

Universidad de Castilla-La Mancha



Desarrollos Tecnológicos basados en IoT para Mejorar la Sostenibilidad Agroambiental y la Calidad de Vida en el contexto de las Smart Cities

Tesis Doctoral presentada para la obtención del grado académico de
Doctor en Ingeniería Informática

Jorge Javier Aira

Directores:

Dra. Teresa Olivares Montes
Dr. Francisco M. Delicado Martínez

Febrero 2024



University of Castilla-La Mancha



**Technological Developments based on IoT to Improve
Agro-environmental Sustainability and Quality of Life in
the context of Smart Cities**

A Doctoral dissertation submitted to obtain the academic degree of
Doctor of Philosophy in Computer Science

Jorge Javier Aira

Advisors:

Teresa Olivares Montes, Ph.D.
Francisco Delicado Martínez, Ph.D.

February 2024



Agradecimientos

En el culmen de este viaje académico que ha sido esta tesis doctoral, deseo expresar mi sincero agradecimiento a quienes han sido pilares fundamentales en este proceso.

En primer lugar, mi gratitud se dirige hacia mi esposa, María José, por su apoyo inquebrantable, paciencia y comprensión durante cada etapa de esta travesía. Su amor y respaldo han sido mi fuente de fortaleza y motivación constante. A mis dos hijas, Josefina y Emilia, les agradezco por su comprensión y amor incondicional, incluso en los momentos en que mi tiempo y atención se enfocaban en este desafío académico. Su alegría y entusiasmo han sido mi motor.

Agradezco profundamente a mis directores de tesis, Teresa y Francisco, por su guía experta y dedicación incansable a lo largo de este proceso. Sus conocimientos compartidos, calidez humana y sabios consejos han influido tanto en mi desarrollo profesional como personal. Estoy muy agradecido por la oportunidad de aprender de dos personas tan excepcionales.

Realizar esta tesis doctoral en el contexto de una pandemia global, mientras mantenía un trabajo de tiempo completo y atendía las responsabilidades familiares, ha sido un verdadero desafío. Sin embargo, con el apoyo de mi familia y la orientación de mis directores, he superado obstáculos significativos. Este logro no solo representa un hito académico en mi vida, sino también un testimonio de la importancia del apoyo de seres queridos y mentores en el camino hacia la excelencia.

A todos ustedes, les agradezco sinceramente por formar parte de este capítulo en mi vida.



“It means your future hasn’t been written yet. No one’s has! Your future is whatever you make it. So make it a good one!”

CHRIS LLOYD - Emmett L. “Doc” Brown
Back to the Future: Part III, 1990.



Acknowledgement

At the culmination of this academic journey that has been my doctoral thesis, I wish to express my sincere gratitude to those who have been fundamental pillars in this process.

First and foremost, my gratitude is directed towards my wife, María José, for her unwavering support, patience, and understanding at every stage of this journey. Her love and backing have been my source of strength and constant motivation. To my two daughters, Josefina and Emilia, I thank them for their understanding and unconditional love, even in the moments when my time and attention were focused on this academic challenge. Their joy and enthusiasm have been my driving force.

I deeply appreciate my thesis supervisors, Teresa and Francisco, for their expert guidance and tireless dedication throughout this process. Their shared knowledge, warmth, and wise counsel have influenced both my professional and personal development. I'm very grateful for the opportunity to learn from two such exceptional people.

Completing this doctoral thesis in the context of a global pandemic, while maintaining a full-time job and attending to family responsibilities, has been a real challenge. However, with the support of my family and the guidance of my supervisors, I have overcome significant obstacles. This achievement represents not only an academic milestone in my life but also a testament to the importance of the support of loved ones and mentors on the path to excellence.

To all of you, I sincerely thank you for being a part of this chapter in my life.



“It means your future hasn’t been written yet. No one’s has! Your future is whatever you make it. So make it a good one!”

CHRIS LLOYD - Emmett L. “Doc” Brown
Back to the Future: Part III, 1990.



Authorship declaration

I, Javier Aira, hereby declare that the work presented in this document is the result of my original investigation, in my own words, and that all sources are fully acknowledged, and all quotations properly identified throughout the manuscript.

This Ph.D. thesis, entitled “Technological Developments based on IoT to Improve Agro-environmental Sustainability and Quality of Life in the context of Smart Cities”, is presented in the form of a compendium of publications to obtain the degree of Doctor of Philosophy in the program of Advanced Computing Technologies from Universidad de Castilla-La Mancha, Spain. The contributions referenced below constitute the thesis compendium:

- J. Aira, T. Olivares and F. M. Delicado, “SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-10, 2022, Art no. 6005610, doi: 10.1109/TIM.2022.3196947. Quartile: Q1, H-Index: 139, and Impact Factor: 5.6.
- J. Aira, T. Olivares and F. M. Delicado, “DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-14, 2024, Art no. 5501414, doi: 10.1109/TIM.2024.3350146. Quartile: Q1, H-Index: 139, and Impact Factor: 5.6.
- J. Aira, T. Olivares, F. M. Delicado and D. Vezzani, “MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae),” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023, Art no. 2509613, doi: 10.1109/TIM.2023.3265119. Quartile: Q1, H-Index: 139, and Impact Factor: 5.6.

Signed: D. Jorge Javier Aira
Buenos Aires, Argentina
February 2024



Resumen

Las ciudades de todo el mundo afrontan desafíos ambientales crecientes como resultado del acelerado proceso de urbanización y la consiguiente presión sobre los recursos naturales. Estos desafíos abarcan la contaminación atmosférica y acuática, la gestión de residuos, la degradación del entorno urbano y la imperante necesidad de abordar el cambio climático. En este contexto, las ciudades inteligentes o “Smart Cities”, han surgido como una respuesta innovadora y prometedora para enfrentar estas cuestiones medioambientales y elevar la calidad de vida de sus habitantes. Las “Smart Cities” hacen uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) con el propósito de optimizar la eficiencia operativa, fomentar la sostenibilidad medioambiental y mejorar el bienestar de sus residentes. En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things) desempeña un papel importante en las “Smart Cities” ya que puede contribuir a la reducción de la contaminación, la eficiencia energética, la optimización del tráfico y sistemas de transporte, entre otros. En términos de contaminación, el IoT es de trascendental relevancia, ya que permite llevar a cabo un monitoreo continuo de la calidad del aire, el agua y otras variables, proporcionando datos valiosos que sustentan la toma de decisiones informadas en el ámbito de la gestión medioambiental y la salud pública. Dicha tecnología allana el camino hacia la construcción de ciudades más limpias, sostenibles y saludables, abordando retos medioambientales y de salud pública a través de la recopilación de datos, la toma de decisiones basadas en evidencias y la implementación de soluciones tecnológicas inteligentes. A medida que se avanza hacia un futuro cada vez más urbanizado, la conjunción de las “Smart Cities” y el IoT se erige como un poderoso catalizador para la configuración de ciudades más resilientes, ecológicas y amigables. En este contexto, la agroindustria, componente esencial de la economía global, desempeña un papel crítico en la producción de alimentos para las ciudades en crecimiento. No obstante, su expansión ha generado considerables preocupaciones en términos de contaminación ambiental y sus efectos adversos en la salud humana, la flora, la fauna y el equilibrio ecológico. La expansión de la agroindustria ha dado lugar a la intensificación de la agricultura, con prácticas como el monocultivo, la cría intensiva de ganado, y el uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos. En el caso de estos últimos, se emplean para incrementar la productividad agrícola y garantizar el suministro de alimentos. No obstante, su uso desmedido y la dispersión incontrolada de estos químicos han generado problemáticas medioambientales y de salud pública en las áreas urbanas, periurbanas y rurales de pueblos y ciudades.

La presente tesis doctoral aborda tres desafíos medioambientales de gran envergadura que se encuentran interrelacionados por la influencia de la contaminación derivada del uso de agroquímicos, originados en el contexto agroindustrial, y con impacto en las “Smart Cities”. Estos desafíos se manifiestan en tres dominios fundamentales: el agua, el aire y, como resultado de la interacción entre estos dos, así como otros factores de

complejidad que se profundizarán más adelante, la proliferación de insectos vectores responsables de la transmisión de enfermedades a los seres humanos. Los tres desafíos en cuestión revisten una trascendencia sustancial tanto para la salud de la población como para el equilibrio ecológico. En este sentido, el objetivo primordial de este estudio doctoral radica en proponer tres desarrollos tecnológicos para cada uno de los desafíos mencionados, con el propósito de aportar soluciones novedosas destinadas a mejorar la situación actual que afecta a millones de individuos y ecosistemas que sufren las consecuencias de la contaminación por agroquímicos.

El primer desarrollo tecnológico propuesto se centra en la contaminación del agua con glifosato. Esta problemática se ha convertido en una cuestión de salud pública apremiante que demanda una atención inmediata, ya que este herbicida es altamente soluble en agua y plantea un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos. Cada vez más, la comunidad científica manifiesta su inquietud por la exposición al glifosato y sus consecuencias para la salud humana, incluso a dosis mínimas, dado que puede causar daños considerables. Detectar residuos de glifosato en el agua no es una tarea sencilla y requiere de equipos costosos y personal altamente capacitado. En esta tesis se presenta la concepción, desarrollo y validación de un novedoso espectrómetro VIS-NIR (Visible-Near-Infrared) de bajo coste denominado “SpectroGLY”, cuya función principal es identificar posibles niveles de contaminación de aguas con glifosato a través de un semáforo digital. SpectroGLY fusiona la funcionalidad de un espectrómetro de laboratorio convencional con los principios tecnológicos del IoT, lo que permite la integración de múltiples opciones de conectividad, adecuadas tanto para entornos rurales como urbanos. Además, proporciona plataformas de monitoreo y visualización digital, que incluyen una plataforma IoT y una aplicación móvil. La portabilidad de SpectroGLY posibilita su uso en diversos contextos, y un tiempo de generación de resultados de minutos. En resumen, el primer desarrollo tecnológico propuesto presenta una solución innovadora y asequible para prevenir posibles casos de intoxicación relacionados con la ingesta de agua contaminada con glifosato.

El segundo desarrollo tecnológico propuesto se enfoca en la contaminación del aire en el ámbito agroindustrial a través de la aplicación o fumigación de agroquímicos. Como consecuencias de estas prácticas, se generan lo que se conoce como “derivas”, que es el desplazamiento de estas sustancias en el aire, lo que constituye una amenaza significativa tanto para la salud humana como para los ecosistemas naturales. Las moléculas de agroquímicos tienen la capacidad de recorrer distancias considerables a través del aire, infiltrarse en acuíferos subterráneos, seguir cursos de agua fluvial, caer con las precipitaciones pluviales, dispersarse con partículas de polvo y adoptar diversas vías para alcanzar pueblos y ciudades. Monitorear activamente la deriva de agroquímicos es esencial para proteger la salud de los ciudadanos y el medio ambiente. En esta tesis se presenta “DriftGLY”, un innovador sistema IoT de alerta temprana de bajo coste que utiliza un semáforo digital para monitorear de manera continua y automática la presencia de agroquímicos en el aire, tanto individualmente como en forma de cóctel. La

innovación clave de DriftGLY radica en la estrecha relación entre la configuración de su semáforo digital y el cálculo preciso de la cantidad de agroquímicos depositados en los tanques de pulverización. Esta configuración se basa específicamente en el parámetro de la tasa de dosis expresada en litros por hectárea de estos contaminantes. DriftGLY incorpora un original sistema de recolección que permite la detección indirecta de agroquímicos en sus formas particuladas, gaseosas y, a diferencia de los sistemas tradicionales, líquidas. De esta manera, DriftGLY muestra niveles de riesgo de contaminación a través de su semáforo digital, transmitiéndolos a una plataforma IoT mediante diversas opciones de conectividad, y los publica en la red social X (anteriormente conocida como Twitter). El objetivo de esta acción es democratizar la información y promover los cambios necesarios para que los ciudadanos disfruten de un entorno saludable y equilibrado.

El tercer desarrollo tecnológico propuesto está directamente relacionado con el crecimiento y expansión de las zonas destinadas a la agricultura. Dentro de este contexto, se presentan diversas situaciones. En primer lugar, la deforestación no solo resulta en la contaminación del agua y del aire debido al uso de agroquímicos cuando se establece el agronegocio en estas áreas (como se mencionó anteriormente), sino que también suprime a los depredadores naturales y altera el equilibrio de los ecosistemas naturales. Este proceso da lugar a un notable aumento en la población de vectores, principalmente los mosquitos, que actúan como portadores de graves enfermedades humanas. Los agroquímicos también han contribuido a la eliminación de depredadores naturales, lo que ha dado lugar a que las plagas carezcan de competencia y, como resultado, se reproduzcan de manera más intensa. Como consecuencia de este fenómeno, millones de personas en todo el mundo se infectan cada año con enfermedades transmitidas por mosquitos. Una de las especies más peligrosas es el *Aedes aegypti*, principal vector de virus como el dengue, la fiebre amarilla, el chikungunya, y Zika, entre otros. En este sentido, la vigilancia entomológica es una herramienta importante para evitar graves consecuencias para la salud pública. En la actualidad, esta herramienta de seguimiento tradicional se ejecuta manualmente y requiere una transformación digital para ayudar a las autoridades en la toma de decisiones, mejorar sus esfuerzos de planificación, acelerar la ejecución y, gestionar mejor los recursos disponibles. En este contexto, como tercer desarrollo tecnológico propuesto, se presenta el diseño, desarrollo y validación de un sistema llamado “MosquIoT”, que se basa en las ovitrampas tradicionales integrando tecnologías IoT y TinyML (Tiny Machine Learning), que permiten la detección y cuantificación de huevos de *Aedes aegypti*. En cuanto a la conectividad IoT, MosquIoT proporciona diversas opciones, adaptándose tanto a entornos urbanos como rurales, donde la conectividad convencional a veces puede ser limitada. Además, proporciona plataformas de monitoreo y visualización digital, que incluyen una plataforma IoT y una aplicación móvil. Esta solución prometedora puede ayudar a comprender dinámicamente el comportamiento de las poblaciones de *Aedes aegypti* en las ciudades, pasando del actual modelo de seguimiento entomológico reactivo tradicional a uno digital proactivo y predictivo.



Summary

Cities worldwide face growing environmental challenges resulting from the rapid urbanization process and the consequent pressure on natural resources. These challenges encompass air and water pollution, waste management, urban environment degradation, and the urgent need to address climate change. In this context, “Smart Cities” have emerged as an innovative and promising response to tackle these environmental issues and enhance the quality of life for their residents. “Smart Cities” leverage Information and Communication Technologies (ICTs) to optimize operational efficiency, promote environmental sustainability, and improve the well-being of residents. Within this framework, the Internet of Things (IoT) plays a significant role in “Smart Cities” as it can contribute to pollution reduction, energy efficiency, and the optimization of traffic and transportation systems, among other aspects. In terms of pollution, IoT is of paramount importance as it allows continuous monitoring of air and water quality and other variables, providing valuable data to support informed decision-making in environmental management and public health. This technology paves the way for the construction of cleaner, more sustainable, and healthier cities, addressing environmental and public health challenges through data collection, evidence-based decision-making, and the implementation of intelligent technological solutions. As we move towards an increasingly urbanized future, the synergy of “Smart Cities” and IoT emerges as a powerful catalyst for shaping more resilient, ecological, and user-friendly cities. In this context, the agro-industry, an essential component of the global economy, plays a critical role in food production for growing cities. However, its expansion has raised significant concerns about environmental pollution and its adverse effects on human health, flora, fauna, and ecological balance. The expansion of agro-industry has led to the intensification of agriculture, with practices such as monoculture, intensive livestock farming, and the extensive use of agrochemicals. In the case of the latter, they are employed to increase agricultural productivity and ensure food supply. However, their excessive use and uncontrolled dispersion have generated environmental and public health issues in urban, peri-urban, and rural areas of towns and cities.

This doctoral thesis addresses three interconnected environmental challenges influenced by pollution from agrochemical use, originating in the agro-industrial context and impacting “Smart Cities.” These challenges manifest in three fundamental domains: water, air, and, as a result of the interaction between these two, along with other complex factors discussed later, the proliferation of vector insects responsible for disease transmission to humans. These three challenges are of substantial importance both for population health and ecological balance. In this regard, the primary objective of this doctoral study is to propose three technological developments for each of the mentioned challenges, aiming to provide innovative solutions to improve the current situation

affecting millions of individuals and ecosystems suffering from the consequences of agrochemical pollution.

The first proposed technological development focuses on water pollution with glyphosate. This issue has become an urgent public health concern that requires immediate attention, as this herbicide is highly water-soluble and poses a significant risk to aquatic ecosystems. Detecting glyphosate residues in water is not a simple task and requires expensive equipment and highly trained personnel. This thesis introduces the conception, development, and validation of a novel low-cost Visible-Near-Infrared (VIS-NIR) spectrometer called “SpectroGLY.” Its primary function is to identify potential glyphosate water contamination levels through a digital traffic light. SpectroGLY merges the functionality of a conventional laboratory spectrometer with IoT technological principles, allowing integration of multiple connectivity options suitable for both rural and urban environments. Additionally, it provides digital monitoring and visualization platforms, including an IoT platform and a mobile application. SpectroGLY's portability enables its use in various contexts, with results generated within minutes. In summary, the first proposed technological development presents an innovative and affordable solution to prevent potential cases of intoxication related to the consumption of water contaminated with glyphosate.

The second proposed technological development focuses on air pollution in the agro-industrial environment through the application or spraying of agrochemicals. As a consequence of these practices, what is known as “drifts” is generated, which is the displacement of these substances in the air, posing a significant threat to both human health and natural ecosystems. Agrochemical molecules have the ability to travel considerable distances through the air, infiltrate underground aquifers, follow river watercourses, fall with rainfall, disperse with dust particles, and adopt various pathways to reach towns and cities. Actively monitoring agrochemical drift is essential to protect citizens' health and the environment. This thesis introduces “DriftGLY,” an innovative low-cost IoT early warning system that uses a digital traffic light to continuously and automatically monitor the presence of agrochemicals in the air, both individually and as a cocktail. DriftGLY's key innovation lies in the close relationship between the configuration of its digital traffic light and the precise calculation of the amount of agrochemicals deposited in the spraying tanks. This configuration is specifically based on the parameter of the dose rate expressed in liters per hectare of these contaminants. DriftGLY incorporates an original collection system that allows indirect detection of agrochemicals in their particulate, gaseous, and, unlike traditional systems, liquid forms. Thus, DriftGLY displays contamination risk levels through its digital traffic light, transmitting them to an IoT platform through various connectivity options, and publishes them on the X social network (formerly known as Twitter). The aim of this action is to democratize information and promote the necessary changes for citizens to enjoy a healthy and balanced environment.

The third proposed technological development is directly related to the growth and expansion of areas designated for agriculture. Within this context, various situations arise. Firstly, deforestation not only results in water and air pollution due to agrochemical use when agribusiness is established in these areas (as mentioned earlier), but also suppresses natural predators and alters the balance of natural ecosystems. This process leads to a significant increase in the population of vectors, primarily mosquitoes, acting as carriers of severe human diseases. Agrochemicals have also contributed to the elimination of natural predators, allowing pests to reproduce more intensively. As a result of this phenomenon, millions of people worldwide are infected each year with mosquito-borne diseases. One of the most dangerous species is *Aedes aegypti*, the primary vector of viruses such as dengue, yellow fever, chikungunya, and Zika, among others. In this regard, entomological surveillance is an important tool to prevent serious consequences for public health. Currently, this traditional monitoring tool is executed manually and requires digital transformation to assist authorities in decision-making, improve planning efforts, accelerate execution, and better manage available resources. In this context, as the third proposed technological development, the design, development, and validation of a system called “MosquIoT” are presented. This system is based on traditional ovitraps integrating IoT and Tiny Machine Learning (TinyML) technologies, allowing the detection and quantification of *Aedes aegypti* eggs. Regarding IoT connectivity, MosquIoT provides various options, adapting to both urban and rural environments, where conventional connectivity may sometimes be limited. Additionally, it offers digital monitoring and visualization platforms, including an IoT platform and a mobile application. This promising solution can dynamically help understand the behavior of *Aedes aegypti* populations in cities, transitioning from the current reactive traditional entomological monitoring model to a proactive and predictive digital one.



