias entre la compostera “óptima” y la “deficiente” en cada subperíodo. Este enfoque múltiple permitió una evaluación robusta y multifacética del comportamiento de las variables ambientales y de gases, reforzando la interpretación de los efectos del manejo en el proceso de compostaje.”

Este enfoque múltiple permitió una evaluación robusta y multifacética del comportamiento de las variables ambientales y de gases, reforzando la interpretación de los efectos del manejo en el proceso de compostaje.



3 Resultados

3.1 Análisis descriptivo

Para temperatura, la compostera con buen uso presentó medianas similares antes y después del 8 de mayo (20.1 °C antes y 20.3 °C después), sin cambios significativos (Mann-Whitney U, $p = 0.461$). En contraste, la compostera con mal uso mostró un aumento significativo en temperatura después de la fecha de corte (mediana antes ~19.8 °C, después ~21.5 °C; $p = 0.021$), reflejando alteraciones térmicas causadas por el material agregado.

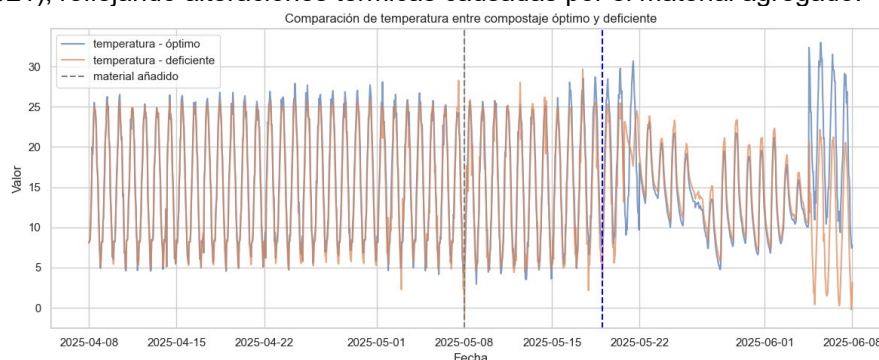


Figura 2. Variación diaria de la temperatura interna en ambas composteras antes y después del cambio de manejo. Fuente: Autor, 2025.

En humedad, ambas composteras evidenciaron cambios estadísticamente significativos entre subperíodos. La compostera óptima mostró un aumento mediano de humedad de aproximadamente 8 puntos porcentuales (de ~62 % a ~70 %, $p < 0.001$), mientras que la compostera deficiente registró un incremento aún más marcado, de aproximadamente 16 puntos porcentuales (de ~62 % a ~78 %, $p < 0.001$). Estas variaciones reflejan una fuerte alteración en el equilibrio hídrico del proceso de compostaje (Figura 3).

Respecto al sensor MQ2, indicador indirecto de gases como el metano, la compostera óptima presentó un aumento estadísticamente significativo ($p < 0.001$) tras el 8 de mayo, con un incremento promedio del 206.5%, lo que refleja una intensificación en la actividad microbiana esperada en un proceso de compostaje saludable. En contraste, la compostera deficiente experimentó un aumento también significativo ($p < 0.001$), pero de un 105.3%, lo que sugiere una acelerada liberación de gases potencialmente contaminantes debido a la descomposición de materiales inapropiados introducidos. (Figura 4).

En general, se observan diferencias significativas entre ambas composteras en cada subperíodo, con p-valores menores a 0.005 en temperatura, humedad y MQ2, ratificando la influencia negativa del mal manejo en la compostera (Figura 2, 3 y 4).

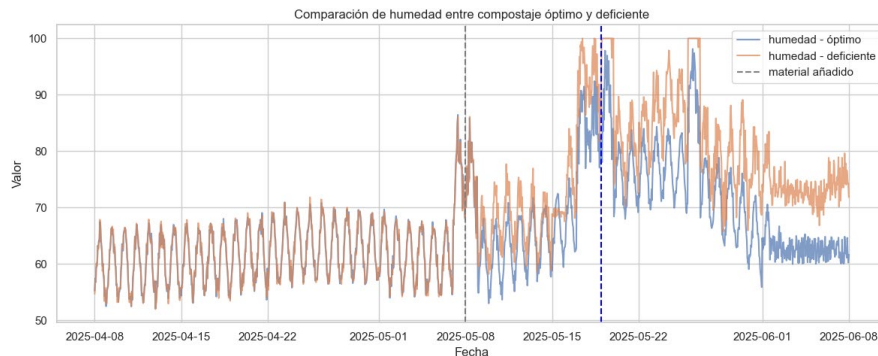
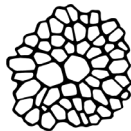


Figura 3. Cambios en la humedad interna de las composteras asociadas a distinto manejo del proceso. Fuente: Autor, 2025.