Contenidos

Acrónimos	XVI
Lista de figuras	XVIII
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes y motivación	2
1.1.1 Smart Cities: el rol de las TICs en la gestión ambiental.....	2
1.1.2 Internet of Things: pilar de las “Smart Cities” para medir la contaminación ambiental	3
1.1.3 Agroquímicos: desafíos tecnológicos en la agroindustria y su impacto en las “Smart Cities”	6
1.2 Desafíos, objetivos y cuestiones de investigación.....	10
1.2.1 Objetivo 1: Proyecto SpectroGLY	14
1.2.2 Objetivo 2: Proyecto DriftGLY.....	16
1.2.3 Objetivo 3: Proyecto MosquIoT	20
1.3 Metodología, tareas y plan de trabajo	23
1.3.1 Objetivo 1: Proyecto SpectroGLY	23
1.3.2 Objetivo 2: Proyecto DriftGLY.....	26
1.3.3 Objetivo 3: Proyecto MosquIoT	30
1.4 Estructura de la tesis.....	33
2. Resultados	36
2.1 SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters	36
2.2 DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts	47
2.3 MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of <i>Aedes aegypti</i> (Diptera: Culicidae).....	62
3. Discusión.....	77
3.1 Sobre los resultados obtenidos del objetivo 1 (SpectroGLY)	78
3.2 Sobre los resultados obtenidos del objetivo 2 (DriftGLY)	84
3.3 Sobre los resultados obtenidos del objetivo 3 (MosquIoT).....	91
4. Conclusiones y perspectiva futura	101
4.1 Conclusiones	102
4.2 Perspectiva futura.....	106
Referencias Bibliográficas	XIX

Acrónimos

AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
AU915	Australian Frequency 915-928 MHz
BLE	Bluetooth Low Energy
CNN	Convolutional Neural Network
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
CSV	Comma-Separated Values
DSP	Digital Signal Processor
ENACOM	Ente Nacional de Comunicaciones de Argentina
FAO	Food and Agriculture Organization
FOMO	Faster Objects More Objects
FWHM	Full Width at Half Maximum
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile Communications
HD	High-definition
HVS	High Volume Sampler
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IFTTT	If This Then That
IMD	Institute for Management Development
IP	Internet Protocol
IPSO	Internet Protocol Smart Objects
IPv6	Internet Protocol Version 6
IoT	Internet of Things
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
ITU	International Telecommunication Union
IWMI	International Water Management Institute

KPI	Key Performance Indicator
LC-ESI-MS/MS	Liquid Chromatography Electrospray Ionization-Tandem Mass Spectrometry
LC50	Lethal Concentration 50
LC-MS/MS	Liquid Chromatography with Tandem Mass Spectrometry
LD50	Average Lethal Dose 50
LG	Lucky Goldstar
LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect Level
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
MCU	Microcontroller Unit
ML	Machine Learning
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLR	Multiple Linear Regression
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MW	MiddleWare
NOAEL	No-Observed-Adverse-Effect Level
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OMS	Organización Mundial de la Salud
PAS	Passive Air Samplers
PaaS	Platform as a Service
Ph.D.	Doctor of Philosophy
PIB	Producto Interior Bruto
PM	Particulate Matter
PoC	Proof of Concept
REST	Representational State Transfer
SaaS	Software as a Service
SBT	Serial Bluetooth Terminal
TICs	Tecnologías de la Información y Comunicación
TinyML	Tiny Machine Learning
TLS	Transport Layer Security
TTN	The Things Networks
UNHRC	United Nations Human Rights Council
USD	United States Dollar

Lista de figuras

Fig. 1	Impacto económico potencial de IoT en 2025, publicado por McKinsey [15].....	4
Fig. 2	Distribución global de intoxicaciones y muertes por agroquímicos (Pesticide Atlas, estudio de 2020) [30].....	7
Fig. 3	Extracto de una encuesta a jóvenes alemanes sobre los agroquímicos en 2021, resultados en porcentaje [30]	10
Fig. 4	Propuestas tecnológicas dentro de las dimensiones ambientales afectadas por los agroquímicos.....	11
Fig. 5	Peces del río Salado (Argentina) con el nivel de agrotóxicos más alto del mundo [4].....	12
Fig. 6	Fumigaciones terrestres y aéreas en el contexto agroindustrial [178].	13
Fig. 7	Aedes aegypti, mosquito vector de enfermedades [179].....	14
Fig. 8	SpectroGLY con una muestra de agua ya analizada	78
Fig. 9	SpectroGLY (Módulo de Sensado): sensor AS7265X, obturador y LEDs.....	79
Fig. 10	Ecosistema digital asociado al proyecto SpectroGLY	80
Fig. 11	Dashboard web (frontend) desarrollado para el proyecto SpectroGLY.....	81
Fig. 12	Aplicación móvil desarrollada para SpectroGLY	82
Fig. 13	Resultado colorimétrico obtenido en el proceso de calibración.....	83
Fig. 14	Verificación gráfica del correcto funcionamiento de SpectroGLY	83
Fig. 15	Primer prototipo funcional de DriftGLY	84
Fig. 16	DriftGLY y su colector de muestras	86
Fig. 17	Ecosistema digital asociado al proyecto DriftGLY.....	87
Fig. 18	Dashboard web (frontend) desarrollado para el proyecto DriftGLY	88
Fig. 19	Publicación de DriftGLY en X.....	89
Fig. 20	Izquierda: huevos de Aedes aegypti. Derecha: ovitrampa tradicional	92
Fig. 21	Izquierda: Prototipo de MosquIoT en proceso de desarrollo. Derecha: Prototipo de MosquIoT finalizado (versión laboratorio)	94
Fig. 22	Ecosistema digital asociado al proyecto MosquIoT.....	95
Fig. 23	Dashboard web (frontend) desarrollado para el proyecto MosquIoT	96
Fig. 24	MosquIoTNet, aplicación móvil desarrollada para MosquIoT	97
Fig. 25	Depresor lingual N°16 utilizado para el proceso de entrenamiento.....	98
Fig. 26	Muestras utilizadas para validar el modelo entrenado	99
Fig. 27	Resultados de la PoC realizado durante 28 días seguidos.....	99
Fig. 28	SpectroGLY con una muestra que contiene residuos de glifosato.....	103
Fig. 29	Prototipo de DriftGLY en proceso de ensayos de laboratorio	104
Fig. 30	Primer prototipo de laboratorio de MosquIoT realizando lecturas	105



1 Introducción

Este capítulo introduce los elementos esenciales de la tesis. En su primera sección, se expone los antecedentes y la motivación que respaldan la presente investigación. El propósito primordial de este capítulo es brindar una contextualización del papel desempeñado por las “Smart Cities” en la gestión ambiental, destacando la función de la tecnología IoT como herramienta para la monitorización y control de la contaminación ambiental. También, se hace un importante análisis acerca de los desafíos tecnológicos y las problemáticas asociadas con la mejora de la sostenibilidad agroambiental y la calidad de vida en el contexto de la contaminación por agroquímicos. La segunda sección aborda el objetivo principal de la tesis, los objetivos parciales o secundarios, y sus sub-objetivos y las cuestiones de investigación que se desarrollarán a lo largo de la tesis. Los objetivos secundarios están relacionados con tres desarrollos tecnológicos propuestos que están interconectados y poseen una significativa relevancia en el contexto de la contaminación por agroquímicos en el sector agroindustrial y su impacto en las “Smart Cities”. La tercera sección proporciona una descripción de la metodología y el plan de trabajo diseñados para alcanzar estos objetivos. Finalmente, la cuarta sección presenta una visión general de la estructura de la tesis.

1.1 Antecedentes y motivación

1.1.1 Smart Cities: el rol de las TICs en la gestión ambiental

El ámbito de las ciudades inteligentes o también llamadas “Smart Cities” están experimentando un rápido avance y desarrollo. Se espera que el mercado de las “Smart Cities” crezca desde el año 2022 a 2027 de 511.6 mil millones de dólares a 1024.4 mil millones de dólares, a una tasa compuesta anual del 14.9% durante el período previsto [1]. A medida que la población mundial continúa creciendo, se prevé que la proporción de personas que viven en áreas urbanas alcance casi el 70% para 2050, lo que representa un aumento significativo de la población urbana [2]. Dado que más del 80% del PIB (Producto Interior Bruto) mundial se genera en las ciudades, una gestión adecuada de la urbanización puede contribuir al crecimiento sostenible, impulsando la productividad e innovación. Sin embargo, las ciudades también enfrentan desafíos cada vez más prominentes, incluyendo la exposición a riesgos climáticos y a desastres ambientales a medida que crecen. Construir ciudades verdes, resilientes e inclusivas requerirá una coordinación política intensa y decisiones estratégicas de inversión [3].

La ITU (International Telecommunication Union) define a las “Smart Cities” como ciudades innovadoras que utilizan las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) y otros medios para mejorar la calidad de vida y la eficiencia de los servicios urbanos, abordando las necesidades económicas, sociales y ambientales de las actuales y futuras generaciones [5]. En este contexto, es crucial que las ciudades adopten y apliquen las TICs para desarrollar enfoques de servicios centrados en el ciudadano, donde estos sean los principales beneficiarios del nuevo paradigma urbano [6]. Con la implementación de las TICs, las “Smart Cities” evolucionarán hacia entornos más sostenibles que fomentarán el bienestar y el crecimiento económico a través de una digitalización avanzada y servicios interconectados en áreas como la economía, movilidad, vivienda, salud, gobierno, medioambiente y asuntos sociales. Estos desafíos se ven agravados por el aumento de la población urbana y la necesidad de proteger el medioambiente [7].

Sin duda, en cuestiones ambientales la adopción de las TICs por parte de las “Smart Cities” ha desencadenado un notable impacto en la reducción de las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero). Ilustrativos ejemplos de estos avances se plasman en Copenhague, la ciudad danesa, donde se ha implementado un sistema de gestión del tráfico basado en la recopilación de datos provenientes de sensores, cámaras y dispositivos móviles. Este enfoque ha resultado en la disminución de la congestión circulatoria, la reducción del tiempo de viaje y, sobre todo, en la significativa reducción de las emisiones de GEI [8]. No menos destacable es el papel de los ciclistas, quienes han contribuido a la disminución de las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) en una impresionante cifra de aproximadamente 20.000 toneladas anuales. De forma

complementaria, aquellos que optan por la bicicleta han registrado 1.1 millones de días menos de permisos por enfermedad, ilustrando así los beneficios adicionales de esta saludable práctica [9]. Las “Smart Cities”, por su propia naturaleza, fomentan la movilidad sostenible a través de la integración de sistemas de transporte público eficiente, opciones de movilidad compartida y la promoción activa de la caminata y el uso de la bicicleta como modos de transporte [10]. Por otro lado, Santander (España) ha dado un paso significativo al desplegar una red de sensores en toda la ciudad, encargados de monitorear parámetros como el tráfico y la calidad del aire, así como otros aspectos ambientales. Este enfoque ha permitido una gestión más eficiente de los recursos y la reducción de las emisiones de GEI [7]. Suecia, por su parte, se ha destacado por su adopción de tecnologías avanzadas en el ámbito del transporte público, incorporando sistemas de monitoreo y gestión de flotas. Como resultado, ha experimentado una disminución palpable de las emisiones de carbono en el sector del transporte. El país ha establecido la ambiciosa meta de alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2045, un claro testimonio de su firme compromiso con la reducción de las emisiones de GEI [11]. Estonia ha abrazado soluciones digitales para gestionar sus recursos energéticos de manera más eficiente. La implementación de un sistema de lectura automática de contadores eléctricos ha capacitado a los consumidores para monitorear su consumo en tiempo real, fomentando una mayor conciencia sobre el uso de la energía y contribuyendo a su reducción [12]. Finalmente, Singapur ha aprovechado plenamente las TICs para optimizar el tráfico y mitigar la congestión circulatoria, lo que se traduce en una significativa disminución de las emisiones de GEI debido a la reducción del tiempo que los vehículos pasan en las carreteras. Además, el país ha invertido considerablemente en edificios inteligentes y tecnologías de gestión de residuos, lo que ha redundado en una reducción tangible del consumo de energía y las emisiones, fortaleciendo aún más su compromiso con la sostenibilidad ambiental [13]. Estos ejemplos ilustran cómo la implementación estratégica de TICs en “Smart Cities” puede contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de GEI, y al logro de objetivos ambientales y de sostenibilidad.

1.1.2 Internet of Things: pilar de las “Smart Cities” para medir la contaminación ambiental

El vertiginoso avance de las TICs ha transformado profundamente la interacción con el entorno que rodea a las personas. En este contexto de revolución tecnológica, uno de los desarrollos más significativos es el surgimiento del Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things), una red interconectada de dispositivos, sensores y sistemas que recopilan y comparten datos en tiempo real. Esta innovación ha allanado el camino para la creación de entornos urbanos más inteligentes y eficientes. El IoT desempeña un papel esencial al proporcionar la infraestructura tecnológica necesaria para recopilar, analizar y utilizar datos en tiempo real con el propósito de tomar decisiones más informadas y eficaces. Con el término IoT nos referimos a la interconexión generalizada de dispositivos con

Internet, lo que les permite enviar información a la nube y obtener datos para tomar decisiones y emprender acciones preventivas y correctivas. En lo que respecta a las proyecciones del IoT, se estima que para el año 2025 más de 75 mil millones de dispositivos estarán conectados a Internet [14], lo que acelerará aún más el desarrollo de aplicaciones en el contexto de las “Smart Cities”. Según un informe reciente de McKinsey, el impacto económico potencial del IoT, en sus diferentes verticales, podría alcanzar hasta los 11.1 billones de dólares al año para 2025 (Fig. 1) [15].

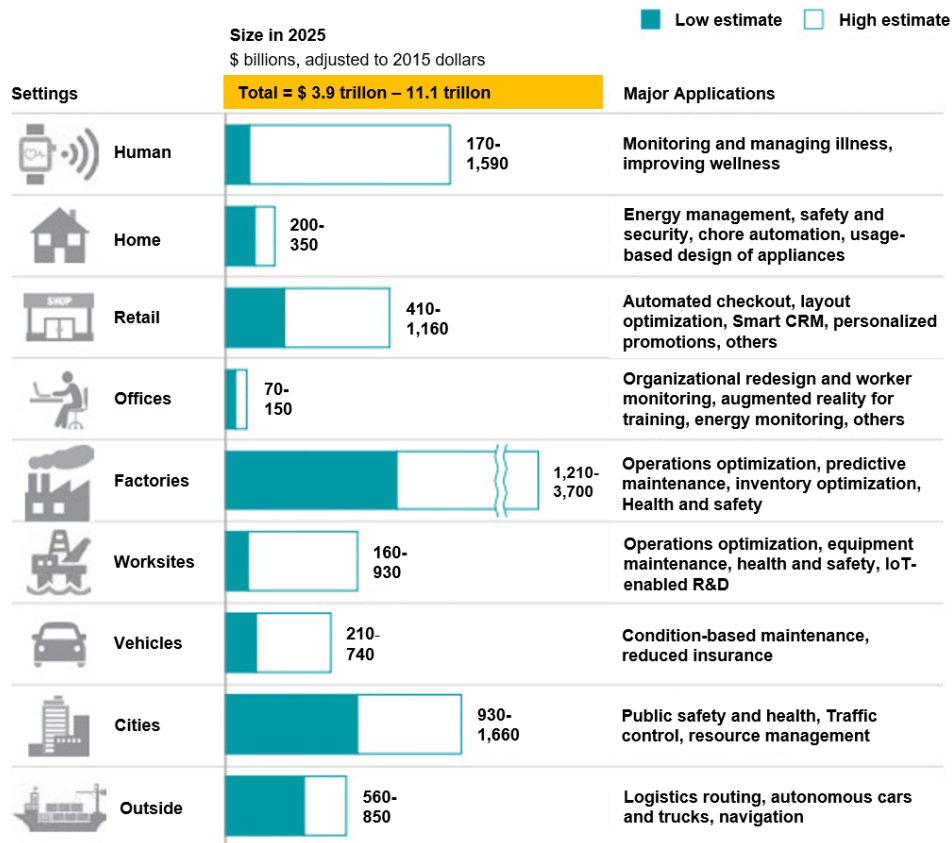


Fig. 1 Impacto económico potencial de IoT en 2025, publicado por McKinsey [15]

El término IoT fue acuñado por Kevin Ashton en 1999, quien en ese momento se desempeñaba como director ejecutivo del Auto-ID Center en el MIT (Massachusetts Institute of Technology). Ashton contribuyó significativamente a popularizar la idea de que objetos cotidianos podrían conectarse a Internet y transmitir información relevante. Esta visión marcó un hito importante en la conceptualización del IoT. En la década de 2000, LG (Lucky Goldstar), una destacada compañía de electrónica anunció planes para desarrollar un refrigerador inteligente capaz de determinar de forma autónoma si los alimentos almacenados necesitaban ser reabastecidos. Este anuncio representó un avance significativo en la comercialización del IoT, mostrando su potencial para transformar la vida cotidiana. En 2008, un grupo de empresas lanzó la alianza IPSO (Internet Protocol Smart Objects) con el objetivo de promover el uso del Internet Protocol (IP) en las redes de objetos inteligentes y fomentar el desarrollo del IoT. Posteriormente, el lanzamiento

de IPv6 (Internet Protocol version 6) en 2011 impulsó un crecimiento masivo en el interés y la adopción de tecnologías IoT, ya que ofrecía una mayor capacidad de direcciones IP y facilitaba la conexión de una amplia gama de dispositivos. Grandes empresas tecnológicas como Cisco, IBM y Ericsson también desempeñaron un papel fundamental al tomar iniciativas educativas y comerciales relacionadas con el IoT, contribuyendo así a su expansión y desarrollo. El concepto del IoT se ha desarrollado a lo largo del tiempo a medida que la tecnología avanzaba y las conexiones entre dispositivos se volvían más accesibles y asequibles.

Dentro del contexto de las “Smart Cities”, el IoT desempeña un papel fundamental al permitir que los sensores recopilen y transmitan datos sobre el estado de las ciudades a la nube. Estos datos luego se extraen y procesan para identificar patrones que respaldan la toma de decisiones [16]. Ampliamente reconocido como una tecnología revolucionaria con aplicabilidad en diversos escenarios y dominios [17], el IoT está impulsando la evolución de las ciudades inteligentes hacia una realidad. El objetivo fundamental de una “Smart City” es establecer un ecosistema enriquecedor que optimice el funcionamiento de la ciudad, aumentando su eficiencia y generando nuevas oportunidades para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos [18]. El verdadero valor del IoT en las “Smart Cities” se alcanza cuando la infraestructura no se limita a silos, sino que se encuentra disponible de manera homogénea y resiliente para diversas áreas de aplicación. Sin embargo, esta integración plantea desafíos significativos, incluida la necesidad de garantizar la escalabilidad, la conectividad y la seguridad para el intercambio de información, incluso información personal o crítica, entre actores autorizados, al tiempo que se protege contra el acceso no autorizado. En este contexto, los datos generados constantemente por la gran cantidad de sensores integrados en entornos del mundo real se convierten en un activo clave [2]. La disponibilidad de múltiples tipos de datos puede aprovecharse para aumentar la transparencia, promover la participación ciudadana y estimular la creación de nuevos servicios basados en la información proporcionada por el IoT. Sin embargo, además de los desafíos técnicos, la adopción del paradigma de IoT muchas veces se ve obstaculizada por la falta de un modelo de negocio claro y ampliamente aceptado que atraiga inversiones para impulsar la implementación de estas tecnologías [19]. En este contexto complejo, la aplicación del paradigma del IoT en las ciudades resulta particularmente interesante y desafiante, ya que responde al fuerte impulso de muchos gobiernos nacionales para adoptar soluciones TICs en la gestión de asuntos públicos. Esto da vida al concepto de “Smart City” y hace que la aplicación de IoT en las ciudades sea especialmente atractiva para las administraciones, que pueden desempeñar un papel fundamental como catalizadores para la adopción del paradigma de IoT a una escala más amplia [20]. A través del monitoreo preciso, la gestión eficaz de recursos y la promoción de la movilidad sostenible, el IoT emerge como un elemento central en la creación de ciudades más limpias, verdes y habitables. Sensores estratégicamente ubicados en áreas urbanas, periurbanas y rurales tienen la capacidad de medir una amplia gama de parámetros, desde la calidad del aire y el agua hasta los niveles de ruido, temperatura,

humedad y otros factores. Estos datos esenciales respaldan la toma de decisiones informadas destinadas a mejorar la calidad de vida de las personas, mantener el equilibrio de la biodiversidad, reducir la contaminación y abordar con inteligencia los desafíos del cambio climático.

1.1.3 Agroquímicos: desafíos tecnológicos en la agroindustria y su impacto en las “Smart Cities”

La agroindustria, un componente clave de la economía global, desempeña un papel esencial en la producción de alimentos y materias primas agrícolas. Sin embargo, su expansión ha planteado cuestiones significativas en lo que respecta a la contaminación ambiental y los impactos negativos en la salud de las personas, la flora, la fauna y el equilibrio ambiental. La agroindustria se ha expandido enormemente en las últimas décadas para satisfacer la creciente demanda de alimentos y productos agrícolas. Esta expansión ha llevado a la intensificación de la agricultura, con prácticas como los monocultivos, el uso intensivo de agroquímicos y la cría intensiva de ganado. Si bien esto ha aumentado la producción, también ha dado lugar a efectos adversos significativos en el medioambiente y la salud humana.

La agricultura moderna y el agronegocio desempeñan un papel fundamental en la producción de alimentos a nivel mundial. Sin embargo, y tal como se ha explicado, esta actividad también ha generado desafíos significativos en términos de contaminación [28], especialmente en áreas periurbanas y rurales de las ciudades y pueblos. Uno de los principales factores de contaminación asociados al agronegocio es el uso intensivo de agroquímicos, que incluyen herbicidas, fungicidas, insecticidas, fertilizantes, entre otros. Los agroquímicos se utilizan para aumentar la productividad agrícola y garantizar la disponibilidad de alimentos para las poblaciones urbanas en crecimiento. Sin embargo, su uso indiscriminado y la dispersión incontrolada de estos productos químicos han dado lugar a problemas ambientales y de salud pública en las ciudades [29]. El Pesticide Atlas [30] ofrece una perspectiva profunda sobre la preocupante problemática del uso de agroquímicos en la agricultura contemporánea. Publicado por primera vez en 2017, la edición 2022 presenta estadísticas alarmantes, ya que informa que el uso global de agroquímicos creció un 80% desde 1990, y en 2023 el mercado mundial alcanzará los 130.000 millones de dólares. En algunas regiones del planeta el incremento en su uso es preocupante, como en Latinoamérica (+484 %) y Asia (+97 %), entre el periodo 1990 y 2017 [30]. El Pesticide Atlas 2022 también exhibe que en 2020 los agroquímicos fueron responsables de 11.000 muertes humanas anuales por envenenamiento, y 385 millones de personas cada año presentan cuadros de envenenamiento leves o graves (Fig. 2). En cuanto a las muertes humanas por exposición crónica, UNHRC (United Nations Human Rights Council) estimó en 200.000 muertes por año [31]. Por su parte, la FAO (Food and Agriculture Organization) estima que el uso mundial de los agroquímicos alcanzó los 4.1 millones de toneladas en 2018 [32].