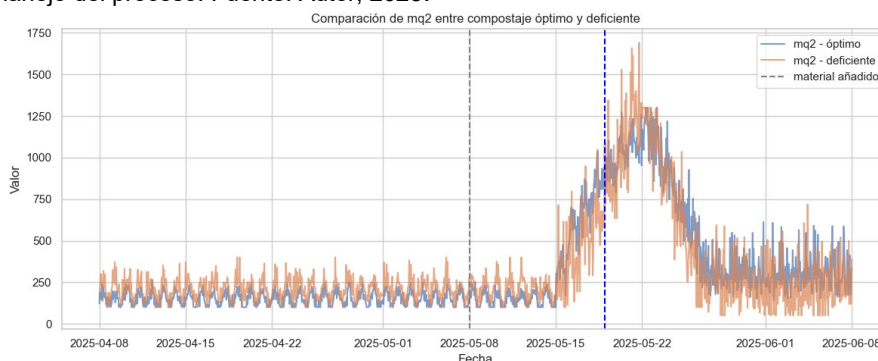


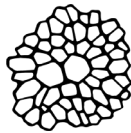
Figura 4. Variación diaria en la concentración de gases (MQ-2) como indicador de actividad microbiana bajo distinto manejo. Fuente: Autor, 2025.

3.2 Análisis de series temporales

Los análisis de series temporales revelaron que la temperatura en la compostera “óptima” no mostró diferencias significativas entre los períodos analizados (Mann-Whitney U, $p = 0.461$), mientras que en la compostera “deficiente” sí se detectó una disminución significativa ($p = 0.021$). Además, la comparación entre ambas composteras después del 8 de mayo confirmó una diferencia significativa en temperatura ($p = 0.037$), reflejando el impacto negativo del mal manejo.

En cuanto a la humedad, ambos tipos de composteras evidenciaron incrementos significativos entre los períodos antes y después del 8 de mayo ($p < 0.001$). La comparación entre composteras en el período posterior también arrojó diferencias significativas ($p < 0.001$), subrayando la distinta dinámica hídrica asociada al manejo correcto e incorrecto.

Finalmente, la concentración de gases medida con el sensor MQ2 mostró incrementos estadísticamente significativos en ambas composteras, tanto en la comparación temporal interna como entre composteras, con $p < 0.005$ en



todos los casos, lo que evidencia un aumento en la producción de gases asociado al proceso de descomposición y al manejo de los residuos.

Las tendencias descritas se visualizan claramente en las series temporales con medias móviles semanales y bandas de desviación estándar, que se presentan para temperatura (Figura 5), humedad (Figura 6) y concentración de gases (Figura 7). Dichas visualizaciones muestran cómo las variables evolucionan a lo largo del tiempo, permitiendo identificar patrones y diferencias en la estabilidad de cada compostera.

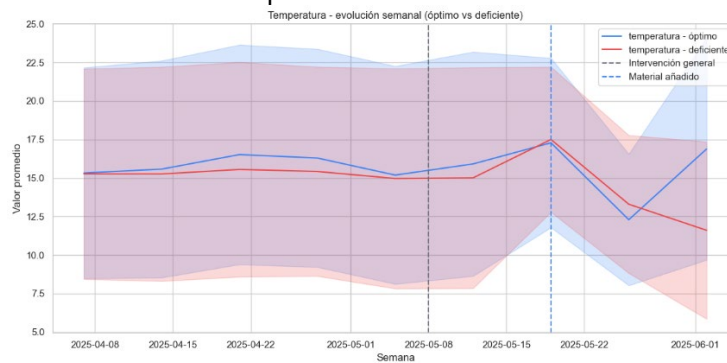


Figura 5. Variación semanal de la temperatura interna en ambas composteras con medias móviles y bandas de desviación estándar. Fuente: Autor, 2025.