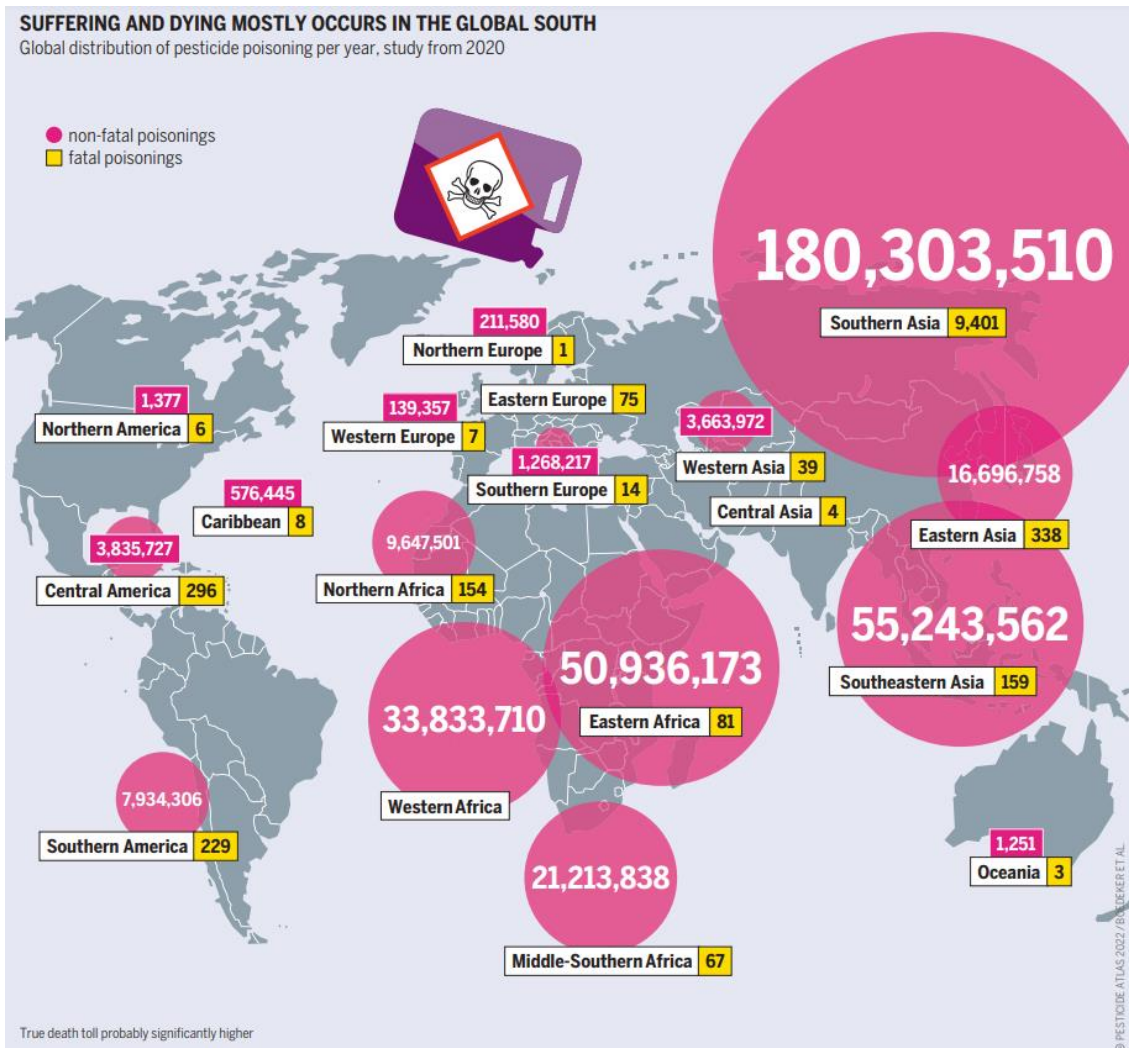


Fig. 2 Distribución global de intoxicaciones y muertes por agroquímicos (Pesticide Atlas, estudio de 2020) [30]

El fenómeno de la contaminación por agroquímicos se manifiesta y tiene impacto negativo en varias dimensiones ambientales. Uno de los impactos más notables es la contaminación del agua. El abastecimiento de agua es esencial para la vida en el ámbito urbano. Sin embargo, se estima que alrededor del 80% de las aguas residuales a nivel global se vierten al medioambiente, mayoritariamente sin tratamiento previo, lo que contamina ríos, lagos y océanos [24]. El agua insalubre cobra más vidas cada año que la guerra y todas las otras formas de violencia combinadas [25]. En contraposición, las fuentes de agua potable son escasas, representando menos del 1% del total de agua dulce disponible en la Tierra para consumo humano [26], [27]. En el contexto agroindustrial, el IWMI (International Water Management Institute) y la FAO han realizado un estudio global sobre cómo la agricultura afecta a la calidad del agua. En dicho informe se expone que, en la mayoría de los países ricos o emergentes, la agricultura es responsable del 70% de las extracciones de agua en el mundo, y ha superado a la industria y los centros urbanos como el principal factor en la degradación de las aguas debido al vertido de químicos, materia orgánica, sedimentos, nitratos, patógenos y otras sustancias. Según el informe, el

38% de las masas de agua en la Unión Europea están bajo la presión de la contaminación agrícola, en Estados Unidos la agricultura es la principal causa de polución en ríos y arroyos, la segunda en humedales y la tercera en lagos, y en China esta actividad está detrás de casi todas las aguas subterráneas contaminadas por nitrógeno [33], [34]. Los fertilizantes y demás agroquímicos utilizados en la agricultura pueden lixiviar en el suelo y contaminar las fuentes de agua subterránea y superficial [35]. Como consecuencia de ello, esto puede tener consecuencias negativas, a corto y largo plazo, para la salud humana y para los ecosistemas acuáticos [36].

En relación con la calidad del aire, la OMS (Organización Mundial de la Salud) estima que anualmente se registran más de 13 millones de fallecimientos atribuibles a factores medioambientales prevenibles [21]. Prácticamente la totalidad de la población mundial (99%), se encuentra expuesta a niveles de contaminación del aire que superan los rigurosos estándares de calidad del aire establecidos por la OMS. Estos niveles constituyen una amenaza latente para la salud humana, como lo corroboran los datos más recientes derivados de la actualización de su base de datos sobre la calidad del aire en 2022 [22], [23]. En 2019, la OMS alertó que la contaminación del aire exterior fue responsable de más de 4.2 millones de muertes prematuras al año [37]. La transformación de zonas boscosas en tierras de cultivo, liberando CO₂, junto con la quema de desechos agrícolas y combustibles fósiles, como el metano generado por el ganado, son prácticas habituales de la agroindustria. Esto contribuye al cambio climático y la mala calidad del aire, lo que puede tener efectos adversos en la salud respiratoria de las personas. Otro factor que contribuye, desde la agroindustria, a la contaminación ambiental es la aplicación de agroquímicos, durante la cual, pueden liberarse al aire partículas finas y vapores (deriva) que contienen estas sustancias químicas tóxicas. La deriva es la difusión y transporte por el viento de los agroquímicos que han sido volatilizados durante su pulverización, y que pueden llegar con facilidad a pueblos y ciudades. Técnicamente, se denomina deriva al desplazamiento de la aspersión de un agroquímico fuera del blanco, determinado por transporte de masas de aire o por falta de adherencia, y tienen la capacidad de recorrer distancias considerables [88]. Estos compuestos tienen la capacidad de infiltrarse en acuíferos subterráneos, seguir cursos de agua fluvial, caer con las precipitaciones pluviales, dispersarse con partículas de polvo ambiental y adoptar diversas vías hasta llegar a pueblos y ciudades [81]. En consecuencia, estos compuestos pueden afectar la calidad del aire, lo que representa un importante riesgo para la salud respiratoria de la población y el medioambiente [38]. El uso excesivo de los agroquímicos también puede dar lugar a la acumulación de nutrientes en el suelo, lo que a su vez puede afectar negativamente la calidad de este y la biodiversidad. Además, la presencia de residuos de estos químicos en el suelo puede tener efectos perjudiciales a largo plazo [39], [40]. En el caso de los alimentos, los residuos de agroquímicos pueden persistir en los alimentos y productos agrícolas que se consumen en las ciudades. Esto plantea cuestiones sobre la seguridad alimentaria y la exposición crónica a sustancias químicas potencialmente dañinas [41]. La contaminación por agroquímicos también tiene implicaciones para la biodiversidad, el equilibrio ecológico [42], [43], y la

posibilidad en el incremento de plagas e insectos vectores de enfermedades perjudiciales para la salud humana [44]-[55]. La exposición a estos contaminantes representa un grave riesgo para los mamíferos, que desempeñan un papel crucial en el equilibrio de los ecosistemas naturales, ya que influye en su salud reproductiva, las funciones neuro comportamentales, la aparición de enfermedades y la mortalidad directa [56], [57]. En lo que respecta a las aves, en Estados Unidos se calcula que alrededor de 672 millones de ellas se ven expuestas anualmente a agroquímicos en zonas agrícolas. De este número, se estima que un 10%, lo que equivale a unos 67 millones de aves, pierden la vida debido a la ingestión de pesticidas. Sin embargo, este cálculo conservador se limita a las aves que residen en áreas agrícolas y únicamente incluye a las aves que han fallecido exclusivamente a causa de la ingesta de estos productos químicos. La cifra total de fatalidades aviares atribuibles a agroquímicos es sumamente compleja de determinar, ya que muchas de estas muertes pasan desapercibidas [58]. Estos problemas ambientales y de salud pública subrayan la importancia de encontrar enfoques más sostenibles para la agricultura y la gestión de agroquímicos, especialmente en el contexto de las ciudades en crecimiento.

Otro factor crucial se relaciona con la conciencia, información y preocupaciones de los futuros ciudadanos respecto al uso de agroquímicos en la agricultura y el impacto en las ciudades. El Pesticide Atlas 2022, basado en datos recopilados en 2021 [30], destaca la inquietud de la generación joven en Alemania con respecto al uso de agroquímicos en la agricultura. La encuesta, dirigida a 1.131 jóvenes de 16 a 29 años, resalta la falta de diferencias significativas en sus percepciones entre áreas urbanas, rurales y niveles educativos. La sostenibilidad emerge como una preocupación central para todos, generando un llamado de acción a los políticos y demandando un mayor énfasis en la gestión ecológica de los campos, así como un apoyo reforzado para los agricultores. Los resultados sobresalientes de la encuesta revelan una elevada conciencia entre los jóvenes sobre los riesgos asociados al uso de agroquímicos en la agricultura (Fig. 3). Aproximadamente dos tercios de los encuestados expresan preocupación ambiental, especialmente en relación con el impacto en la protección del agua, el aire y los suelos. La amenaza a la biodiversidad, en particular la disminución de insectos polinizadores y especies de aves genera inquietud. A pesar del claro respaldo a soluciones biológicas para la protección de cultivos, se observa escepticismo hacia tecnologías agrícolas emergentes, como robots autopropulsados y aplicaciones precisas de agroquímicos. La percepción negativa de la industria de agroquímicos contrasta con la imagen positiva de la agricultura orgánica, considerada como sostenible y moderna. Los desafíos que enfrentan los agricultores, con un 70% que considera difícil operar bajo las condiciones actuales, generan dudas sobre la capacidad de la industria para resolver problemas, contribuyendo a un ambiente de desconfianza. Además, casi el 75% de los encuestados aboga por la reducción del uso de agroquímicos, respaldando así la relevancia de las soluciones tecnológicas digitales en entornos urbanos inteligentes para abordar los desafíos medioambientales en la agricultura.

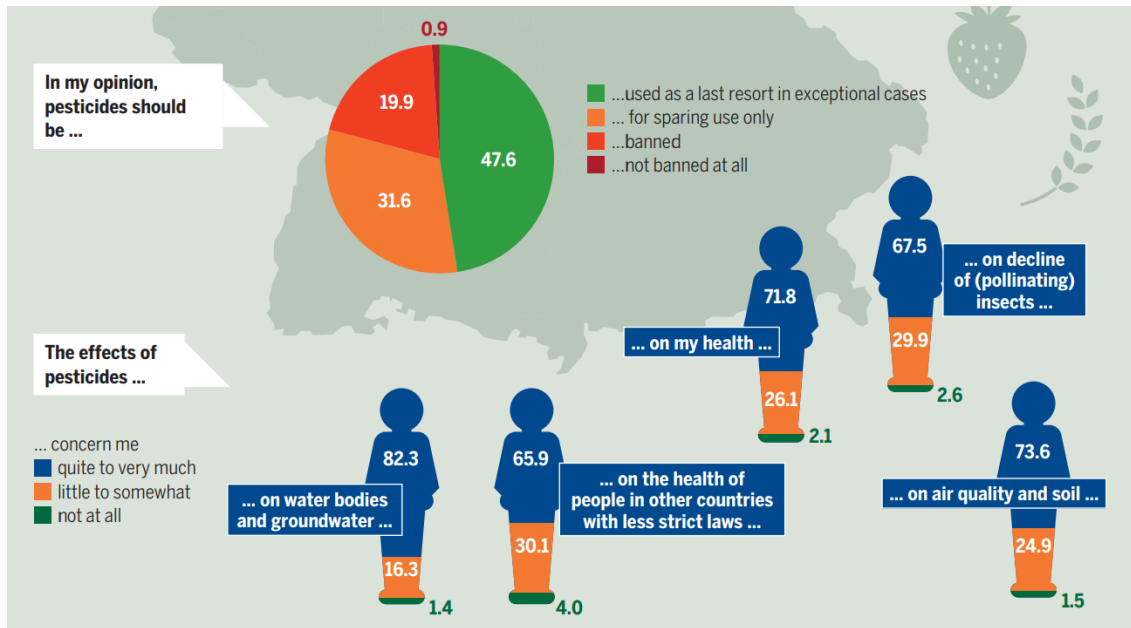


Fig. 3 Extracto de una encuesta a jóvenes alemanes sobre los agroquímicos en 2021, resultados en porcentaje [30]

En base a lo visto en este apartado, es evidente la importancia de abordar los problemas de contaminación por agroquímicos a través de prácticas agrícolas más responsables, regulaciones más estrictas, capacitación, educación, transparencia y fundamentalmente, la adopción de TICs que permitan visibilizar y controlar la contaminación. En este sentido, el IoT ofrece una solución efectiva al permitir el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua, el suelo, el aire y otras variables en áreas agrícolas o rurales, que finalmente tienen impacto en las áreas periurbanas y urbanas de las ciudades y pueblos. Los sensores y dispositivos conectados tienen el potencial de detectar y medir la presencia de agroquímicos y otros contaminantes, lo que podría permitir una respuesta inmediata a eventos de contaminación y reducir los riesgos para la salud y el medioambiente. El IoT ofrece una amplia gama de ventajas y tiene el potencial de evitar un mayor deterioro de nuestro planeta. Aunque esta tecnología ha impulsado avances significativos en la protección del medioambiente, aún hay mucho por investigar, descubrir y desarrollar. Todo indica que la humanidad se encamina hacia un mundo altamente conectado en el que la tecnología puede proporcionar soluciones sostenibles para mejorar la calidad de vida de todos.

1.2 Desafíos, objetivos y cuestiones de investigación

Esta tesis doctoral aborda tres desafíos ambientales significativos y entrelazados, cada uno de ellos vinculado a un trabajo de investigación específico. Estos desafíos están estrechamente relacionados por la influencia de la contaminación generada por agroquímicos en el contexto agroindustrial, con un impacto considerable en las “Smart Cities”. El primer desafío se encuentra en el dominio del agua, el segundo en el aire y el tercero, como consecuencia y sinergia entre estos dos, así como de otros aspectos que se profundizarán durante esta tesis, la proliferación de insectos vectores que transmiten

enfermedades humanas. Estas cuestiones poseen una significativa trascendencia tanto para la salud humana como para el entorno ambiental, abarcando la alteración de su equilibrio ecológico. En este sentido, el objetivo central de esta tesis doctoral es proponer para cada uno de los desafíos planteados, tres desarrollos tecnológicos basados en IoT, con el objetivo principal de contribuir con soluciones que mejoren la situación actual que enfrentan millones de personas y ecosistemas afectados por la contaminación de agroquímicos (Fig. 4).

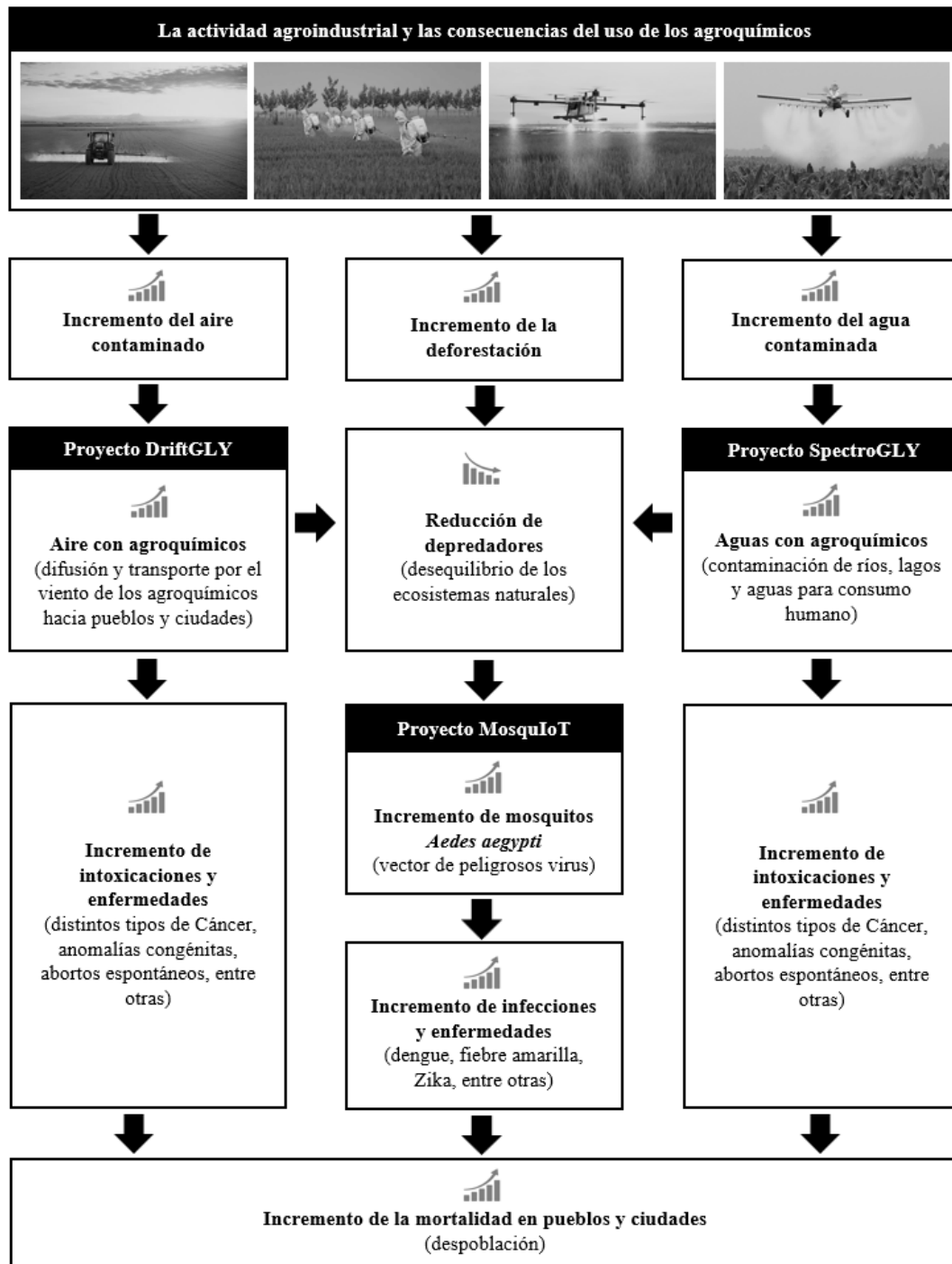


Fig. 4 Propuestas tecnológicas dentro de las dimensiones ambientales afectadas por los agroquímicos

El primer desafío está relacionado con la contaminación causada por agroquímicos en entornos acuáticos, que engloba desde cuerpos de agua, como ríos y lagos, hasta fuentes de suministro de agua destinadas al consumo humano en ciudades o pueblos. Esta problemática surge debido a la persistencia de residuos de agroquímicos que resultan de las actividades agrícolas. La contaminación del agua en estos contextos está emergiendo como una cuestión de gran relevancia que demanda atención inmediata [59]-[71]. En diversas naciones se ha detectado la presencia de agroquímicos en aguas subterráneas y superficiales [72]-[76]. Con relación a esta problemática, algunos trabajos científicos [77], [78], [79] manifiestan una creciente inquietud en torno a los riesgos que plantea para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, ya que, incluso en concentraciones diminutas, los agroquímicos pueden infligir daños considerables, lo que los convierte en un genuino problema de salud pública y para el medioambiente (Fig. 5).



Fig. 5 Peces del río Salado (Argentina) con el nivel de agrotóxicos más alto del mundo [4].

El segundo desafío se enfoca en la contaminación del aire en el ámbito agroindustrial, la cual principalmente proviene de la aplicación de agroquímicos, generando derivas (Fig. 6), que constituyen una amenaza significativa tanto para la salud humana como para los ecosistemas naturales [80]. Los agroquímicos, caracterizados por su limitada capacidad de biodegradación, manifiestan una notoria persistencia en el entorno, suelen acumularse en los seres vivos y pueden transportarse a largas distancias [82]. Además, por lo general, se encuentran en concentraciones relativamente bajas, lo que acentúa la importancia de contar con métodos tempranos y selectivos de detección. Monitorizar de forma activa las derivas de agroquímicos es de vital importancia para la salud de los ciudadanos y el medioambiente.



Fig. 6 Fumigaciones terrestres y aéreas en el contexto agroindustrial [178].

El tercer desafío que se plantea está estrechamente relacionado con la expansión de las áreas destinadas a la agricultura por parte de la agroindustria. La deforestación, que es el proceso inicial de esta expansión, no solo resulta en la contaminación del agua y del aire debido al uso de agrotóxicos cuando se establece esta actividad en dicho contexto, sino que también suprime a depredadores naturales y altera el equilibrio de los ecosistemas naturales [49], [50]-[54], [83], [84]. Este proceso da lugar a un notable aumento en la población de vectores, principalmente los mosquitos (Fig. 7), que actúan como portadores de graves enfermedades humanas como por ejemplo dengue, fiebre amarilla, chikungunya, Zika y otras [44]-[49], [55]. Esta proliferación de vectores está íntimamente relacionada con la evolución de la resistencia a los agroquímicos en organismos, tanto en aquellos que son objetivos como en aquellos que no lo son [85]. Un estudio exhaustivo llevado a cabo por el Colegio de Médicos de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, ha investigado a fondo el impacto de los agroquímicos y revela cómo estos han contribuido a la eliminación de depredadores naturales, lo que ha dado lugar a que las plagas carezcan de competencia y, como resultado, se reproduzcan de manera más intensa [55]. Las propiedades biocidas de los agroquímicos afectan negativamente la diversidad biológica de la fauna y la flora. Como se puede observar, la compleja interacción de estos factores afecta de tal manera, que la intensa e indiscriminada utilización de insecticidas y herbicidas en la agricultura ha propiciado la aparición de la resistencia en una amplia variedad de organismos, planteando retos significativos en el control de plagas y suscitando inquietudes tanto en el ámbito ambiental como en el de la salud pública.