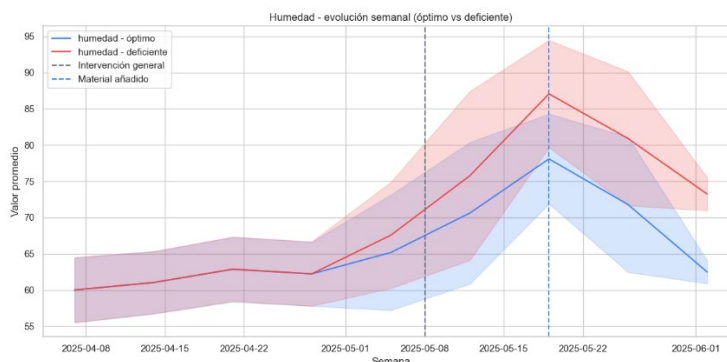


Figura 6. Cambios semanales en la humedad interna según el manejo del compostaje. Fuente: Autor, 2025.

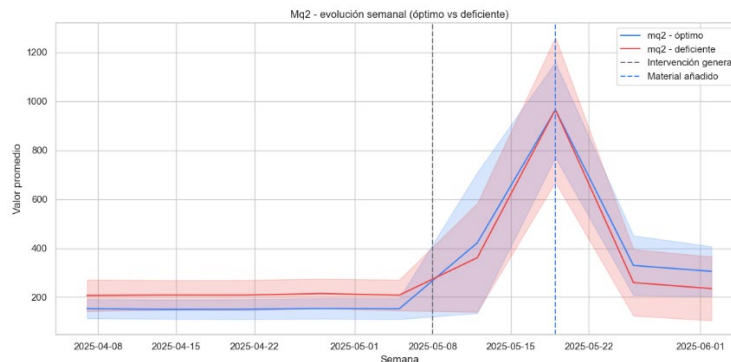
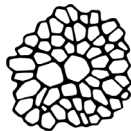


Figura 7. Evolución semanal de la concentración de gases (MQ-2) como indicador de actividad microbiana. Fuente: Autor, 2025.

Mediante técnicas de detección automática de rupturas en series temporales, se identificaron puntos de cambio que coinciden con eventos de alteración del proceso. En la compostera óptima, se detectaron 4 puntos de cambio en temperatura (en horas 1050, 1160, 1380 y 1465), mientras que en la compostera deficiente hubo una concentración similar de rupturas, pero con mayor magnitud en las variables MQ2 y humedad.

Estos puntos de cambio marcan alteraciones bruscas en la dinámica interna, como la introducción de material inapropiado, y permiten una detección oportuna de desviaciones en el manejo.

Por último, el análisis de la evolución semanal con medias móviles de 168 horas (una semana) y bandas de desviación estándar mostró que la compostera con buen uso mantuvo valores relativamente estables en temperatura (mediana semanal cerca de 20 °C), humedad (en torno a 55-60%) y niveles de gases MQ2, con desviaciones moderadas. En cambio, la compostera mal usada mostró fluctuaciones más pronunciadas, con picos y caídas abruptas especialmente en MQ2 y humedad, reflejando condiciones inestables y poco controladas (Figura 5, 6 y 7).

La observación detallada de las series temporales completas con medias móviles permitió visualizar claramente estos patrones, evidenciando la capacidad de este método para monitorear el estado del proceso y detectar anomalías asociadas al mal uso (Figura 8 y 9).

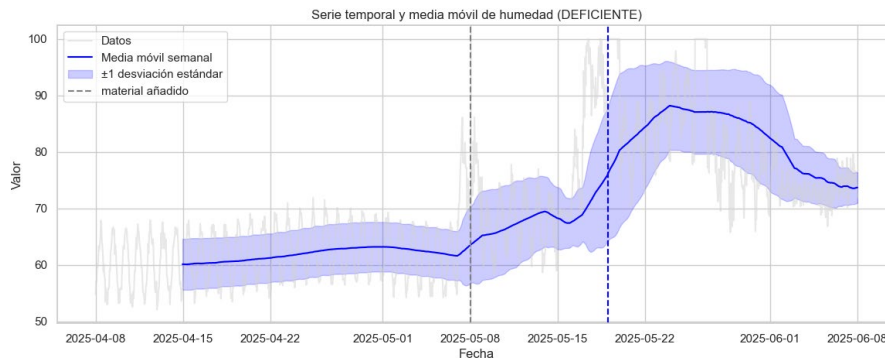
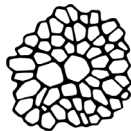


Figura 8. Serie temporal y media móvil semanal de la humedad interna en la compostera deficiente. Fuente: Autor, 2025.

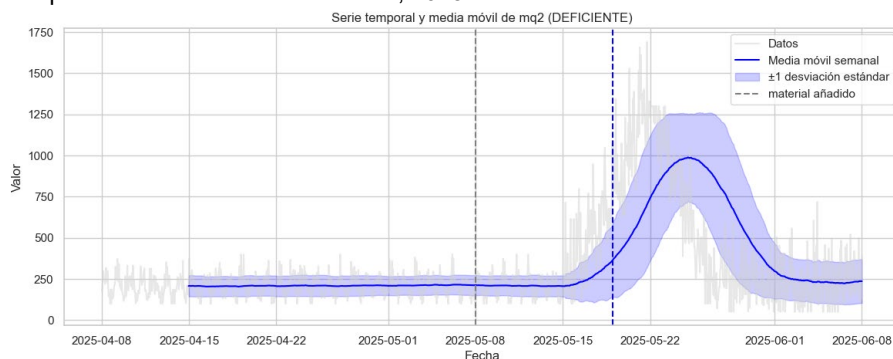


Figura 9. Serie temporal y media móvil semanal de la concentración de gases (MQ-2) en la compostera deficiente. Fuente: Autor, 2025.

3.3 Correlaciones entre variables y diferencias entre buen y mal uso

La correlación entre temperatura y humedad fue positiva y moderada en ambas composteras, con coeficientes de Pearson $r = 0.325$ y 0.219 para la compostera óptima y deficiente, respectivamente ($p < 0.001$). La correlación de Spearman confirmó esta tendencia ($p = 0.457$ para óptima y 0.293 para deficiente, $p < 0.001$).

Las relaciones entre temperatura y MQ2, y entre humedad y MQ2, mostraron patrones similares, aunque con mayor dispersión en la compostera deficiente, lo que indica menor estabilidad ambiental (Figuras 10-12). Esto sugiere que el manejo correcto contribuye a una regulación más estable de las condiciones internas del compostaje, mientras que el mal uso genera condiciones más erráticas y propensas a emisiones de gases no controladas.

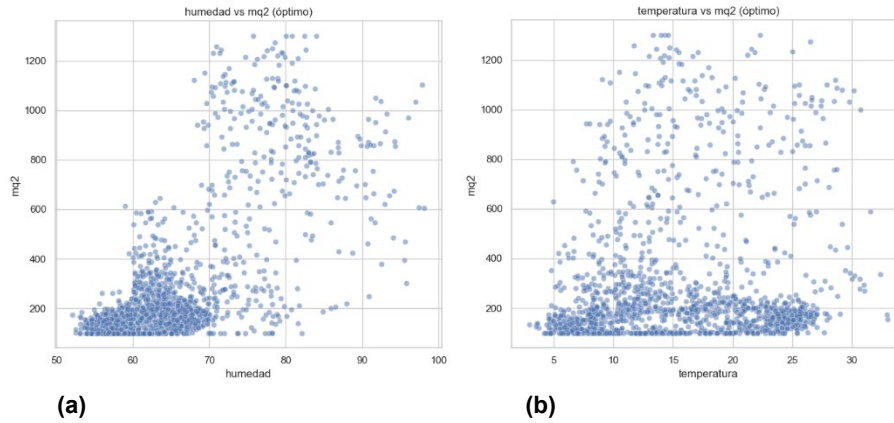
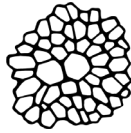


Figura 10. (a) Relación entre humedad interna y niveles de gas en compostera óptima. (b) Relación entre temperatura interna y niveles de gas en compostera óptima.