Fig. 7 *Aedes aegypti*, mosquito vector de enfermedades [179]

El objetivo fundamental de esta tesis doctoral surge de la imperiosa necesidad de impulsar avances y desarrollos tecnológicos que aporten posibles soluciones a los graves problemas de contaminación comentados anteriormente, con el propósito de fomentar la sostenibilidad agroambiental y mejorar la calidad de vida en el contexto de las “Smart Cities”. Después de llevar a cabo una exhaustiva revisión del estado del arte respecto al objetivo general de esta tesis doctoral, se han establecido de manera definitiva los siguientes tres objetivos parciales o secundarios, que contribuyen al cumplimiento del objetivo principal junto con sus correspondientes interrogantes de investigación.

1.2.1 Objetivo 1: Proyecto SpectroGLY

El glifosato, un herbicida post-emergente sistémico no selectivo, ostenta la distinción de ser el agroquímico más ampliamente empleado en el ámbito agroindustrial a nivel global [86], [87]. El fenómeno de la contaminación de cuerpos de agua con glifosato se alza como una problemática de salud pública que demanda atención prioritaria. La razón de esta urgencia radica en la potencial amenaza que implica la presencia de este herbicida, el cual, debido a su elevada solubilidad en agua, puede introducirse en ecosistemas acuáticos mediante diversos mecanismos, tales como fumigaciones accidentales, derivas o fugas. Los expertos científicos manifiestan un creciente grado de inquietud respecto a la exposición humana al glifosato y los riesgos conexos que plantea para la salud. Incluso en concentraciones mínimas, este compuesto tiene la capacidad de causar daños significativos. Sin embargo, la detección de residuos de glifosato en fuentes de agua no se traduce en una tarea de ejecución sencilla, dado que requiere el empleo de instrumentación compleja y costosa, así como la intervención de personal altamente capacitado [87]. Por consiguiente, es imperativo abordar con celeridad esta cuestión, no solo en aras de preservar la integridad de los ecosistemas acuáticos, sino también para salvaguardar la salud pública frente a los posibles efectos adversos asociados a la exposición al glifosato [86].

En el contexto presentado, se plantea como objetivo la creación de herramientas tecnológicas novedosas, fundamentadas en metodologías analíticas probadas, pero también caracterizadas por su rentabilidad, agilidad y facilidad de uso tanto en entornos

de campo como en laboratorios. Estas herramientas estarán habilitadas por capacidades de conectividad avanzadas y aplicaciones de software multiplataforma. En particular, se plantea como primer objetivo el diseño y desarrollo de una solución tecnológica innovadora denominada “SpectroGLY”, que consistirá en un espectrómetro de bajo coste y operativo en el rango espectral VIS-NIR (Visible-Near-Infrared). Este dispositivo estará basado en tecnologías IoT y tendrá como finalidad la detección de posibles niveles de contaminación por glifosato en fuentes de agua. Este dispositivo deberá fusionar el concepto funcional de un espectrómetro de laboratorio convencional con la visión tecnológica del IoT, permitiendo la integración de diversas opciones de conectividad, y plataformas de monitoreo y visualización digital. Gracias a su portabilidad y capacidad de funcionamiento en diversos contextos, SpectroGLY deberá ofrecer resultados en pocos minutos. Además, con su utilización, se buscará prescindir de la necesidad de trasladar las muestras a los laboratorios especializados, lo que permitirá optimizar significativamente los plazos, reduciendo los costes asociados y agilizando la capacidad de respuesta de las autoridades en términos de acciones correctivas. En definitiva, esta solución innovadora y de gran versatilidad, deberá erigirse como una herramienta altamente prometedora en la prevención de posibles intoxicaciones derivadas del consumo de agua potencialmente contaminada por dicho herbicida.

Para realizar el estudio que plantea este objetivo es necesario plantear las siguientes cuestiones de investigación (CIs):

- CI-1.1: ¿Es viable la detección de residuos de glifosato utilizando un dispositivo IoT económico, ágil y versátil, mediante la aplicación de tecnologías derivadas de laboratorios especializados en esta disciplina?
- CI-1.2: ¿Qué técnicas analíticas quimiométricas empleadas por laboratorios especializados son susceptibles de incorporarse y fusionarse con SpectroGLY para la medición y evaluación de la concentración de residuos de glifosato en muestras de agua?
- CI-1.3: ¿Es factible equipar a un dispositivo IoT con un ecosistema digital que le permita al usuario llevar a cabo mediciones de la concentración de residuos de glifosato en muestras de agua, tanto en ambientes de laboratorio como en campo, con la capacidad de obtener resultados en cuestión de minutos?

Considerando las CIs previamente establecidas y con el propósito de obtener respuestas a las mismas, se delimitan a continuación los siguientes sub-objetivos:

- Sub-objetivo 1.1 | Glifosato en agua: Perspectivas analíticas y tecnológicas
Realización de un análisis exhaustivo de la problemática actual relacionada con la contaminación de fuentes de agua por el herbicida glifosato. Revisión de los métodos

analíticos vigentes para la detección del glifosato y evaluación técnica de los sistemas tecnológicos digitales utilizados en este contexto. También se llevará a cabo un análisis para realizar el dimensionamiento de un semáforo digital que facilite la identificación de diferentes concentraciones de residuos de glifosato en aguas. La aplicación práctica de estos conocimientos se centrará en la búsqueda y selección de tecnologías de sensores para la detección de glifosato en fuentes de agua.

- Sub-objetivo 1.2 | Hardware

Diseño, desarrollo y calibración de SpectroGLY, un dispositivo IoT que deberá ser de bajo coste, portátil, de fácil manejo y tamaño compacto basado en metodologías analíticas probadas por la comunidad científica. SpectroGLY deberá disponer de un semáforo digital que permita medir a través de los sensores seleccionados diferentes rangos de concentración de residuos de glifosato en aguas. SpectroGLY deberá soportar dos opciones de alimentación, ya sea a través de la red eléctrica convencional y mediante baterías. Teniendo en cuenta que SpectroGLY deberá operar en entornos rurales, periurbanos y urbanos, deberá soportar las conectividades WiFi (Wireless Fidelity) y LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [138].

- Sub-objetivo 1.3 | Arquitectura del sistema

Diseño, desarrollo e implementación de una arquitectura de carácter multiplataforma, conformada por una aplicación móvil, una plataforma IoT y un MW (MiddleWare) LoRaWAN. Estos elementos deberán sincronizarse de manera sinérgica con SpectroGLY, con el propósito de analizar las muestras de agua, sin importar el contexto de medición. Esta arquitectura deberá asegurar que los resultados obtenidos sean susceptibles de un procesamiento eficiente, de fácil utilización y de rápida visualización. Gracias a la arquitectura propuesta, SpectroGLY deberá permitirle al usuario del sistema obtener los resultados de sus muestras en minutos, evitando que dichas muestras tengan que ser trasladadas al laboratorio para su evaluación y diagnóstico.

- Sub-objetivo 1.4 | Validación

Conforme al diseño, desarrollo y calibración de SpectroGLY, se deberá llevar a cabo un proceso de validación para confirmar su adecuado funcionamiento. Para reforzar aún más la evidencia de su rendimiento, se incluirá en este estudio un espectrómetro de laboratorio de alta resolución que permitirá comparar y verificar los resultados obtenidos por SpectroGLY.

1.2.2 Objetivo 2: Proyecto DriftGLY

Tal como se ha evidenciado en los anteriores apartados, los agroquímicos son responsables de la intoxicación de millones de personas en todo el mundo y como

consecuencia de su exposición aguda y crónica, se producen miles de muertes [31], [83]. La presencia de agroquímicos en el aire se debe a la existencia del fenómeno de las derivas, que tienen origen en las pulverizaciones terrestres y aéreas aplicadas en campos dedicados a la agroindustria. El porcentaje de una aplicación de agroquímicos que puede derivar podría alcanzar valores de hasta el 90% del producto arrojado sobre los cultivos [89]. En promedio, se calcula que aproximadamente un 25% de las pulverizaciones da en el blanco, pero el resto afecta directamente a otros actores hacia los cuales las aplicaciones no fueron dirigidas [90]. Con respecto a las metodologías para aplicar agroquímicos, se puede nombrar la tradicional terrestre que se realiza con el uso de una mochila y pulverizador manual, a través de vehículos autopropulsados o propulsados por otra máquina y la aérea, que se hace mediante drones o aviones. Debido a la menor capacidad de carga de estos últimos, respecto a las pulverizadoras terrestres, la concentración del agroquímico que se arroja es 4 veces mayor, y en ello, las gotas que se arrojan pueden ser hasta 1/8 de veces más pequeñas que las producidas por pulverizadoras terrestres [91]. Estas condiciones sumadas a la mayor altura de aspersión producen que una fracción considerable de los agroquímicos arrojados desde aviones volatilice completamente sin tocar suelo, o viaje distancias mayores por deriva de gota, aumentando la probabilidad que se generen derivas. Debido a estas características, las aplicaciones aéreas producen mayores derivas que las terrestres [81]. En la actualidad, la mayoría de los sistemas empleados para el monitoreo de contaminantes en el aire, incluyendo agroquímicos, son analógicos. Aquellos que han avanzado hacia la digitalización a menudo resultan costosos, complejos, genéricos y poco adaptables a diversos contextos [92]-[105]. Dado el amplio espectro de agroquímicos disponibles en el mercado, este estudio se enfocará en dos de los herbicidas más utilizados en la agroindustria, el 2,4-D [106] y el glifosato [107], tanto individualmente como en combinación (cóctel), con el objetivo de evaluar su presencia en forma particulada y en las fases gaseosas, y líquida. El cóctel de glifosato y 2,4-D se utiliza ampliamente en la agroindustria debido a su eficaz desempeño en el control de malezas indeseables [108]. Sin embargo, también se han demostrado sus potenciales efectos adversos sobre la salud humana y el medioambiente [109], [110].

Considerando el impacto significativo y perjudicial de los agroquímicos, y las actuales limitaciones tecnológicas, logísticas y económicas en cuanto a los sistemas mencionados que permitan una eficiente monitorización de los agroquímicos en el aire, se plantea como segundo objetivo de la tesis, la concepción y desarrollo de un sistema innovador y de bajo coste llamado “DriftGLY”, basado en la tecnología IoT, y diseñado para realizar el monitoreo continuo y automatizado de agroquímicos en el aire. Desde el punto de vista funcional, el objetivo central de DriftGLY será transformar los sistemas de monitoreo existentes a través de la implementación de una solución integral basada en el concepto de un centinela digital de alerta temprana. En el ámbito de la conectividad IoT, DriftGLY ofrecerá diversas opciones para operar tanto en entornos urbanos como rurales, habilitando así el monitoreo automático de la contaminación del aire por agroquímicos.

En términos de detección, DriftGLY detectará agroquímicos en el aire mediante un sistema de recolección de muestras que permitirá la medición en forma de material particulado, fase gaseosa y líquida. Este sistema integrado en DriftGLY posibilitará diagnosticar niveles de contaminación en el borde y expresarlos a través de un sistema de semáforo digital, cuyo dimensionamiento se basará en los valores de la tasa de dosis de los agroquímicos seleccionados para el estudio (productos previamente homologados por autoridades y fabricantes). Además de la transmisión de niveles de contaminación a través de los estados de su semáforo digital, DriftGLY enviará metadatos complementarios a una plataforma IoT para su posterior visualización y análisis. Simultáneamente, con el objetivo de mantener una conexión directa con la comunidad, DriftGLY compartirá actualizaciones en tiempo real mediante publicaciones en su cuenta de X [111], proporcionando información pertinente sobre eventos significativos en cada contexto de monitoreo.

Para realizar el estudio que plantea este objetivo es necesario plantear las siguientes cuestiones de investigación (CIs):

- CI-2.1: ¿Existen técnicas y tecnologías de medición que permitan el monitoreo de agroquímicos en el aire, tanto de forma individual como en cóctel utilizando un dispositivo IoT que utilice un semáforo digital dimensionado en función de los valores de la tasa de dosis de agroquímicos depositados en los tanques de pulverización?
- CI-2.2: Además de detectar y monitorear los agroquímicos en el aire en forma particulada y en fase gaseosa, como lo hacen algunos sistemas tradicionales, ¿sería factible diseñar un sistema de colectado y conversión que permita la captura de muestras en fase líquida para luego transformarlas en fase gaseosa, con el propósito de medirlas como lo hacen los sistemas tradicionales y luego transmitir las a las plataformas digitales mencionadas?
- CI-2.3: ¿Es posible dotar a un dispositivo IoT de un ecosistema digital que permita a las autoridades y a los ciudadanos obtener información en tiempo real sobre la potencial contaminación del aire causada por agroquímicos?

Considerando las CIs previamente establecidas y con el propósito de obtener respuestas a las mismas, se delinearán a continuación los siguientes sub-objetivos:

- Sub-objetivo 2.1 | Agroquímicos en el aire: Perspectivas analíticas y tecnológicas
Análisis exhaustivo de la contaminación de agroquímicos en el aire, especialmente a través del fenómeno de las derivas, evaluando sus impactos en la salud pública y el medio ambiente. Abordaje al contexto agroindustrial, investigando las causas, consecuencias, actores involucrados y variables que afectan las derivas de

agroquímicos. Además, se analizarán los sistemas tecnológicos actuales utilizados para detectar y monitorear agroquímicos en el aire, considerando metodologías, costes y logística asociadas. También se estudiará y dimensionará un semáforo digital basado en valores de tasa de dosis de herbicidas seleccionados. Por último, se llevará a cabo la búsqueda y selección de sensores y actuadores para detectar y monitorear la presencia de los agroquímicos seleccionados.

- Sub-objetivo 2.2 | Hardware

Diseño, desarrollo y calibración DriftGLY, un dispositivo IoT de alerta temprana que deberá ser de bajo coste, autónomo y resistente, diseñado para el monitoreo continuo y automatizado de la presencia de agroquímicos en el aire en diversos entornos, que abarcan zonas rurales, periurbanas y urbanas de pueblos y ciudades. DriftGLY deberá estar equipado con una variedad de sensores y actuadores para detectar los herbicidas 2,4-D y glifosato, tanto de forma individual como en combinación (cóctel), en su forma particulada, fases gaseosa y líquida. El dispositivo deberá evaluar los niveles de contaminación de agroquímicos en el borde y los representará a través de un semáforo digital basado en los valores de la tasa de dosis mínima y máxima (litros/hectárea) de los dos herbicidas seleccionados. En materia conectividad IoT, DriftGLY deberá ofrecer múltiples opciones adecuadas para operar en los entornos urbanos, periurbanos y rurales, como WiFi, LoRaWAN y GSM/GPRS (Global System for Mobile Communications / General Packet Radio Services).

- Sub-objetivo 2.3 | Arquitectura del sistema

Diseño, desarrollo e implementación de una arquitectura multiplataforma que incluya una aplicación móvil, una plataforma IoT, un MW LoRaWAN y la integración con la red social X. Estos elementos deberán operar de manera sinérgica con DriftGLY para analizar muestras de aire en diversos contextos de medición. Esta arquitectura deberá garantizar la eficiencia en el procesamiento, la facilidad de uso y la visualización rápida de los resultados. Los usuarios del sistema deberán obtener los resultados de sus muestras en tiempo real, evitando la necesidad de transportarlas al laboratorio, lo que optimizará tiempos y costes.

- Sub-objetivo 2.4 | Validación

En concordancia con el diseño, desarrollo y calibración de DriftGLY, se deberá llevar a cabo un proceso de validación para confirmar el correcto funcionamiento del dispositivo mediante un conjunto de muestras de prueba. Para reforzar la evidencia de su rendimiento, se deberá realizar un análisis adicional de las muestras de prueba (previamente validadas por DriftGLY) en un laboratorio especializado. Los resultados de este análisis se compararán con los resultados obtenidos por DriftGLY para verificar su correcto funcionamiento.

1.2.3 Objetivo 3: Proyecto MosquIoT

La contaminación del agua y del aire por causa de los agroquímicos, junto con la deforestación relacionada con la actividad agroindustrial, conlleva la disminución de los depredadores naturales en los ecosistemas, incluyendo anfibios y peces, lo que altera el equilibrio natural y resulta en un aumento significativo de la población de mosquitos. Estos mosquitos actúan como vectores de graves enfermedades humanas. La reducción de los depredadores naturales ha llevado a la falta de competencia de las plagas, lo que ha resultado en una reproducción más intensa y una creciente preocupación en términos de salud pública, especialmente en áreas urbanas y periurbanas de las ciudades. Cada año, más de 500 millones de personas, son infectadas por enfermedades transmitidas por mosquitos, y más de tres millones de ellas mueren debido a estas infecciones [112]. En la actualidad, aproximadamente la mitad de la población mundial, es decir, alrededor de 3.500 millones de personas, se encuentra en riesgo de contraer enfermedades transmitidas por mosquitos. Los mosquitos, que pueden ser antropófilos y portadores de virus, protozoos y nematodos, son agentes altamente eficientes y móviles para la transmisión de enfermedades peligrosas entre las poblaciones humanas. Entre las especies más peligrosas de mosquitos antropófilos se encuentra el *Aedes aegypti*, que es el principal vector de virus como el dengue, la fiebre amarilla, el chikungunya, el Zika, entre otros [113], [114], [115].

La vigilancia entomológica desempeña un papel fundamental en la erradicación del mosquito *Aedes aegypti*. Sin embargo, el enfoque tradicional de esta herramienta de seguimiento es manual y carece de una dimensión digital que pueda mejorar la toma de decisiones por parte de las autoridades, agilizar la planificación, acelerar la ejecución y optimizar la gestión de recursos disponibles. En el contexto de las campañas actuales de vigilancia entomológica, se emplea el método confiable y probado de la ovitrampa para detectar y cuantificar huevos de *Aedes aegypti*. Este método, utilizado por décadas, demuestra ser altamente sensible y eficaz para generar alertas tempranas. Para determinar la presencia de huevos, las ovitrampas se recogen siete días después de su instalación, y sus depresores linguales con los huevos se trasladan a laboratorios para su análisis, y en ese contexto se presentan costes de logísticas y pueden presentarse errores humanos en cuanto a la contaminación o pérdida de muestras.

En base a los fundamentos expuestos en los anteriores párrafos de este apartado, se plantea como tercer objetivo la concepción, diseño y desarrollo de nuevas herramientas tecnológicas para el monitoreo entomológico automatizado y autónomo de mosquitos *Aedes aegypti*, con un especial énfasis en la rentabilidad, confiabilidad y facilidad de implementación, respaldado por conectividad y aplicaciones de software multiplataforma. El tercer objetivo de la tesis se centrará en el diseño, desarrollo y validación de un sistema innovador denominado “MosquIoT”. Este sistema estará basado en las ovitrampas tradicionales e impulsado por las tecnologías IoT y TinyML (Tiny Machine Learning). La implementación de estas tecnologías dotará a MosquIoT de la

capacidad para llevar a cabo la detección y cuantificación de huevos de *Aedes aegypti*. En lo que respecta a la conectividad IoT, MosquIoT proporcionará diversas opciones, adaptándose tanto a entornos urbanos como rurales, donde la conectividad convencional puede ser limitada en ocasiones. Además, la arquitectura del sistema MosquIoT ofrecerá plataformas digitales de monitoreo, visualización y configuración, que incluirán una plataforma IoT y una aplicación móvil. Esta solución tendrá el potencial de contribuir a la comprensión dinámica del comportamiento de las poblaciones de *Aedes aegypti* en diferentes entornos, a través de una vigilancia automática y continua con una alta frecuencia de muestreo. A través de este enfoque, MosquIoT deberá demostrar que tiene el potencial necesario para proponer una transición del actual modelo de seguimiento entomológico reactivo tradicional a un modelo digital proactivo y predictivo.

Para realizar el estudio que plantea este objetivo es necesario plantear las siguientes cuestiones de investigación (CIs):

- CI-3.1: ¿Es factible desarrollar una nueva herramienta tecnológica que realice el monitoreo automatizado y autónomo de huevos de *Aedes aegypti* en diferentes contextos, con un enfoque confiabilidad, robustez y facilidad de implementación?
- CI-3.2: ¿Es factible sustituir las ovitrampas de funcionamiento manual por un sistema digital basado principalmente en tecnologías IoT y TinyML, con el fin de mejorar la eficiencia en la erradicación de este insecto vector de enfermedades, al mismo tiempo que se puedan optimizar tiempos, costes, recursos humanos y eliminar errores humanos involuntarios?
- CI-3.3: ¿Se puede dotar a un dispositivo IoT de un ecosistema digital que permita a las autoridades de control obtener información remota sobre el comportamiento dinámico de las poblaciones de *Aedes aegypti* y permita evolucionar el actual modelo de seguimiento entomológico reactivo hacia uno proactivo y predictivo?

Considerando las CIs previamente establecidas y con el propósito de obtener respuestas a las mismas, se delinean a continuación los siguientes sub-objetivos:

- Sub-objetivo 3.1 | Abordaje tecnológico a la problemática del *Aedes aegypti*
 Revisión exhaustiva de la problemática de los mosquitos *Aedes aegypti*, evaluando su impacto en la salud pública en diversas áreas. Análisis de los métodos actuales empleados en campañas de monitoreo entomológico, con especial énfasis en la detección y cuantificación de los huevos de estos mosquitos. Abordaje y análisis técnico de las ovitrampas tradicionales y manuales utilizadas en campañas de vigilancia entomológica. La investigación se deberá extender a los sistemas tecnológicos actuales para detectar y monitorear la actividad de oviposición del *Aedes aegypti*, incluyendo métodos analíticos y tipos de sensores utilizados. Por último, se realizará el estudio y diseño teórico para adaptar las ovitrampas

tradicionales mediante sensores, enfocándose exclusivamente en la detección y cuantificación de los huevos de *Aedes aegypti*.

- Sub-objetivo 3.2 | Hardware

Diseño, desarrollo y calibración de MosquIoT, un dispositivo IoT que deberá estar basado en las ovitrampas tradicionales. MosquIoT deberá estar orientado a la digitalización y automatización del monitoreo de la actividad de oviposición de las hembras de *Aedes aegypti*. Se realizará un plan de entrenamiento de un modelo desarrollado con un conjunto de muestras reales para detectar y cuantificar huevos de *Aedes aegypti* mediante técnicas de AI (Artificial Intelligence), visión artificial y redes neuronales. El propósito fundamental de MosquIoT se centrará en la realización de vigilancias entomológicas automáticas y continuas, caracterizadas por una elevada frecuencia de muestreo y la transmisión de mediciones, y metadatos a través de las conectividades WiFi y LoRaWAN. Estos datos se dirigirán hacia una plataforma en la nube, donde se exhibirá información relativa al comportamiento dinámico de estos insectos, habilitando su análisis subsiguiente por parte de las autoridades de control. En materia hardware, el objetivo principal se concentrará en el diseño y desarrollo de un prototipo inicial de MosquIoT para entorno de laboratorio, con el propósito de validar de manera empírica su capacidad para cumplir con las funcionalidades detalladas en esta sección.

- Sub-objetivo 3.3 | Arquitectura del sistema

Diseño, desarrollo e implementación una arquitectura multiplataforma que deberá incluir una aplicación móvil, una plataforma IoT y un MW LoRaWAN. Estos elementos deberán integrarse de forma sinérgica con el sistema MosquIoT, con el objetivo primordial de llevar a cabo la vigilancia de la actividad de oviposición de las hembras de *Aedes aegypti*, independientemente del contexto de medición, ya sea en áreas rurales, periurbanas o urbanas de pueblos o ciudades. Esta arquitectura habilitará a los usuarios del sistema a tener acceso a los resultados de los sitios de monitoreo. Esto conllevará a una optimización de recursos, costes y se traducirá en una valiosa herramienta digital de vigilancia entomológica correctiva y preventiva más eficaz y proactiva. Su propósito será abordar de manera más efectiva los graves problemas de salud pública ocasionados por estos insectos.

- Sub-objetivo 3.4 | Validación

En consonancia con el diseño y desarrollo de MosquIoT, se realizará el proceso de validación del modelo desarrollado, con un conjunto de muestras reales, donde se espera que los resultados del proceso de validación tengan una precisión de clasificación igual o superior al 80%. Para reforzar la evidencia de su correcto funcionamiento, se llevará a cabo una PoC (Proof of Concept), donde los resultados obtenidos se compararán con los observados a través de un microscopio de laboratorio.

1.3 Metodología, tareas y plan de trabajo

Con el propósito de establecer un plan de trabajo efectivo para alcanzar el objetivo principal de esta tesis doctoral, los objetivos parciales o secundarios y sus sub-objetivos definidos en la sección 1.2 se descomponen en tareas específicas. Esta descomposición facilita la identificación de los métodos de investigación adecuados para su implementación y la planificación temporal.

1.3.1 Objetivo 1: Proyecto SpectroGLY

1.3.1.1 Sub-objetivo 1.1 | Glifosato en agua: Perspectivas analíticas y tecnológicas

- Tarea 1.1-01: Estudio del estado del arte sobre la problemática de contaminación del herbicida glifosato en aguas y su impacto en la salud pública y medioambiente.
- Tarea 1.1-02: Estudio del estado del arte sobre los métodos analíticos quimiométricos utilizados para detectar glifosato en aguas.
- Tarea 1.1-03: Estudio del estado del arte de los sistemas tecnológicos digitales actuales utilizados para la detección de glifosato en aguas.
- Tarea 1.1-04: Análisis del dimensionamiento de un semáforo digital para detectar diferentes rangos de concentración de residuos de glifosato en aguas.
- Tarea 1.1-05: Utilización del conocimiento adquirido para llevar a cabo la búsqueda y selección de tecnologías de sensores económicos que faciliten la consecución del objetivo principal.

1.3.1.2 Sub-objetivo 1.2 | Hardware

- Tarea 1.2-01: Diseño, desarrollo e implementación a nivel de hardware y firmware de un prototipo inicial que englobe sensores principales y secundarios, así como actuadores con la potencial capacidad de llevar a cabo la medición de residuos de glifosato en muestras de agua.
- Tarea 1.2-02: Diseño, dimensionamiento e implementación del suministro energético para el prototipo. Tendrá dos fuentes de alimentación: la principal será una fuente de alimentación convencional, adecuada para el funcionamiento en entornos como laboratorios o en lugares donde la conexión a una red eléctrica sea factible. La segunda consistirá en la utilización de baterías, la cual se adaptará a contextos de campo o situaciones en las que no se cuente con una fuente de energía externa.

- Tarea 1.2-03: Diseño, desarrollo e implementación, tanto a nivel de hardware como de firmware, de los “chipsets” WiFi y LoRaWAN en el prototipo para habilitar las capacidades de comunicación IoT.
- Tarea 1.2-04: Diseño, desarrollo e implementación a nivel de hardware y firmware de un “chipset” Bluetooth Low Energy (BLE) en el prototipo. Este recurso tendrá como finalidad facilitar las comunicaciones locales bidireccionales con la aplicación móvil integrada para este proyecto, la cual le permitirá a un operador realizar la operación y configuración del sistema.
- Tarea 1.2-05: Diseño, desarrollo, y puesta en marcha del prototipo funcional e integral llamado “SpectroGLY”, abarcando los aspectos mecánicos, electrónicos, lógicos (firmware), y la integración de las características previamente especificadas en las anteriores tareas de esta sección.
- Tarea 1.2-06: Elección y acondicionamiento de un laboratorio de ensayos, que cumpla con todas las normativas de seguridad necesarias para llevar a cabo el proceso de calibración de SpectroGLY.
- Tarea 1.2-07: Selección, adquisición y preparación del producto glifosato, complementos y accesorios necesarios para realizar el proceso de calibración de SpectroGLY.
- Tarea 1.2-08: Preparación de un set de muestras que se utilizarán para la realización del proceso de calibración de SpectroGLY.
- Tarea 1.2-09: Realización del proceso de calibración del dispositivo SpectroGLY utilizando técnicas analíticas y estadísticas ampliamente empleadas en la comunidad científica.
- Tarea 1.2-10: Incorporación en el firmware de SpectroGLY de los algoritmos y resultados obtenidos, lo que permitirá la implementación del semáforo digital, y dejar las bases para avanzar con proceso de validación.

1.3.1.3 Sub-objetivo 1.3 | Arquitectura del sistema

- Tarea 1.3-01: Selección, configuración y despliegue una plataforma IoT basada en el concepto “Low Code” y en modalidad de servicio PaaS (Platform as a Service). La plataforma IoT deberá ofrecer funcionalidades para la recopilación, procesamiento, visualización y gestión de los dispositivos SpectroGLY.

- Tarea 1.3-02: Diseño, desarrollo e implementación un dashboard web, o “frontend” que presente información relevante de los dispositivos SpectroGLY, utilizando KPIs (Key Performance Indicator). En este contexto, el dashboard web también deberá permitir la configuración y activación de alertas relacionadas con eventos de telemetría entrantes, actualizaciones de atributos, períodos de inactividad de los dispositivos SpectroGLY y acciones realizadas por los usuarios.
- Tarea 1.3-03: Configuración e implementación de una red LoRaWAN dedicada a los propósitos de esta investigación. Se deben considerar las normativas establecidas por el ente regulador de comunicaciones local.
- Tarea 1.3-04: Selección, configuración y despliegue de un MW LoRaWAN basado en el concepto “Low Code” y en modalidad de servicio SaaS (Software as a Service).
- Tarea 1.3-05: Adquisición, configuración e implementación de un Gateway LoRaWAN (hardware) con conectividad integrada de WiFi y Ethernet. Este hardware deberá permitir la configuración de frecuencias de operación LoRaWAN y garantizar la compatibilidad con el MW LoRaWAN seleccionado para este proyecto a través de protocolos estandarizados y seguros.
- Tarea 1.3-06: Integración entre la plataforma IoT y el MW LoRaWAN a través de una API (Application Programming Interface) que asegure la bidireccionalidad en las comunicaciones provenientes desde los dispositivos que operarán en la red LoRaWAN que se implementará para este proyecto.
- Tarea 1.3-07: Diseño, desarrollo e implementación una aplicación móvil para Android que se comunicará bidireccionalmente con SpectroGLY a través de BLE, permitiendo a los usuarios obtener resultados en tiempo real de las muestras de agua analizadas y configurar el dispositivo.
- Tarea 1.3-08: Realización de pruebas entre la aplicación móvil desarrollada y SpectroGLY.
- Tarea 1.3-09: Realización de pruebas de conectividad WiFi y LoRaWAN, entre el dispositivo y la plataforma IoT, asegurando la bidireccionalidad de las comunicaciones.
- Tarea 1.3-10: Realización de pruebas de funcionamiento global que permita asegurar el correcto funcionamiento sinérgico de todos los componentes que conforman la arquitectura del proyecto.

1.3.1.4 Sub-objetivo 1.4 | Validación

- Tarea 1.4-01: Preparación del producto glifosato, complementos y accesorios necesarios para realizar el proceso de validación de SpectroGLY en el laboratorio.
- Tarea 1.4-02: Preparación de un set de muestras de prueba que se utilizarán para la realización del proceso de validación de SpectroGLY.
- Tarea 1.4-03: Realización de ensayos funcionales de validación de SpectroGLY con las muestras de prueba. En cada lectura de las muestras de prueba, se deberá verificar empíricamente el correcto funcionamiento de SpectroGLY, asignando con precisión el color del semáforo a las muestras analizadas.
- Tarea 1.4-04: Adquisición, configuración y puesta en marcha de un espectrómetro de laboratorio para contrastar resultados con SpectroGLY.
- Tarea 1.4-05: Realización la calibración del espectrómetro de laboratorio y realizar ensayos funcionales con las muestras de prueba previamente analizadas por SpectroGLY.
- Tarea 1.4-06: Validación y confirmación que los resultados de SpectroGLY sean consistentes y compatibles con el espectrómetro de laboratorio.

1.3.2 Objetivo 2: Proyecto DriftGLY

1.3.2.1 Sub-objetivo 2.1 | Agroquímicos en el aire: Perspectivas analíticas y tecnológicas

- Tarea 2.1-01: Estudio del estado del arte sobre la problemática de contaminación de los agroquímicos en el aire a través del fenómeno de las derivas, su impacto en la salud pública y en el medio ambiente.
- Tarea 2.1-02: Estudio del estado del arte sobre las derivas de agroquímicos en el contexto agroindustrial, sus causas o factores técnicos que las generan, sus consecuencias, actores involucrados y las variables externas que las potencian o minimizan su impacto.
- Tarea 2.1-03: Estudio del estado del arte sobre los actuales sistemas tecnológicos utilizados para detectar y monitorear agroquímicos en el aire (en las fases particulada, gaseosa y líquida).
- Tarea 2.1-04: Análisis de la problemática relacionada con la metodología realizada con las muestras obtenidas de los sistemas tecnológicos estudiados, con un enfoque

particular en los sistemas analógicos y los digitalizados en parte. Este análisis deberá abordar cuestiones como los tiempos, la logística y los costes asociados al envío de las muestras a laboratorios especializados para su análisis, así como las medidas correctivas necesarias para abordar posibles problemas de contaminación que puedan surgir en diversos contextos de monitoreo.

- Tarea 2.1-05: Estudio, análisis y dimensionamiento de un semáforo digital que se base en los valores de tasa de dosis mínima y máxima de los dos herbicidas seleccionados para este estudio (en formato individual y en cóctel).
- Tarea 2.1-06: Realización de la búsqueda y selección de sensores y actuadores de bajo coste y alta confiabilidad para detectar y monitorear la presencia de los dos herbicidas seleccionados (en formato individual y en cóctel).

1.3.2.2 Sub-objetivo 2.2 | Hardware

- Tarea 2.2-01: Diseño, desarrollo e implementación a nivel de hardware y firmware de un prototipo inicial que englobe sensores principales y secundarios, así como actuadores con la potencial capacidad de llevar a cabo la medición de agroquímicos en el aire.
- Tarea 2.2-02: Diseño, desarrollo e implementación, tanto a nivel de hardware como de firmware, de los “chipsets” WiFi, LoRaWAN y GSM/GPRS en el prototipo para habilitar las capacidades de comunicación IoT.
- Tarea 2.2-03: Diseño, desarrollo e implementación a nivel de hardware y firmware de un “chipset” BLE en el prototipo. Este recurso tendrá como objetivo facilitar las comunicaciones locales bidireccionales con la aplicación móvil integrada para este proyecto, la cual le permitirá a un operador realizar configuraciones y pruebas de manera presencial para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.
- Tarea 2.2-04: Diseño, desarrollo, y puesta en marcha del prototipo funcional e integral llamado “DriftGLY”, abarcando los aspectos mecánicos, electrónicos, lógicos (firmware), y la integración de las características previamente especificadas en las anteriores tareas de esta sección.
- Tarea 2.2-05: Elección de un campo de una hectárea, acondicionado como un laboratorio de ensayos para llevar a cabo el proceso de calibración de DriftGLY.
- Tarea 2.2-06: Selección, adquisición y preparación de las herramientas y elementos de seguridad para realizar el proceso de calibración.

- Tarea 2.2-07: Selección, adquisición y preparación de los productos agroquímicos 2,4-D y glifosato que se utilizarán en el proceso de calibración.
- Tarea 2.2-08: Adquisición de un set de muestras, a través de ensayos funcionales en campo, realizando aplicaciones terrestres de los agroquímicos seleccionados, que posteriormente se utilizarán para la realización del proceso de calibración de DriftGLY.
- Tarea 2.2-09: Realización del proceso de calibración del dispositivo DriftGLY utilizando técnicas analíticas y estadísticas ampliamente empleadas en la comunidad científica.
- Tarea 2.2-10: Incorporación en el firmware de DriftGLY de los algoritmos y resultados obtenidos, lo que permitirá la implementación del semáforo digital, y dejar las bases para avanzar con proceso de validación.

1.3.2.3 Sub-objetivo 2.3 | Arquitectura del sistema

- Tarea 2.3-01: Adquisición, implementación y configuración de una plataforma IoT diseñada para la adquisición, procesamiento y publicación de datos provenientes de los dispositivos DriftGLY. La elección de esta plataforma se basa en su previa utilización exitosa en el proyecto SpectroGLY, destacándose por su versatilidad en la configuración del “backend” y su agilidad en la creación de dashboards web personalizados (“frontend”). Estas características facilitarán el cumplimiento de los objetivos establecidos en los plazos definidos para el proyecto.
- Tarea 2.3-02: Configuración e implementación de una red LoRaWAN dedicada a los propósitos de esta investigación. Se deben considerar las normativas establecidas por el ente regulador de comunicaciones local. Además, se deberá seleccionar y configurar un MW LoRaWAN en modalidad de servicio SaaS, que permita la integración bidireccional con plataformas de terceros (en este caso, será para integrarse con la plataforma IoT).
- Tarea 2.3-03: Adquisición, configuración e implementación de un Gateway LoRaWAN con conectividad integrada de WiFi y Ethernet. La elección de este hardware se basa en su previa utilización exitosa en el proyecto SpectroGLY.
- Tarea 2.3-04: Integración entre la plataforma IoT y el MW LoRaWAN a través de una API que asegure la bidireccionalidad en las comunicaciones provenientes desde los dispositivos que operarán en la red LoRaWAN que se implementará para este proyecto.

- Tarea 2.3-05: Integración con la red social X, permitiendo así enviar “Tweets” desde la cuenta oficial del sistema DriftGLY e informar a la ciudadanía ante eventos de contaminación del aire por parte de agroquímicos.
- Tarea 2.3-06: Implementación de una aplicación móvil para Android. Esta aplicación móvil deberá posibilitar una comunicación bidireccional con DriftGLY mediante la tecnología BLE, a través de comandos personalizados y editables. Su función principal será permitir a los usuarios llevar a cabo pruebas y configuraciones específicas en cada contexto de monitoreo (la aplicación móvil solo será utilizada para la puesta en marcha y configuración del sistema).
- Tarea 2.3-07: Realización de pruebas de conectividad WiFi, LoRaWAN y GSM/GPRS, desde el dispositivo hacia la plataforma IoT, asegurando la bidireccionalidad de las comunicaciones.
- Tarea 2.3-08: Realización de pruebas de funcionamiento global que permitan asegurar el correcto funcionamiento sinérgico de todos los componentes de la arquitectura.

1.3.2.4 Sub-objetivo 2.4 | Validación

- Tarea 2.4-01: Preparación de los productos 2,4-D y glifosato, complementos y accesorios necesarios para realizar el proceso de validación de DriftGLY en una zona controlada de campo de 1 hectárea.
- Tarea 2.4-02: Preparación de un set de muestras de prueba que se utilizarán para la realización del proceso de validación de DriftGLY.
- Tarea 2.4-03: Realización de ensayos funcionales de validación de DriftGLY: verificar empíricamente el correcto funcionamiento de DriftGLY, asignando con precisión el color del semáforo a las muestras analizadas y determinando correctamente cada agroquímico detectado (sea individual o en cóctel).
- Tarea 2.4-04: Selección de algunas muestras de prueba y envío a un laboratorio especializado para su análisis.
- Tarea 2.4-05: Validación y confirmación de que los resultados obtenidos con DriftGLY son consistentes y compatibles con el laboratorio, y esencialmente que no se produzcan falsos positivos ni negativos.

1.3.3 Objetivo 3: Proyecto MosquIoT

1.3.3.1 Sub-objetivo 3.1 | Abordaje tecnológico a la problemática del *Aedes aegypti*

- Tarea 3.1-01: Realización de una revisión exhaustiva del estado del arte en relación con la problemática de los mosquitos *Aedes aegypti* en áreas rurales, urbanas y periurbanas, y su impacto en la salud pública.
- Tarea 3.1-02: Realización de un análisis técnico detallado de los métodos y herramientas actuales empleados en las campañas de monitoreo entomológico, centrándose particularmente en la detección y cuantificación de huevos depositados por el mosquito *Aedes aegypti*. Este análisis tiene como objetivo comprender el comportamiento de este mosquito y, en consecuencia, comprender cómo las autoridades de control llevan a cabo acciones de supervisión y monitoreo.
- Tarea 3.1-03: Realización de una revisión exhaustiva del estado del arte acerca del método tradicional y manual de las ovitrampas que permiten detectar y cuantificar huevos de *Aedes aegypti* que son utilizadas en las campañas de vigilancia entomológica que son planificadas y ejecutadas por agencias gubernamentales.
- Tarea 3.1-04: Realización de un estudio exhaustivo del estado del arte en relación con los sistemas tecnológicos actualmente empleados para la detección y seguimiento de la actividad de oviposición del *Aedes aegypti*. En este contexto, se analizarán los métodos analíticos y los tipos de sensores utilizados en dichos sistemas.
- Tarea 3.1-05: Estudio, análisis y diseño de la posibilidad de adaptar y digitalizar las ovitrampas tradicionales a través de sensores que permitan tener la inteligencia necesaria para detectar y contabilizar solo los huevos de *Aedes aegypti*.
- Tarea 3.1-06: Búsqueda, selección y evaluación de sensores de bajo coste y alta confiabilidad que puedan ser incorporados en el sistema MosquIoT.

1.3.3.2 Sub-objetivo 3.2 | Hardware

- Tarea 3.2-01: Diseño, desarrollo e implementación a nivel de hardware y firmware de un prototipo inicial que englobe sensores principales y secundarios, así como actuadores con la potencial capacidad de detección y cuantificación de huevos de *Aedes aegypti*.
- Tarea 3.2-02: Diseño, desarrollo e implementación, tanto a nivel de hardware como de firmware, de los “chipsets” WiFi y LoRaWAN en el prototipo para habilitar las capacidades de comunicación IoT.

- Tarea 3.2-03: Diseño, desarrollo e implementación a nivel de hardware y firmware de un “chipset” BLE en el prototipo. Este recurso tendrá como finalidad facilitar las comunicaciones locales bidireccionales con la aplicación móvil integrada para este proyecto, la cual le permitirá a un operador realizar configuraciones y pruebas de manera presencial para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.
- Tarea 3.2-04: Diseño, desarrollo y configuración del primer prototipo funcional e integral de MosquIoT, abarcando los aspectos mecánicos, electrónicos, lógicos (firmware) y las características previamente especificadas en las anteriores tareas.
- Tarea 3.2-05: Elección y acondicionamiento de un laboratorio de ensayos para llevar a cabo el proceso de entrenamiento de MosquIoT.
- Tarea 3.2-06: Adquisición y configuración de un microscopio de laboratorio con el propósito de comparar los resultados obtenidos por MosquIoT en los procesos de entrenamiento y validación.
- Tarea 3.2-07: Obtención de una cantidad sustancial de huevos de *Aedes aegypti* con sus depresores linguales obtenidos mediante ovitrampas reales. Para cumplir con éxito esta tarea, se requerirá de la colaboración activa de un profesional en Ciencias Biológicas (o similar), con especialización en ecología y el control de mosquitos.
- Tarea 3.2-08: Preparación de un set de muestras que se utilizarán para la realización del proceso de entrenamiento de MosquIoT.
- Tarea 3.2-09: Elaboración de un plan de entrenamiento, basado en las tecnologías TinyML y redes neuronales, utilizando muestras con huevos reales. Este plan tendrá como objetivo implementar una arquitectura de aprendizaje profundo personalizada para la ejecución de modelos adaptados a la segmentación y clasificación de huevos de *Aedes aegypti* en imágenes dentro del dispositivo MosquIoT.
- Tarea 3.2-10: Realización de la integración del modelo en el firmware de MosquIoT, y avanzar con proceso de validación.

1.3.3.3 Sub-objetivo 3.3 | Arquitectura del sistema

- Tarea 3.3-01: Adquisición, implementación y configuración de una plataforma IoT diseñada para la adquisición, procesamiento y publicación de datos provenientes de los dispositivos MosquIoT. La elección de esta plataforma se basa en su previa utilización exitosa en los proyectos SpectroGLY y DriftGLY, destacándose por su versatilidad en la configuración del “backend” y su agilidad en la creación de dashboards web personalizados (“frontend”).

- Tarea 3.3-02: Realización de la configuración e implementación de una red LoRaWAN dedicada a los propósitos de esta investigación. Se deben considerar las normativas establecidas por el ente regulador de comunicaciones local.
- Tarea 3.3-03: Configuración y despliegue de un MW LoRaWAN (SaaS).
- Tarea 3.3-04: Adquisición, configuración e implementación de un Gateway LoRaWAN con conectividad integrada de WiFi y Ethernet. La elección de este hardware se basa en su previa utilización exitosa en los proyectos SpectroGLY y DriftGLY.
- Tarea 3.3-05: Realización de la integración entre la plataforma IoT y el MW LoRaWAN a través de una API que asegure la bidireccionalidad en las comunicaciones provenientes desde los dispositivos que operarán en la red LoRaWAN que se implementará para este proyecto.
- Tarea 3.3-06: Diseño, desarrollo e implementación de una aplicación móvil Android que se comunicará bidireccionalmente con MosquIoT a través de BLE, que permitirá a los usuarios realizar configuraciones y pruebas de los dispositivos MosquIoT en los contextos de instalación.
- Tarea 3.3-07: Realización de pruebas entre la aplicación móvil y MosquIoT.
- Tarea 3.3-08: Realización de pruebas de conectividad WiFi y LoRaWAN, desde el dispositivo hacia la plataforma IoT, asegurando la bidireccionalidad de las comunicaciones.
- Tarea 3.3-09: Realización de pruebas de funcionamiento global que permita asegurar el correcto funcionamiento sinérgico de todos los componentes que conforman la arquitectura del proyecto.