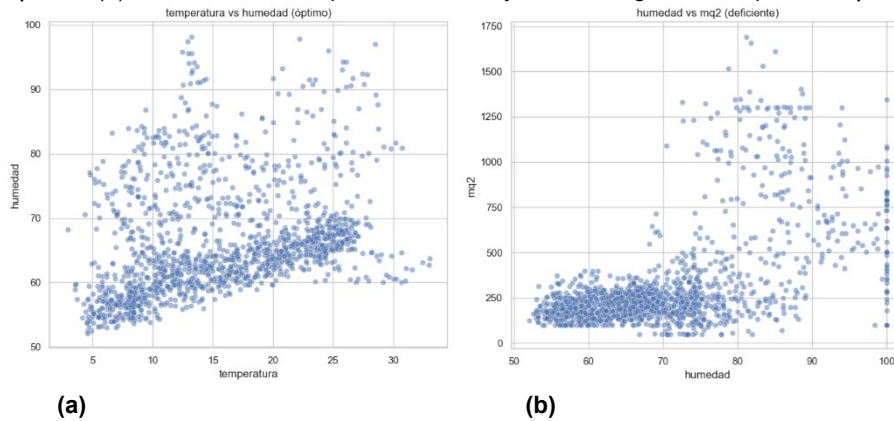


Figura 11. (a) Relación entre temperatura y humedad interna en compostera óptima. (b) Relación entre humedad interna y niveles de gas en compostera deficiente.

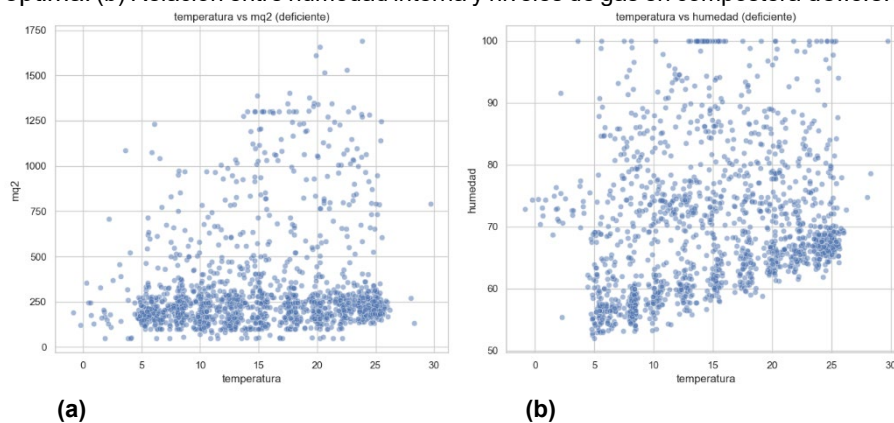
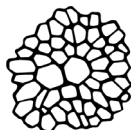


Figura 12. (a) Relación entre temperatura interna y niveles de gas en compostera deficiente. (b) Relación entre temperatura y humedad interna compostera deficiente.



4 Discusión

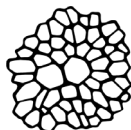
Los resultados confirman que los datos del sistema de sensorización de bajo costo son suficientes para detectar tempranamente cambios en variables ambientales que evidencian mal uso en composteras domiciliarias. La compostera “óptima” mostró un rango dinámico amplio y esperado para la descomposición activa, con temperaturas entre 20 °C y 45 °C, y picos puntuales hasta 50 °C, asociados a la maduración del compost. La “deficiente” presentó fluctuaciones más abruptas y persistentes, mayor varianza semanal y más puntos de cambio significativos (rupturas en horas 1050-1465), indicando inestabilidad.