1.3.3.4 Sub-objetivo 3.4 | Validación

- Tarea 3.4-01: Adquisición de una cantidad sustancial de huevos de *Aedes aegypti* para realizar el proceso de validación de MosquIoT en el laboratorio.
- Tarea 3.4-02: Preparación de un set de muestras de prueba que se utilizarán para la realización del proceso de validación de MosquIoT.
- Tarea 3.4-03: Realización de ensayos funcionales de validación de MosquIoT utilizando el conjunto de muestras designadas para pruebas. La cuantificación de los huevos presentes en cada una de las muestras obtenidas se llevará a cabo previamente mediante la misma metodología empleada por laboratorios especializados y expertos

en la materia. Este proceso implicará la lectura manual de los huevos de cada muestra con el uso de un microscopio de laboratorio.

- Tarea 3.4-04: Realización de una PoC que se extenderá por un período de 28 días, durante los cuales se realizará una operación continua. Cada día se preparará y colocará una muestra dentro de MosquIoT, que será analizada por el dispositivo. Cada depresor lingual contendrá un número variable de huevos reales para simular diferentes condiciones de campo. MosquIoT efectuará mediciones de los depresores linguales de forma automática y autónoma cada 6 horas, transmitiendo los datos a la plataforma IoT a través de WiFi para su posterior análisis de los resultados.
- Tarea 3.4-05: Validación y confirmación que los resultados obtenidos por MosquIoT en la PoC son coherentes y concuerdan con las mediciones manuales efectuadas mediante el microscopio de laboratorio.

1.4 Estructura de la tesis

Esta tesis doctoral se presenta en forma de compendio de artículos, siguiendo la estructura establecida por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Castilla-La Mancha. Consta de cuatro capítulos, a saber:

- Capítulo 1 | Introducción: Se contextualiza la tesis, se aborda su trasfondo y motivación, y se definen los desafíos, objetivo principal, objetivos parciales o secundarios y sus cuestiones de investigación. Además, se presenta la metodología y el plan de trabajo que se ha seguido, así como la estructura general de la tesis.
- Capítulo 2 | Resultados: Se exhiben los resultados correspondientes al compendio de artículos que integran esta tesis. Las contribuciones se presentan en el formato original de sus respectivas publicaciones.
- Capítulo 3 | Discusión: Se profundizan los resultados obtenidos, ofreciendo un análisis exhaustivo de la investigación realizada, los logros alcanzados y las cuestiones de investigación planteadas.
- Capítulo 4 | Conclusiones y perspectiva futura: Se exponen las conclusiones derivadas de la tesis, junto con las perspectivas de investigación futura que permitirán continuar la línea de estudio abordada en este compendio.

Esta estructura sigue las directrices establecidas por la Escuela Internacional de Doctorado de la UCLM y proporciona una visión completa y organizada de la investigación realizada en esta tesis doctoral.



2 Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados detallados de la tesis doctoral, los cuales están reflejados en las contribuciones incluidas en este compendio. La estructura de este capítulo consta de tres secciones, alineadas con las contribuciones publicadas mediante revisión por pares en la destacada revista científica IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, perteneciente a la serie de revistas del prestigioso Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers):

- El logro del objetivo 1, presentado en la sección 2.1 y materializado a través de la contribución titulada “*SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters*”, no solo cumple con sus sub-objetivos, sino que también proporciona respuestas a las cuestiones de investigación (CIs) expuestas en la sección 1.2.
- El logro del objetivo 2, presentado en la sección 2.2 y materializado a través de la contribución titulada “*DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts*”, no solo cumple con sus sub-objetivos, sino que también proporciona respuestas a las cuestiones de investigación (CIs) expuestas en la sección 1.2.
- El logro del objetivo 3, presentado en la sección 2.3 y materializado a través de la contribución titulada “*MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of Aedes aegypti (Diptera: Culicidae)*”, no solo cumple con sus sub-objetivos, sino que también proporciona respuestas a las cuestiones de investigación (CIs) expuestas en la sección 1.2.

2.1 SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters

- **Title:** SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters
- **Abstract:** Glyphosate contamination in waters is becoming a major health problem that needs to be urgently addressed, as accidental spraying, drift, or leakage of this highly water-soluble herbicide can impact aquatic ecosystems. Researchers are increasingly concerned about exposure to glyphosate and the risks its poses to human health, since it may cause substantial damage, even in small doses. The detection of glyphosate residues in waters is not a simple task, as it requires complex and expensive equipment and qualified personnel. New technological tools need to be designed and developed, based on proven, but also cost-efficient, agile, and user-friendly, analytical techniques, which can be used in the field and in the lab, enabled by connectivity and multiplatform software applications. This article presents the design, development, and testing of an innovative low-cost visible and near-infrared (VIS-NIR) spectrometer (called SpectroGLY), based on Internet of Things (IoT) technologies, which allows potential glyphosate contamination in waters to be detected. SpectroGLY combines the functional concept of a traditional lab spectrometer with the IoT technological concept, enabling the integration of several connectivity options for rural and urban settings and digital visualization and monitoring platforms (Mobile App and Dashboard Web). Thanks to its portability, it can be used in any context and provides results in 10 min. Additionally, it is unnecessary to transfer the sample to a laboratory (optimizing time, costs, and the capacity for corrective actions by the authorities). In short, this article proposes an innovative, low-cost, agile, and highly promising solution to avoid potential intoxications that may occur due to ingestion of water contaminated by this herbicide.
- **Authors:** Javier Aira; Teresa Olivares; Francisco M. Delicado.
- **Status:** Published
- **Published in:** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Volume: 71)
- **Citation:** J. Aira, T. Olivares and F. M. Delicado, "SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-10, 2022.
- **Article Sequence Number:** 6005610
- **Date of Publication:** 05 August 2022
- **ISSN Information:**
 - **Print ISSN:** 0018-9456
 - **Electronic ISSN:** 1557-9662
- **DOI:** 10.1109/TIM.2022.3196947 (click to view the contribution online)
- **Publisher:** IEEE
- **Funding Agency:** This work was supported in part by the Spanish Ministry of Science and Innovation [European Regional Development Fund (ERDF), EU funds] under Project RTI2018-098156-B-C52, in part by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 under Grant PID2021-123627OB-C52, and in part by ERDF A way to make Europe.

SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters

Javier Aira¹, Teresa Olivares², and Francisco M. Delicado³

Abstract—Glyphosate contamination in waters is becoming a major health problem that needs to be urgently addressed, as accidental spraying, drift, or leakage of this highly water-soluble herbicide can impact aquatic ecosystems. Researchers are increasingly concerned about exposure to glyphosate and the risks it poses to human health, since it may cause substantial damage, even in small doses. The detection of glyphosate residues in waters is not a simple task, as it requires complex and expensive equipment and qualified personnel. New technological tools need to be designed and developed, based on proven, but also cost-efficient, agile, and user-friendly, analytical techniques, which can be used in the field and in the lab, enabled by connectivity and multiplatform software applications. This article presents the design, development, and testing of an innovative low-cost visible and near-infrared (VIS-NIR) spectrometer (called SpectroGLY), based on Internet of Things (IoT) technologies, which allows potential glyphosate contamination in waters to be detected. SpectroGLY combines the functional concept of a traditional lab spectrometer with the IoT technological concept, enabling the integration of several connectivity options for rural and urban settings and digital visualization and monitoring platforms (Mobile App and Dashboard Web). Thanks to its portability, it can be used in any context and provides results in 10 min. Additionally, it is unnecessary to transfer the sample to a laboratory (optimizing time, costs, and the capacity for corrective actions by the authorities). In short, this article proposes an innovative, low-cost, agile, and highly promising solution to avoid potential intoxications that may occur due to ingestion of water contaminated by this herbicide.

Index Terms—Agriculture, environmental monitoring, Internet of Things (IoT), low-power wide-area network (LPWAN), open-source hardware, sensors spectral analysis, smart cities, spectroscopy, water pollution, water quality.

I. INTRODUCTION

WORLDWIDE, glyphosate [N-(phosphonomethyl) glycine] is the systemic nonselective post-emergent

Manuscript received 1 June 2022; revised 26 July 2022; accepted 28 July 2022. Date of publication 5 August 2022; date of current version 18 August 2022. This work was supported in part by the Spanish Ministry of Science and Innovation [European Regional Development Fund (ERDF), EU funds] under Project RTI2018-098156-B-C52, in part by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 under Grant PID2021-123627OB-C52, and in part by ERDF A way to make Europe. The Associate Editor coordinating the review process was Dr. Guanfeng Du. (Corresponding author: Javier Aira.)

Javier Aira is with the International Doctoral School, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: jorgejavier.aira@alu.uclm.es).

Teresa Olivares is with the Department of Computing Systems, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: teresa.olivares@uclm.es).

Francisco M. Delicado is with the Department of Computer Engineering, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: francisco.delicado@uclm.es).

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2022.3196947

1557-9662 © 2022 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

herbicide most widely used to fight unwanted weeds [12], [13]. The use of glyphosate is regulated for the agricultural sector and for peri-urban and urban areas (albeit to a lesser extent in the latter). Regrettably, water, soil, and food contamination with glyphosate is becoming a major problem that needs to be urgently addressed [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Glyphosate has been found in groundwater and surface water in several countries [27], [28], [29], [30]. Raising awareness of the problem of glyphosate contamination is essential because, as it is highly soluble in water, it may impact aquatic ecosystems through accidental spraying, drift, or leakage. Researchers [31], [32], [33] are increasingly concerned about the risks it poses for human health since, even in small amounts, agrochemicals may cause substantial damage and, as such, constitute a genuine public health problem. Agrochemicals may enter the human body through skin absorption, inhalation, or intake. Symptoms in the ingestion of water contaminated with glyphosate (soluble concentrate), primarily gastrointestinal in nature, and including nausea, vomiting, diarrhea and belly pain, are associated with an intake of 5 up to 150 mL (they disappear within 24 h). An intake of 20 up to 500 mL is associated with moderate gastrointestinal symptoms which last longer than 24 h, such as gastrointestinal bleeding, esophagitis or gastritis verifiable via endoscopy, oral ulcers and hypotension. Serious intoxication (>500 mL) may cause respiratory failure, kidney failure, heart failure, coma, and death [17]. The issue is highly complex and often difficult to quantify, due to the diversity of methods used to analyze exposure and also due to factor variability (including age, sex, nutritional status, personal habits, and individual genetic variability), which affect, to a large extent, people's sensitivity to agrochemicals. One mechanism to avoid such exposure is the periodic analysis of waters to determine contamination levels and whether they are fit for use or not. This procedure requires taking samples, which are sent to a specialized laboratory. Complex equipment is used and operated by highly qualified personnel, while the results of the samples may take days to be published (processes that have significant costs).

In the context of laboratories, several analytical methods (traditional and complex) are used to determine the presence of glyphosate in waters, including EPA Method 547 [34]; high performance liquid chromatography [35]; mass spectrometry [36], [37], [38], [39]; fluorescence analysis [40]; capillary electrophoresis analysis [41]; spectrophotometric techniques

6005610

IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 71, 2022

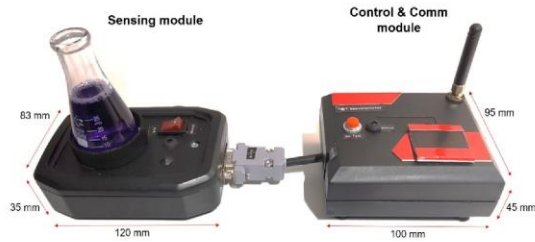


Fig. 1. SpectroGLY with an analyzed water sample.

[42], [43], [44], [45]; electrochemical techniques [46], [47], [48]; and enzyme-linked immunosorbent assay [29], [49].

The global process of miniaturization, mass use, and cost reduction in electronics and spectral sensors is in constant development.

The constant development of new electronic devices and spectral sensors of smaller size, cost, greater robustness, and simplicity of use [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], is allowing the use of spectral techniques for the analysis of samples at very low cost and in portable systems. An example of this is the AS7265X multispectral sensor, which works in the spectral range from 410 to 940 nm and supports 18 wavelengths or channels [51].

This article seeks to design and develop a VIS-NIR spectrometer, using an AS7565X sensor, based on Internet of Things (IoT) technology called SpectroGLY (see Fig. 1). The objective of SpectroGLY is to determine the presence of glyphosate in water, and to inform the user, through a digital traffic light, of the pollution level of this chemical substance. The digital traffic light establishes three levels: green, unpolluted water; yellow, warning level of glyphosate; and red, danger level (the chronic intoxications that may occur due to microingestion sustained over time is outside the scope of this work). The user will be able to carry out the analysis of their samples *in situ*, without the need to take them to the laboratory for analysis and in just 10 min. The main features of SpectroGLY include low cost, simplicity, portability, connectivity, and integration with a Mobile App that interfaces with SpectroGLY via Bluetooth Low-Energy (BLE). It also has an IoT Platform, based on a micro-service architecture, which offers a Dashboard Web to view the results and statistics of tested samples. The purpose of this study is to propose an innovative solution for water safety and quality assurance.

The rest of the article is structured as follows. Section II describes the system's global architecture, with special emphasis on the interactions between its several building blocks. Section III provides a detailed description of SpectroGLY. Section IV contains a technical and functional description of the App associated with SpectroGLY. Section V describes the development of the IoT Platform's, where the information on the tests performed with SpectroGLY is concentrated, stored, and displayed. Finally, Section VI summarizes the conclusion and future works.



Fig. 2. Digital ecosystem associated with SpectroGLY.

II. ARCHITECTURE IMPLEMENTED FOR SPECTROGLY

The primary purpose and challenge of the architecture was to take the current traditional lab measurement systems (benchtop spectrometers) to the next level, by offering a truly digital ecosystem that allows water samples (allegedly contaminated with glyphosate) to be tested using SpectroGLY, regardless of the measurement setting (rural or urban), and to ensure that results can be processed in a user-friendly and fast manner (see Fig. 2). In this respect, the architecture was conceived for its application in industry to be as accessible as possible, bridging the gap between the scientific and the industrial world, whilst considering all the digital services a user would require to ensure an outstanding and professional experience when using the system.

ThingsBoard was selected as the IoT Platform for this research study. This platform boasts a large community of developers and, technically speaking, has an interesting architecture based on microservices and an embedded "Message Queue Telemetry Transport" (MQTT) broker to support bi-directional communications from SpectroGLY, when it is based in urban areas and connected to a WiFi network. In this regard, for urban areas, bidirectional MQTT communication capabilities between SpectroGLY and the IoT Platform were also ensured, supporting standard telemetry and Remote Procedure Calls (RPCs), which allow commands to be sent from the Dashboard (IoT Platform) to the field equipment. The "Transport Layer Security" (TLS) v1.2 protocol was implemented for greater security in all communications.

The IoT Platform supports integration with third-party platforms, enabling integration with "The Things Networks" (TTN) middleware to achieve bi-directional communications when SpectroGLY is based in rural areas using a LoRaWAN. This network is part of the group of LPWANs [50], the popularity of which is growing in the IoT field due to their low consumption and wide coverage range features. For this study,

a LoRaWAN was implemented in the Australian band (AU915, 915–928 MHz), abiding by the radio spectrum standards issued by the Argentine federal telecommunications regulatory authority (ENACOM, in its Spanish acronym). Implementing a LoRaWAN requires several components. The Gateway is one of the most important and is in charge of spreading the network, establishing a bi-directional communication with such a network, and acting as a bridge to the TTN.

The Gateway used in this study was a Dragino LG02, which was integrated into the TTN through the Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) protocol. The TTN was integrated into the IoT Platform through MQTT over TLS v1.2. In order to reinforce such integration, within the IoT Platform, there is a module called “Converters,” in which two types of Converters are established—one for Uplink and the other one for Downlink. In the case of the Converter Uplink, the “Decoder” resource is used, which supports, via JavaScript, the parsing of data received from TTN (JSON or JavaScript Object Notation format). This allows us to display relevant information on the Dashboard, feed the Rule Engine and make such information persistent in databases, by allocating a specific type of variable, based on the type of data received. In the case of the Converter Downlink, the “Encoder” resource is used, which also supports JavaScript and allows the execution of the necessary instructions to convert JSON messages from TTN to commands, for instance, a Manual Test order, for SpectroGLY. These commands are submitted as LoRaWAN messages via the Gateway.

In extreme situations, where WiFi and LoRaWAN connectivity is unavailable, SpectroGLY could connect to a WiFi network propagated by a “Very Small Aperture Terminal” (VSAT) to transmit data through the satellite link. The idea is to have multiple options for connecting to the cloud, with a device that is as transparent and standardized as possible to integrate it into any network without problems.

III. SPECTROGLY

SpectroGLY is a substantially cheaper IoT device than traditional VIS-NIR spectrometers. For instance, the construction of the first SpectroGLY prototype required an investment of USD 250 (a ratio of approximately 10–1 vis-a-vis the most basic lab spectrometers in the market). In a serial production setting, this cost could decrease to approximately USD 200. Thanks to its reduced size, which makes it easily portable, SpectroGLY can be used both in the lab and in the field. In order to spotlight these characteristics, IoT technology was embedded to address connectivity concerns in those application settings, embracing digital tools, such as an App and Dashboard Web (IoT Platform), to view the results of the tests performed.

SpectroGLY supports two modes of use—manual and auto. The manual mode was only used to build the calibration curve, based on the reading of 12 water samples. To enable this mode, SpectroGLY has a mode selector to switch and enable the USB port (Port C) in order to connect it to a laptop, where it can be directly operated via a desktop software program called “AMS

Spectral Sensor Dashboard” provided by the manufacturer of the multispectral sensor AS7265X [51]. This software is capable of reading data from the device’s 18 channels. The software also provides controls for the reading update mode and LED controls (shutter), and has a section to observe calibrated raw data, including special functions to sort data by channel, wavelength, and spectrum. After reading the samples required to build the calibration curve, the “Comma Separated Values” (CSV) files were exported (one per each sample). These files were analyzed using the statistical software XLSTAT [52].

The auto mode will be the standard for use and, in principle, was devised to validate the model through test samples, incorporating into its firmware the linear regression equation of the model developed, as a result of the calibration curve construction. The auto mode requires the use of the App and Dashboard Web (IoT Platform) to view the results of the samples analyzed through a digital traffic light that will indicate whether or not the water samples contain glyphosate residues. SpectroGLY comprises two differentiated hardware modules: the sensing module, in charge of measuring the samples through the AS7265X multispectral sensor; and the communication and control module, which acts as a controller for the sensing module, integrates the IoT communication engines (WiFi, LoRaWAN, and BLE), the power options (external through a conventional source and internal through a lithium battery for 24 h of autonomy of continuous use) and provides for a set of sensors to ensure overall correct operation: temperature and humidity of the environment influence the accuracy of the AS7265X. In addition, a 3-axis accelerometer indicates whether the system is in a position to sample correctly. Fig. 3 shows a detailed description of the implemented hardware.

At the user interface and for the auto mode, SpectroGLY has an “Organic Light-Emitting Diode” (OLED) display that allows the user to be guided in the case of BLE connection problems with their smartphone (SpectroGLY App) or when connecting for the first time. In manual mode, the user is informed through the OLED display if there is a malfunction between the sensor and the laptop (USB). SpectroGLY also has a test button that allows test measurements to validate the correct operation of the device, its connectivity, and the reception of data on the IoT platform. All SpectroGLY features are accompanied by a sound actuator (buzzer) that informs the user of any success or problems that may occur while performing their tests.

A. Sensing Module

As mentioned in Section I, the sensing module comprises the multispectral sensor and supplementary electronics for integration with the communication and control module through the “Inter-Integrated Circuit” (I2C) bus. The sensing module is in charge of sensing the water samples. SpectroGLY was based on the AS7265X multispectral sensor [51]. The AS7265X sensor has a spectral range from 410 to 940 nm, supports 18 wavelengths or channels (see Fig. 4), has a “Full Width at Half Maximum” (FWHM) of 20 nm, comes ready calibrated, and has a programmable LED electronic shutter,

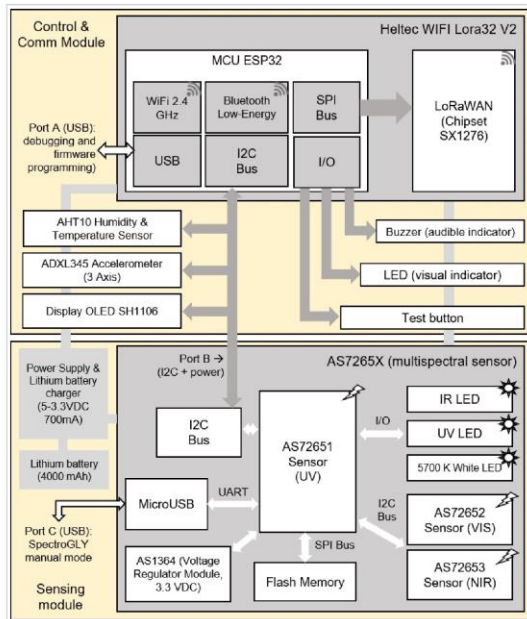


Fig. 3. Implemented hardware.

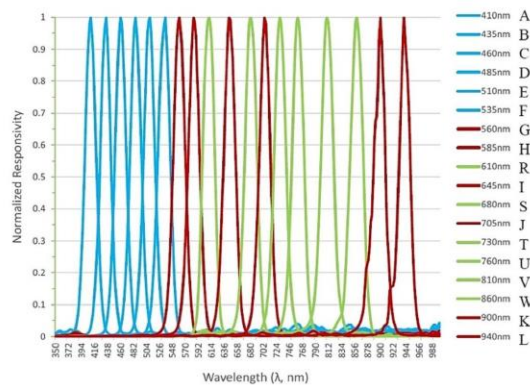


Fig. 4. 18 wavelengths supported by the AS7265X sensor (410–940 nm).

with three (3) embedded LEDs as the external lighting source: 5700 Kelvin White LED, 405 nm Ultraviolet LED, and 875 nm Infrared LED.

AS7265X has interference filters embedded and directly deposited on CMOS silicon, temperature sensors, and an MCU that supports bi-directional communications (I2C) with SpectroGLY’s communication and control module. In order to validate the operation of the AS7265X sensor within SpectroGLY, for purposes of this research study, we decided not to perform calibration tests using conventional lab spectrometers. This decision was grounded in the large body of evidence from prior works conducted with the AS7265X multispectral sensor that empirically verify and confirm its

correct operation [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Not only do these research studies provide evidence of the correct operation of the AS7265X sensor by comparing its performance and spectral response to lab spectrometers or similar devices, but they also succeed in comparing the spectral response of the sensor to high-resolution spectral libraries recognized in the academic world, as shown in the research conducted by AL-Qayssei *et al.* [4].

The analytical technique selected to determine the presence of glyphosate by SpectroGLY was that proposed by Bhaskara *et al.* [53]. Some changes were implemented to make water analysis processes more agile, lower the complexity, and sample preprocessing times, and fundamentally, to minimize complexity in performing the analysis of samples. The aim of the latter was to expand the scope of potential users (the goal is for anyone with minimum technical training to be able to perform the tests). Naturally, the changes to the analytical method selected have no impact on its effectiveness, since the results were positive and highly promising (as will be discussed below). The analytical technique proposed by Bhaskara *et al.* [53] is direct, simple, fast, accurate, and fully consistent with the spectral portion supported by SpectroGLY (410 to 940 nm). It is based on a colorimetric chemical reaction of glyphosate in the presence of ninhydrin, a chromogenic reactive agent and the presence of a catalyzer, sodium molybdate dihydrate, which is easily detectable using diffuse reflectance spectroscopy. Such a reaction produces a violet product known as “Ruhemann’s Purple” with maximum VIS absorption at 570 nm.

After defining the basic analytical technique used in determining glyphosate residues in water in SpectroGLY, a calibration curve was constructed (as it is done with lab spectrometers), based on 12 water samples fit for human consumption taken from the tap of a building apartment in the City of Buenos Aires, Argentina. Of the 12 samples, four revealed no presence of glyphosate (whites), while aliquots of soluble glyphosate ranging from 10 to 2000 mg/L were added to eight samples. The concentrations of glyphosate mentioned above are reduced in a liter of drinking water. As a complement to the information on the health consequences of ingesting concentrated soluble glyphosate included in the introduction to this research work, it is worth noting that a dose of 10 mg/L does not present visible symptoms of intoxication in humans. However, coming into contact with a dose of this size leads to an increase in nuclear aberrations, which causes damage to “Deoxyribonucleic acid” (DNA) [58]. Importantly, chronic and long-term consumption could cause health problems (an issue not addressed in this research work).

Fig. 5 shows the results of the 12 water samples and the resulting colorimetric chemical reaction, according to the presence of aliquots of glyphosate, reactive agent, and catalyzer.

Table I shows the overall list of components used in this study and, in particular, the used quantities of ninhydrin and sodium molybdate dihydrate (100 mg in both cases). Initially, each of the 12 samples were pre-processed in 1000 ml beakers (borosilicate 3.3) under stable ambient conditions (temperature: 20 °C and relative humidity: 55%). After 10 min, the samples were quantitatively transferred to 25 mL Erlenmeyer

TABLE I
LIST OF COMPONENTS USED

Item	Total Qty	Total Samples	Qty per sample (pre-process)	Composition / formulation	Qty per sample (analyzed)
City drinking water	27 l	27 samples (12: construction of the calibration curve & 15: test samples, validation model)	1 l	H ₂ O	25 ml
Sodium molybdate dihydrate	100 g		100 mg	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O (reactive agent)	
Ninhydrine	50 g	C ₉ H ₆ O ₄ (reactive agent)			
Glyphosate Herbicide	1 l	18 samples (applicable to the study of samples with glyphosate)	Variable (mg/l)	Isopropylamine salt of N-phosphonomethyl glycine (48 g). Equiv. 36 g of acid glyphosate + Inert & adjuvants (100 ml)	

TABLE II
TABLE WITH THE 12 READINGS OBTAINED (MANUAL MODE)

Sample ID	Glyphosate Concentration (mg/l)	Traffic Light Result	Spectral response: Diffuse Reflectance (µW/cm ²)																
			410 nm	435 nm	460 nm	485 nm	510 nm	535 nm	560 nm	585 nm	610 nm	645 nm	670 nm	705 nm	730 nm	760 nm	810 nm	860 nm	900 nm
S01	0	Negative	34	6	12	8	12	10	155	119	12	11	21	6	5	60	83	10	1
S02	0		32	6	8	6	7	6	151	137	15	16	20	9	6	44	96	9	1
S03	0		36	9	11	8	10	7	154	133	14	16	19	6	4	41	85	8	1
S04	0		47	7	10	6	11	9	138	116	9	10	18	6	5	65	79	11	1
S05	10	Warning	21	4	8	5	7	5	168	152	6	7	22	8	6	75	77	11	1
S06	31.2		32	4	6	3	6	4	171	138	5	5	23	8	6	71	82	11	1
S07	125		31	5	8	5	6	5	180	148	5	5	20	7	5	27	64	5	1
S08	250		24	3	3	2	3	2	229	176	4	5	30	6	4	14	48	4	1
S09	500	Positive	36	4	6	4	5	4	279	197	4	6	30	6	3	12	46	3	0
S10	1000		32	4	5	3	4	3	297	256	7	7	34	6	3	10	42	4	0
S11	1500		27	4	5	3	4	3	325	263	4	7	33	6	2	8	36	3	0
S12	2000		32	4	4	3	3	3	375	306	4	8	37	5	2	8	34	4	0

beakers (borosilicate 3.3) for subsequent reading by SpectroGLY (manual mode).

After completing the 12 readings with SpectroGLY under manual mode and after obtaining the data associated with such readings (see Table II), the CVS files related to each sample were exported from the “AMS Spectral Sensor Dashboard” software for subsequent processing by the XLSTAT statistical software in order to perform the linear regression equation of the model.

After reading the samples using SpectroGLY and/or based on the data retrieved, a calibration curve was constructed, based on the glyphosate concentration within a range from 10 to 2000 mg/L. As mentioned, the technique proposed by Bhaskara *et al.* [53] produces a maximum VIS reaction at 570 nm. For this reason, during the calibration curve construction process, we had to choose a wavelength or channel to work with within SpectroGLY. To this end, the performance of wavelengths or channels from 560 to 585 nm was compared through a simple correlation matrix. After performing certain statistical analyses, we selected the 560 nm channel, without considering that this channel is 10 nm below that of the

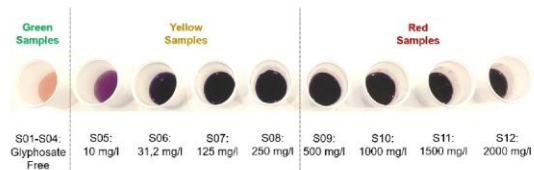


Fig. 5. Colorimetric result obtained from the samples used for the construction of the calibration curve.

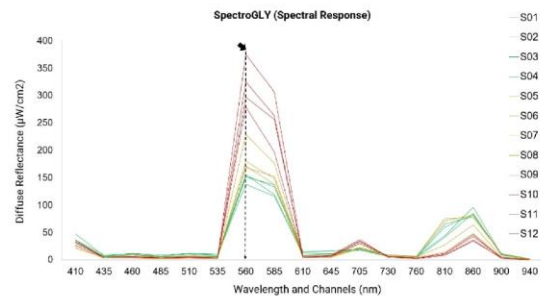


Fig. 6. Spectral representation of the 12 samples analyzed (S1-S12).

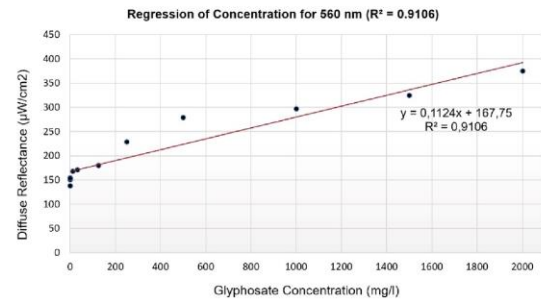


Fig. 7. Calibration curve performed for the wavelength of 560 nm.

technique used by Bhaskara *et al.* [53] (570 nm). As shown in Fig. 6, through the spectral response obtained, we validated and confirmed that the selected analytical technique is feasible for use. Fig. 7 shows the calibration curve carried out for the 560 nm wavelength or channel. Following the construction of the calibration curve that validated the performance of the selected wavelength, we were able to continue developing the linear regression equation of the model, based on the results obtained from the 12 samples summarized in Table II for this wavelength or channel.

In order to support the digital traffic light dimensioning within SpectroGLY for the established concentration range, we drew on a number of research studies [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26] presenting several tests providing substantial empirical evidence of the clinical and statistical signs of mild, acute and chronic intoxication due to intake and inhalation of, or contact with, water contaminated with glyphosate. In said research, several studies were conducted on humans, animals, and *in vitro*, reporting several indices that were taken as the reference to establish the traffic

light range, according to the types of intoxication and their interaction with several sources of contaminated water. Some of the indices embedded in the traffic light correspond to an average lethal dose (DL50), average lethal concentration (CL50), “No-Observed-Adverse-Effect Level” (NOAEL), and “Lowest-Observed-Adverse-Effect Level” (LOAEL). Considering the complexity involved in dimensioning a traffic light that would cover all problems associated with glyphosate contamination in waters, a global range from 10 to 2000 mg/L was established to evidence the correct operation of SpectroGLY and within this range, establish the thresholds for the yellow light (Warning) and red light (Positive), based on the evidence, experiences and statistics observed in the reference research. The thresholds established for the yellow and red lights were also aligned with the extreme cases of acute intoxication due to direct intake, where symptoms are greater according to the amount ingested, and develop rapidly. Expanding the digital traffic light is a goal envisaged for future works, particularly, in the concentration range, to provide increased resolution in order for SpectroGLY to detect glyphosate at concentrations of below 10 mg/L.

To reinforce the evidence on the correct functioning of SpectroGLY, it was decided to add a laboratory spectrometer to this study. The AvaSpec-ULS3648 high-resolution spectrometer manufactured by Avantes [59] was used, with a spectral range of 200 to 1100 nm (VIS-NIR), a FWHM of 0.05 to 20 nm (configurable), and a lower precision error at 1%. The AvaSpec-ULS3648 is an entry-level laboratory spectrometer and costs around USD 2500 (10× more expensive than SpectroGLY). To properly contrast the two instruments, the FWHM of the laboratory spectrometer was set to 20 nm, the spectral portion was limited from 410 to 940 nm, and the same 18 channels used in SpectroGLY were defined. As was done with SpectroGLY and using the same samples, the calibration curve for the laboratory spectrometer was constructed for the same wavelength used above (560 nm).

Table III shows the linear regression equations made for the SpectroGLY and laboratory spectrometer that allowed us to build the digital traffic light to determine the presence of glyphosate residues in water samples in both devices. The digital traffic light will show a green light when no glyphosate residues are found in the water sample analyzed (Negative). If the sample contains glyphosate residues (from 10 to 499 mg/L), a yellow light will be displayed (Warning), along with the recommendation of conducting more in-depth lab tests on the sample. Finally, if the sensed sample contains serious indications of the presence of glyphosate residues (from 500 to 2000 mg/L), a red light will be displayed (Positive).

To validate the correct functioning of SpectroGLY, 15 test samples were selected. Reactive agents (ninhydrin and sodium molybdate dihydrate) and their corresponding aliquots (100 mg each) were also added to the test samples. Regarding the reagents, in the future, no complications are foreseen in their handling and use, since the recommendation will be to have them available in individualized sachets with their corresponding ready-to-use aliquot. In this way, field tests will be carried out simply and without the need for the user to

TABLE III
PARAMETERS OF THE DEVELOPED MODEL

Glyphosate Concentration (mg/l)	Traffic Light values *		Traffic Light Result
	SpectroGLY	LAB Spectrometer	
Glyphosate Free	from -999,9999 (or less) to -62	from -999,9999 (or less) to -57	Negative
From 10 to 499	from -61 to 537	from -56 to 585	Warning
From 500 to 2000 (or more)	from 538 a 999,9999 (or more)	from 586 a 999,9999 (or more)	Positive

* Results of the model calibration and prediction studies

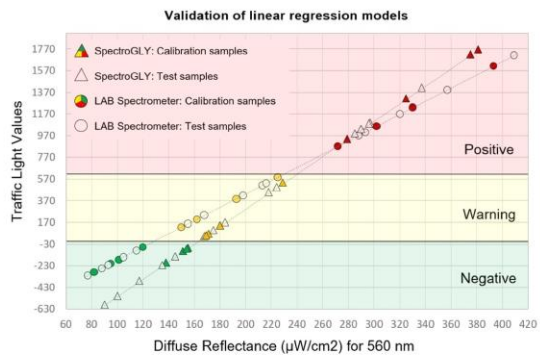


Fig. 8. Graphic verification of the correct operation of the SpectroGLY.

quantify and prepare the reagents (ready-to-use sachets will be available). Following the reading of the test samples, the auto mode was established in SpectroGLY, incorporating the linear regression equation of the model in its firmware, as a result of the construction of the calibration curve at 560 nm and the traffic light-specific parameters. At each reading of the test samples, we were able to empirically verify the correct operation of SpectroGLY, accurately allocating the traffic light color to the samples analyzed (see Table IV). As a complement to the results presented by SpectroGLY, Table IV also shows the results obtained with the laboratory spectrometer, where it is observed that the response of the digital traffic light for each of the 15 samples analyzed is the same as in SpectroGLY. Fig. 8 shows the linear regression models and associated results with the test samples analyzed by both instruments. It can be seen that the SpectroGLY results are consistent and compatible with the laboratory spectrometer, and essentially no false positives or negatives occurred.

As a conclusion of the calibration and validation processes through the test samples, we empirically verified the correct performance of SpectroGLY in the detection of glyphosate residues in water samples. The selection of the AS7265X multispectral sensor was shown to be appropriate. Regarding the performance of SpectroGLY, the manufacturer of the multispectral sensor details that the accuracy error is 12% (for the spectral channels expressed in $\mu W/cm^2$) and the average

TABLE IV
RESULTS FROM THE TESTS SAMPLES

Sample ID	Glyphosate Concentration (mg/l)	SpectroGLY		LAB Spectrometer		Traffic Light Result
		Spectral response [†]	Traffic Light value	Spectral response [†]	Traffic Light value	
TS-01	0	90	-589,3504	93	-222,8020	Negative
TS-02	0	100	-508,3620	105	-149,3620	Negative
TS-03	0	117	-370,6818	115	-88,1620	Negative
TS-04	0	135	-224,9028	88	-253,4020	Negative
TS-05	0	145	-143,9144	77	-320,7220	Negative
TS-06	15	169	50,4576	155	156,6380	Warning
TS-07	50	175	99,0506	168	236,1980	Warning
TS-08	150	184	171,9402	198	419,7980	Warning
TS-09	200	218	447,3006	213	511,5980	Warning
TS-10	220	224	495,8936	216	529,9580	Warning
TS-11	600	285	989,9226	288	970,5980	Positive
TS-12	800	290	1030,4167	293	1001,1980	Positive
TS-13	1000	296	1079,0098	320	1166,4380	Positive
TS-14	1600	337	1411,0620	357	1392,8780	Positive
TS-15	2000	381	1767,4108	409	1711,1180	Positive

[†] Diffuse Reflectance (μW/cm2) for 560 nm

aperture-limited field of view is ±20.5° for the specified accuracy [51].

B. Communications and Control Module

Within the SpectroGLY communications and control module (see Figs. 1 and 3), there is a Motherboard with a Heltec WiFi Lora32 V2 [54] development board, which contains a powerful 32-bit MCU based on ESP32 Tensilica 240 MHz LX6 dual-core [55]. This MCU supports a large computational capacity and many features. The communication and control module also offers several options in terms of IoT connectivity. It contains a SX1276-model LoRaWAN chipset (version 868 and 915 MHz), and a 2.4 GHz WiFi chipset (802.11 b/g/n 150 Mb/s). This enables the transmission of events under the MQTT protocol and offers BLE v4.2 connectivity, thanks to which SpectroGLY is able to connect to the App from which the user controls and operates. All this is made possible by the large number of interfacing resources of the MCU.

C. Firmware

As mentioned in the preceding paragraph, SpectroGLY has a powerful MCU, thanks to which we were able to design, develop and express the operation logic, through a complex firmware using the C/C++ programming language. For the development of the firmware, the “Integrated Development Environment” (IDE) of Arduino and Visual Studio Code were used. To debug the developed firmware, the “ESP-Prog” hardware was used, which connects to the “Joint Test Action Group” (JTAG) port of the ESP32 MCU to debug it in real-time.

As mentioned, in terms of communications and for the urban context, the SpectroGLY firmware has the ability to connect and operate on WiFi networks (fixed or mobile). For this communications link, the MQTT protocol (over TLS 1.2) and a feature known as RPC were implemented in the SpectroGLY firmware, which allows information or orders to be

received from the IoT Platform dashboard. The JSON data exchange format was used for the transmission and reception of information under the urban modality.

If SpectroGLY is deployed in a rural context, it is able to connect to LoRaWAN networks. It should be noted that the mechanisms required to send (Uplink) and receive (Downlink) messages were developed within the firmware. In the latter case, to receive information or orders from the IoT Platform dashboard (also using the TTN middleware). Due to the reduced size of the payload defined by the LoRaWAN standard for data messages, specifically for the frequency plan established and governed by ENACOM (AU915), the defined Payload ranges from 11 to 242 bytes. Therefore, we chose to use the “Cayenne Low Power Payload” (LPP) library, which provides a convenient and easy way to send data over LPWAN networks, such as LoRaWAN. Cayenne LPP [57] is a standardized and proven format that allows a substantial reduction in the number of bytes to be transmitted and allows SpectroGLY to send multiple data from its sensors and context parameters at the same time, in accordance with the rules and technical characteristics of SpectroGLY. In our specific case, using the Cayenne LPP library reduced the Payload to 148 bytes, including the global Cayenne LPP structure (Data ID + Data Type + Data Size).

To configure the technical parameters of both communication options and select the best option according to the operating context, SpectroGLY has the ability to receive the settings through the BLE link from the App, with said information persisting in its nonvolatile Flash memory. From the same App, the user can set the specific parameters of the test to be performed (see in Section IV), where SpectroGLY saves this information in its SRAM memory (“Static Random access Memory”). It then sends the information, adding the test results to the IoT platform. When the user asks SpectroGLY for a test of a water sample (via the App), the firmware makes a reading request to the AS7265X multispectral sensor (via the I2C Bus). After 15 s, the average time the sensor takes to send the response (metadata), the firmware processes this information and sends the result to the App to inform the user. A few seconds later, SpectroGLY sends all the test information to the IoT platform through the previously established connectivity.

IV. MOBILE APP

In conceiving, designing, and developing SpectroGLY, the incorporation of a Mobile App was regarded as key for operating the device, and for obtaining real-time results from the water samples being analyzed. The tool selected for the App development was MIT App Inventor [56]. When the user runs the App for the first time, it must allow the use of two resources in particular: BLE and GPS. These resources are essential to communicate the App with SpectroGLY (BLE) and to establish the geopositioning (GPS) of the user. From a functional standpoint, the App developed for SpectroGLY allows the user to enter the required parameters to start running a water sample test. The parameters to be entered in the App include the source of the water sample (river, lake, city

water, etc.) type of agrochemical suspected to be present in the sample (in this case, glyphosate), types of reactive agents and their aliquots, and context data (country and region, city, or province). After entering the basic parameters required by the system to analyze the sample, the user will execute the sample read request to SpectroGLY. Once the user has requested the reading, and after 15 s, SpectroGLY will then send the test result to the App. After notifying the sample test results, SpectroGLY will also provide context information to contribute to the sample traceability (timestamp, test identifier number, SpectroGLY serial number, and IoT communication link). As supplementary functionalities, the App also offers the user configuration options in SpectroGLY, specifically, the ability to change communication parameters in the IoT Platform. For example, the ability to change and request WiFi network parameters in SpectroGLY (establishing a new SSID and its associated password) and, if the device is in a rural setting and there is LoRaWAN coverage, the ability to easily establish such connectivity. Finally, the App also informs the user of whether the data has been successfully transmitted to the IoT platform.

V. IOT PLATFORM

As mentioned, for this study, we selected ThingsBoard as the IoT Platform. ThingsBoard supports the collection, processing, visualization, and management of generic and customized IoT devices. Additionally, it combines scalability and performance to ensure data persistence. ThingsBoard allows IoT entities to be provided, overseen and monitored in a secure manner, through APIs enriched from the server end. ThingsBoard allows relationships to be established across devices, assets, customers or any other entity. The platform is able to transform and standardize data from the devices, may establish and generate incoming telemetry event alarms, attribute updates, device downtime, and user's actions. For this study, a project was created within ThingsBoard. SpectroGLY was integrated through the MQTT protocol for the urban mode, where the device has access to WiFi networks and supports bidirectional communications: SpectroGLY is able to send information to the IoT Platform, as well as to receive messages from it through RPC. Information is thus displayed on the Dashboard, the Rule Engine is fed, and such information persists in the databases. For the rural setting, the LoRaWAN TTN middleware was integrated through the MQTT protocol in a bidirectional manner, supporting the Uplink and Downlink methods. The Dashboard displays the SpectroGLY geo-positioning, based on GPS coordinates from the user's smartphone (App), the spectral signature obtained from the tested samples and sample results. It provides the ability to perform manual tests and view the most significant parameters of each test: test number, sample ID, sample source, agrochemical analyzed, type/quantity of reactive agents used, and other parameters that help better understand the context in which the test was run. As a complement, the platform also validates and ensures that the measurements in the field are carried out at ambient temperature and humidity. For temperature, allowable measurements range from 20 °C to 24 °C and for

humidity, accepted measurements range from 40% to 70%. The position of the equipment at the time of measurement is also analyzed, thanks to the position sensor (accelerometer) integrated in SpectroGLY. All the information sent from SpectroGLY persists on databases within the IoT Platform and is available for the user to execute searches by date and time, ensuring the respective traceability.