La humedad evidenció diferencias significativas antes y después de la fecha crítica: la “deficiente” mostró un rango más amplio y mayores desviaciones, mientras la “óptima” se mantuvo estable entre 45% y 65%. La correlación humedad-temperatura fue más robusta en la compostera óptima ($r \approx 0.32$), indicando un sistema biológicamente activo y equilibrado. La concentración de gases medida con el sensor MQ2 reflejó diferencias marcadas, especialmente tras el segundo mes, cuando la “deficiente” mostró picos sostenidos sobre 400 unidades, frente a valores estables entre 150 y 300 de la “óptima”. Esta detección fue clave para identificar momentos críticos en la generación de gases contaminantes. Con estos resultados se establecen las bases técnicas y estadísticas para un modelo integrativo de detección y monitoreo. La medición conjunta y multivariada de temperatura, humedad y gases es suficiente para detectar cambios indicativos de mal uso, considerando tanto valores absolutos como variabilidad temporal. Así, se propone un esquema de alertas amarillas y rojas, basado en 4 métricas computables y adaptables a distintos escenarios de compostaje domiciliario.

Tabla 1. Resumen de umbrales y alertas.

Indicador	Alerta Amarilla	Alerta Roja
Desviación estándar temperatura	$> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	≥ 2 puntos de cambio en última semana
Humedad promedio semanal	$< 45\% \text{ o } > 65\%$	Fuera de rango $> 48\text{ h}$ continuas
Señal MQ2	Incremento $> 20\%$ semanal	Instantáneo > 350 unidades o punto de cambio
Correlación temp-humedad	r entre 0.1 y 0.25	$r < 0.1$

En conclusión, este estudio demostró que el diseño de un sistema de sensorización y monitoreo basado en componentes de bajo costo es suficiente para obtener mediciones precisas y sensibles que permitan identificar tempranamente el mal manejo de composteras domiciliarias. La estabilidad térmica, el equilibrio hídrico y la concentración de gases, analizadas de manera



conjunta y longitudinalmente en el tiempo, se validaron como indicadores críticos y sencillos de utilizar en un sistema de monitoreo escalable a dimensiones municipales.

Estos resultados son auspiciosos para fundamentar la etapa siguiente del proyecto: el pilotaje del sistema con usuarios reales en condiciones normales de operación y el diseño de la interfaz de visualización de datos (*dashboard*) para el equipo de supervisión municipal. Así, se espera a mediano plazo tener el sistema IoT de monitoreo completamente implementado, dando cumplimiento al objetivo último de usar el diseño y la tecnología para desarrollar sistemas de ciudades inteligentes que mejoren la calidad de vida para todos.

Agradecimientos. Agradecemos el apoyo de la Ilustre Municipalidad de Peñalolén y a Ecoparque Peñalolén por el apoyo en capacitación, uso de composteras, espacio de trabajo y supervisión de composteras. Igualmente, agradecemos a la Escuela de Diseño de la Universidad Adolfo Ibáñez por el apoyo económico que hizo posible esta investigación.

Referencias

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN]. (2023). Minuta N.º 119/23: Emisiones de metano [Minuta].

Chile sin Basura. (2023, 7 de agosto). Causa: al 2026, 500 mil hogares compostando sus orgánicos. <https://chilesinbasura.cl/causa-al-2026-500-mil-hogares-compostando-sus-organicos/>

Fundación Chile. (2024, 8 de abril). Programa “Nos compostamos bien” por un Santiago limpio y sustentable. <https://fch.cl/noticias/programa-nos-compostamos-bien-por-un-santiago-limpio-y-sustentable/>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2021). *Cambio Climático 2021: La base física. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Killick, R., Fearnhead, P., & Eckley, I. A. (2012). Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*, 107(500), 1590–1598. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>

Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Estrategia nacional de residuos orgánicos Chile 2040*. Ministerio del Medio Ambiente. <https://mma.gob.cl/estrategia-residuos-organicos/>

Ministerio del Medio Ambiente. (2020, 4 de agosto). Ministerio del Medio Ambiente presenta Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos que propone ambiciosa meta de reciclaje. <https://mma.gob.cl/noticias/estrategia-nacional-residuos-organicos/>

Programa Reciclo Orgánicos; Ministerio del Medio Ambiente de Chile; Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Canadá. (2019). *Guía de compostaje domiciliario: Cómo combatir el cambio climático a través del reciclaje de orgánicos*. <https://www.recicloorganicos.cl/guia-compostaje-domiciliario>