VI. CONCLUSION

In conclusion, we designed, developed, calibrated, and verified the correct operation of SpectroGLY, a low-cost handheld device based on VIS-NIR spectrometry, customized to detect glyphosate residues in waters in rural and urban settings. Thanks to its compact design, it may be used in the lab and in the field. Such flexibility was made possible by using IoT technology which, in addition to the hardware we designed and developed (with embedded IoT connectivity), also incorporates an App and Dashboard Web (IoT Platform) to offer the user a true and complete digital ecosystem to see the results and statistics of measurements made from a smartphone or laptop.

Thanks to SpectroGLY, the user of the system will be able to obtain the results of their samples in 10 min, avoiding said samples having to be transferred to the laboratory for their evaluation, optimizing times and costs. Early warnings can also be issued to the pertinent authorities so that these may implement corrective actions to prevent people from having access to water contaminated with glyphosate, thus avoiding intoxications.

As regards future work, the technology developed could be adapted and evolved into a 100% stand-alone IoT sensor that will allow users to take water samples at a given setting through a small water pump, pre-process sample (inject them with aliquots of activating reactive agents), run the tests, and finally send the results to the IoT Platform by means of the connectivity available in the measurement setting.

ACKNOWLEDGMENT

The authors express their recognition and gratitude to the International Doctoral School, University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, for their support in conducting this research work.

REFERENCES

- [1] B. Yang, X. Huang, X. Yan, X. Zhu, and W. Guo, "A cost-effective on-site milk analyzer based on multispectral sensor," *Comput. Electron. Agricult.*, vol. 179, Dec. 2020, Art. no. 105823.
- [2] N.-T. Tran and M. Fukuzawa, "A portable spectrometric system for quantitative prediction of the soluble solids content of apples with a pre-calibrated multispectral sensor chipset," *Sensors*, vol. 20, no. 20, p. 5883, Oct. 2020.
- [3] C.-N. Nguyen, Q.-T. Phan, N.-T. Tran, M. Fukuzawa, P.-L. Nguyen, and C.-N. Nguyen, "Precise sweetness grading of mangoes (*Mangifera indica* L.) based on random forest technique with low-cost multispectral sensors," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 212371–212382, 2020.
- [4] M. Al-Qayssei *et al.*, "Calibration and testing a low-cost spectrometer for ground measurement Mustafa," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 9, Sep. 2020.
- [5] J. S. Botero-Valencia and J. Valencia-Aguirre, "Portable low-cost IoT hyperspectral acquisition device for indoor/outdoor applications," *HardwareX*, vol. 10, Oct. 2021, Art. no. e00216.

- [6] M. Shokrehkodaie, D. P. Cistola, R. C. Roberts, and S. Quinones, "Non-invasive glucose monitoring using optical sensor and machine learning techniques for diabetes applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 73029–73045, 2021.
- [7] I. Hiroaki, N. Toyonori, and T. Eiji, "Measurement of pesticide residues in food based on diffuse reflectance IR spectroscopy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 51, no. 5, pp. 886–890, Oct. 2002.
- [8] L. de Souza Ribeiro, F. A. Gentilin, J. A. de França, A. L. D. S. M. Felício, and M. B. D. M. Frana, "Development of a hardware platform for detection of milk adulteration based on near-infrared diffuse reflection," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 7, pp. 1698–1706, Mar. 2016.
- [9] M. E. E. Alahi, X. Li, S. Mukhopadhyay, and L. Burkitt, "A temperature compensated smart nitrate-sensor for agricultural industry," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 9, pp. 7333–7341, Sep. 2017.
- [10] G. Mois, S. Folea, and T. Sanislav, "Analysis of three IoT-based wireless sensors for environmental monitoring," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 8, pp. 2056–2064, Aug. 2017.
- [11] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, and E. Sisinni, "Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 12, pp. 3340–3349, Dec. 2017.
- [12] G. M. Dill *et al.*, "Glyphosate: Discovery, development, applications, and properties." In *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds: History, Development, and Management*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010, pp. 1–34.
- [13] A. Grube *et al.*, "Pesticides industry sales, & usage: 2006–2007 market estimates," USA Environ. Protection Agency, 2011. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/market_estimates2007.pdf
- [14] P. Mercurio, F. Flores, J. F. Mueller, S. Carter, and A. P. Negri, "Glyphosate persistence in seawater," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 85, no. 2, pp. 385–390, Aug. 2014.
- [15] J. D. Byer *et al.*, "Low cost monitoring of glyphosate in surface waters using the ELISA method: An evaluation," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 16, pp. 6052–6057, 2008.
- [16] E. Çetin, S. Şahan, A. Ülgen, and U. Şahin, "DLLME-spectrophotometric determination of glyphosate residue in legumes," *Food Chem.*, vol. 230, pp. 567–571, Sep. 2017.
- [17] C. R. Worthing *et al.*, "The pesticide manual," in *Surrey*, 9th ed. Great Britain, U.K.: British Crop Protection Council, 1991, pp. 459–460.
- [18] A. Guevara, "Effects of glyphosate on weight gain and growth in Yamú fingerlings," Brycon Amazonicus, 2009. [Online]. Available: <https://ciencia.lasalle.edu.co/zootecnia/72>
- [19] A. Burgos *et al.*, "Glyphosate toxicity in fish as biological indicators, and analysis of its effects on the environment and human health," *Univ. Health Mag.*, vol. 1, no. 8, Nov. 2007.
- [20] Z. Vilca *et al.*, "Glyphosate in water bodies: Environmental problem," *High Andean Res. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 325–332, 2018.
- [21] M. Varona *et al.*, "Evaluation of the effects of glyphosate and other pesticides on human health in areas targeted by the program to eradicate illicit crops," *Biomédica*, vol. 29, no. 3, pp. 456–475, 2009.
- [22] V. Lepori *et al.*, "Current situation of pesticide contamination in Argentina," *Int. J. Environ. Pollut.*, vol. 29, pp. 25–43, Mar. 2013.
- [23] WHO/IPCS, *Environmental Health Criteria No. 159, Glyphosate*, International Programme on Chemical Safety, Geneva, Switzerland, 1994, ch. 7.
- [24] D. A. Maggioni *et al.*, "National short-term dietary exposure assessment of a selected group of pesticides in Argentina," *J. Environ. Sci. Health, B*, vol. 53, no. 10, pp. 639–651, 2018.
- [25] D. A. Maggioni, M. L. Signorini, N. Michlig, M. R. Repetti, M. E. Sigrist, and H. R. Beldomenico, "Comprehensive estimate of the theoretical maximum daily intake of pesticide residues for chronic dietary risk assessment in Argentina," *J. Environ. Sci. Health, B*, vol. 52, no. 4, pp. 256–266, Apr. 2017.
- [26] L. C. Folmar *et al.*, "Toxicity of the herbicide glyphosate and several of its formulations to fish and aquatic invertebrates," *Arch. Environ. Contamination Toxicology*, vol. 8, pp. 269–278, May 1979.
- [27] R.-V. Osten *et al.*, "Glyphosate residues in groundwater, drinking water and urine of subsistence farmers from intensive agriculture localities: A survey in Hopelchén, Campeche, Mexico," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, no. 6, p. 596, 2017.
- [28] V. C. Aparício, E. De Gerónimo, D. Marino, J. Primost, P. Carriquiriborde, and J. L. Costa, "Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins," *Chemosphere*, vol. 93, no. 9, pp. 1866–1873, Nov. 2013.
- [29] M. Mörtl *et al.*, "Determination of glyphosate residues in Hungarian water samples by immunoassay," *Microchem. J.*, vol. 107, pp. 143–151, Mar. 2013.
- [30] Y. S. Hu, Y. Q. Zhao, and B. Sorohan, "Removal of glyphosate from aqueous environment by adsorption using water industrial residual," *Desalination*, vol. 271, nos. 1–3, pp. 150–156, Apr. 2011.
- [31] A. Özkara *et al.*, "Pesticides, environmental pollution, and health," in *Environmental Health Risk-Hazardous Factors to Living Species*. IntechOpen, 2016.
- [32] P. Nicolopoulou-Stamati, S. Maipas, C. Kotampasi, P. Stamatis, and L. Hens, "Chemical pesticides and human health: The urgent need for a new concept in agriculture," *Frontiers Public Health*, vol. 4, p. 148, Jul. 2016.
- [33] S. Mostafalou *et al.*, "Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives," *Toxicology Appl. Pharmacol.*, vol. 268, no. 2, pp. 157–177, 2013.
- [34] *Method 547 Determination of Glyphosate in Drinking Water by Direct-Aqueous-Injection HPLC, Post-Column Derivatization, and Fluorescence Detection*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 1990, vol. 1.
- [35] M. Kim, J. Stripeikis, F. Iñón, and M. Tudino, "A simplified approach to the determination of N-nitroso glyphosate in technical glyphosate using HPLC with post-derivatization and colorimetric detection," *Talanta*, vol. 72, no. 3, pp. 1054–1058, May 2007.
- [36] Z. X. Guo *et al.*, "Determination of glyphosate and phosphate in water by ion chromatography—Inductively coupled plasma mass spectrometry detection," *J. Chromatography A*, vol. 1100, no. 2, pp. 160–167, 2005.
- [37] M. Ibáñez, Ó. J. Pozo, J. V. Sancho, F. J. López, and F. Hernández, "Re-evaluation of glyphosate determination in water by liquid chromatography coupled to electrospray tandem mass spectrometry," *J. Chromatography A*, vol. 1134, nos. 1–2, pp. 51–55, Nov. 2006.
- [38] E. A. Lee *et al.*, "Methods of analysis by the U.S. geological survey organic geochemistry research group-determination of glyphosate, aminomethylphosphonic acid, and glufosinate in water using online solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography/mass spectrometry," Dept. Interior, Washington, DC, USA, Tech. Rep. 01-454, 2002, p. 13.
- [39] M. Ibáñez, Ó. J. Pozo, J. V. Sancho, F. J. López, and F. Hernández, "Residue determination of glyphosate, glufosinate and aminomethylphosphonic acid in water and soil samples by liquid chromatography coupled to electrospray tandem mass spectrometry," *J. Chromatography A*, vol. 1081, no. 2, pp. 145–155, Jul. 2005.
- [40] D. J. Padilla-Alonso *et al.*, "New temperature-assisted ionic liquid-based dispersive liquid-liquid microextraction method for the determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in water samples," *J. Liquid Chromatography Related Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 147–155, 2017.
- [41] M. P. Moraes *et al.*, "Determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid by capillary electrophoresis with indirect detection using pyridine-2,6-dicarboxylic acid or 3,5-dinitrobenzoic acid," *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 98, no. 3, pp. 258–270, 2018.
- [42] Y. Chang, Z. Zhang, J. Hao, W. Yang, and J. Tang, "A simple label free colorimetric method for glyphosate detection based on the inhibition of peroxidase-like activity of Cu(II)," *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 228, pp. 410–415, Jun. 2016.
- [43] L. K. S. De Almeida, S. Chigome, N. Torto, C. L. Frost, and B. I. Pletschke, "A novel colorimetric sensor strip for the detection of glyphosate in water," *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 206, pp. 357–363, Jan. 2015.
- [44] K. A. Rawat *et al.*, "Mg²⁺ ion as a tuner for colorimetric sensing of glyphosate with improved sensitivity via the aggregation of 2-mercapto-5-nitrobenzimidazole capped silver nanoparticles," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 53, pp. 47741–47752, 2016.
- [45] C. V. Waiman, M. J. Avena, M. Garrido, B. Fernández Band, and G. P. Zanini, "A simple and rapid spectrophotometric method to quantify the herbicide glyphosate in aqueous media. Application to adsorption isotherms on soils and goethite," *Geoderma*, vol. 170, pp. 154–158, Jan. 2012.
- [46] F. Bettazzi, A. Romero Natale, E. Torres, and I. Palchetti, "Glyphosate determination by coupling an immuno-magnetic assay with electrochemical sensors," *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2965, Sep. 2018.
- [47] F. Sánchez-Bayo, R. V. Hyne, and K. L. Desseille, "An amperometric method for the detection of amitrole, glyphosate and its aminomethyl-phosphonic acid metabolite in environmental waters using passive samplers," *Analytica Chim. Acta*, vol. 675, no. 2, pp. 125–131, Aug. 2010.

- [48] E. A. Songa *et al.*, "Electrochemical detection of glyphosate herbicide using horseradish peroxidase immobilized on sulfonated polymer matrix," *Bioelectrochemistry*, vol. 75, pp. 117–123, Jun. 2009.
- [49] J. Sanchís *et al.*, "Determination of glyphosate in groundwater samples using an ultrasensitive immunoassay and confirmation by on-line solid-phase extraction followed by liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 402, pp. 2335–2345, Mar. 2012.
- [50] Q. M. Qadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, and Z. Zhang, "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77454–77473, 2018.
- [51] AMS AG. (2018). *AS7265x*. Version 01-04. [Online]. Available: https://ams.com/documents/20143/36005/AS7265x_DS000612_1-00.pdf
- [52] Addinsoft XLSTAT. (2021). *A Complete statistical Add-in For Microsoft Excel*. XLSTAT. [Online]. Available: <https://www.xlstat.com>
- [53] B. L. Bhaskara and P. Nagaraja, "Direct sensitive spectrophotometric determination of glyphosate by using ninhydrin as a chromogenic reagent in formulations and environmental water samples," *Helvetica Chim. Acta*, vol. 89, no. 11, pp. 2686–2693, Nov. 2006.
- [54] Heltec Automation. (2018). *WiFi LoRa 32 (V2)*. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>
- [55] Espressif. (2021). *ESP32 Datasheet*. Version 3.8. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [56] Massachusetts Institute of Technology (MIT) App Inventor. (2021). *With MIT App Inventor, Anyone Can Build Apps With Global Impact*. [Online]. Available: <https://appinventor.mit.edu/>
- [57] Cayenne. (2021). *Cayenne LPP*. Cayenne Docs. [Online]. Available: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-how-lorawan-works>
- [58] K. Gandhi *et al.*, "Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants," *Environ. Challenges*, vol. 4, Aug. 2021, Art. no. 100149.
- [59] Optoprint. (2020). *AvaSpec-ULS3648 Starline High-Resolution Fiber-Optic Spectrometer*. Optoprint Contents. [Online]. Available: <https://www.optoprim.it/wp-content/uploads/2020/03/AvaSpec-ULS3648.pdf>



Teresa Olivares received the Ph.D. degree in computer science from the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, in 2003.

She is an Associate Professor with the Department of Computing Systems, University of Castilla-La Mancha. She is a member of the research group high-performance networks and architectures at the Albacete Research Institute of Informatics, Albacete. She has participated in more than 40 research projects and has coauthored more than 50 research articles in journals, conferences, and book chapters.

Her main scientific research interests include Internet of Things standards, communications and protocols, heterogeneous low power wireless sensor networks and standards, smart environments, and Industry 4.0 and Reverse Logistics.



Javier Aira was born in Buenos Aires, Argentina, in 1982. He received the bachelor's degree in management of automation and robotics systems from the National University of Lomas de Zamora, Buenos Aires, in 2016, and the master's degree in strategic management in information technology from the European University of the Atlantic, Santander, Spain, in 2020. He is currently pursuing the Ph.D. degree in advanced computer technologies in the IoT discipline in smart cities with the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain.

He has more than 17 years of experience in the industry, specifically in the area of research and development and in projects related to the Internet of Things.



Francisco M. Delicado received the Ph.D. degree in computer engineering from the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, in 2005.

He has been an Associate Professor with the Department of Computer Engineering, the University of Castilla-La Mancha, since 2007, and a member of the research group high-performance networks and architectures at the Albacete Research Institute of Informatics. His research interests include Software Defined Networking (SDN), Wireless Sensor Networks (WSN), and heterogeneous low power WSN and cloud networking.

2.2 DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts

- **Title:** DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts
- **Abstract:** Agrochemicals are to be blamed for the poisoning of millions of human beings worldwide, with acute and chronic exposure to such substances causing thousands of deaths. The presence of agrochemicals in the air is caused by drift—a phenomenon that originates from ground and aerial spraying applied in lands used for agribusiness. Drift refers to the spread and wind-driven transport of agrochemicals that have been volatilized during spraying, and which can easily reach towns and cities. Actively monitoring agrochemical drift is essential to protect the health of citizens and the environment. Many of the systems used for monitoring agrochemicals are currently analog, while those with some degree of digitalization are expensive, complex, and not easily scalable. Therefore, new cost-effective, stand-alone, reliable, easy-to-implement, and citizen-oriented technological tools need to be designed and developed. This article introduces “DriftGLY,” an innovative, low-cost Internet of Things (IoT) early warning system that utilizes a digital traffic light to continuously and automatically monitor the presence of agrochemicals in the air, both individually and in cocktail form. The key innovation of DriftGLY lies in the close relationship between the configuration of its digital traffic light and the precise calculation of the quantity of agrochemicals deposited in spray tanks. This configuration is specifically based on the parameter of the dose rate expressed in liters per hectare of these contaminants. DriftGLY incorporates an original collection system that allows for the indirect detection of agrochemicals in their particulate, gaseous, and, unlike traditional systems, liquid forms. In this manner, DriftGLY displays pollution risk levels through its digital traffic light, transmitting them to an IoT platform via various connectivity options, such as WiFi, LoRaWAN, and GSM/GPRS, and posts them on the social network X (formerly known as Twitter). The aim of this action is to democratize information and promote the necessary changes for citizens to enjoy a healthy and balanced environment.
- **Authors:** Javier Aira; Teresa Olivares; Francisco M. Delicado
- **Status:** Published
- **Published in:** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Volume: 73)
- **Citation:** J. Aira, T. Olivares and F. M. Delicado, "DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-14, 2024.
- **Article Sequence Number:** 5501414
- **Date of Publication:** 05 January 2024
- **ISSN Information:**
 - **Print ISSN:** 0018-9456
 - **Electronic ISSN:** 1557-9662
- **DOI:** 10.1109/TIM.2024.3350146 (click to view the contribution online)
- **Publisher:** IEEE
- **Funding Agency:** This work was supported in part by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 under Project PID2021-123627OB-C52; in part by the European Regional Development Fund (ERDF), “A way to make Europe;” and in part by under Grant 2023-GRIN-34056.

DriftGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for Monitoring Agrochemical Spray Drifts

Javier Aira¹, Teresa Olivares², and Francisco M. Delicado³

Abstract—Agrochemicals are to be blamed for the poisoning of millions of human beings worldwide, with acute and chronic exposure to such substances causing thousands of deaths. The presence of agrochemicals in the air is caused by drift—a phenomenon that originates from ground and aerial spraying applied in lands used for agribusiness. Drift refers to the spread and wind-driven transport of agrochemicals that have been volatilized during spraying, and which can easily reach towns and cities. Actively monitoring agrochemical drift is essential to protect the health of citizens and the environment. Many of the systems used for monitoring agrochemicals are currently analog, while those with some degree of digitalization are expensive, complex, and not easily scalable. Therefore, new cost-effective, stand-alone, reliable, easy-to-implement, and citizen-oriented technological tools need to be designed and developed. This article introduces “DriftGLY,” an innovative, low-cost Internet of Things (IoT) early warning system that utilizes a digital traffic light to continuously and automatically monitor the presence of agrochemicals in the air, both individually and in cocktail form. The key innovation of DriftGLY lies in the close relationship between the configuration of its digital traffic light and the precise calculation of the quantity of agrochemicals deposited in spray tanks. This configuration is specifically based on the parameter of the dose rate expressed in liters per hectare of these contaminants. DriftGLY incorporates an original collection system that allows for the indirect detection of agrochemicals in their particulate, gaseous, and, unlike traditional systems, liquid forms. In this manner, DriftGLY displays pollution risk levels through its digital traffic light, transmitting them to an IoT platform via various connectivity options, such as WiFi, LoRaWAN, and GSM/GPRS, and posts them on the social network X (formerly known as Twitter). The aim of this action is to democratize information and promote the necessary changes for citizens to enjoy a healthy and balanced environment.

Index Terms—Agriculture, agrochemicals, air pollution, environmental monitoring, Internet of Things (IoT), low-power wide-area network (LPWAN), persistent organic pollutants (POPs), smart cities.

Manuscript received 12 September 2023; revised 20 November 2023; accepted 12 December 2023. Date of publication 5 January 2024; date of current version 18 January 2024. This work was supported in part by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 under Project PID2021-123627OB-C52; in part by the European Regional Development Fund (ERDF), “A way to make Europe;” and in part by under Grant 2023-GRIN-34056. The Associate Editor coordinating the review process was Dr. George Dan Mois. (Corresponding author: Javier Aira.)

Javier Aira is with the International Doctoral School, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: jorgejavier.aira@alu.uclm.es).

Teresa Olivares is with the Department of Computing Systems, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: teresa.olivares@uclm.es).

Francisco M. Delicado is with the Department of Computer Engineering, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: francisco.delicado@uclm.es).

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2024.3350146

1557-9662 © 2024 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.

See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

Authorized licensed use limited to: Universidad de Castilla La Mancha. Downloaded on January 19, 2024 at 12:22:22 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

I. INTRODUCTION

IN THE mid-20th century, Rachel Carson’s book “Silent Spring” [1] sparked a significant ecological social movement that brought attention to the harmful effects on the environment of chemicals used for pest control. Over time, and with the significant advance of agribusiness worldwide, the danger posed by these substances, known as Persistent Organic Pollutants (POPs), became evident. This led to international efforts to control their increasing production, marketing, distribution, and use, ultimately aiming to encourage their discontinuation. Seeking to establish regulatory measures based on strict prohibitions and restrictions designed to protect human health and the environment, several international legal instruments were created. These include the conventions of Stockholm [2], Rotterdam [3], and Basel [6], the World Health Organization (WHO) [4], the European Union (EU) [5], the International POPs Elimination Project (IPEP) [7], and the United Nations Environment Programme (UNEP) [8], among others.

POPs are generated and spread by the industrial and agricultural sectors (and also by nature, albeit to a lesser extent), and pose a serious threat to human health and natural ecosystems [8]. POPs have low biodegradation capacity, making them highly persistent in the environment. They are also bioaccumulative and have long-range transport potential [9]. Furthermore, they are generally present in small quantities. For this reason, early and selective detection is important.

In this article, we focus on the airborne spread of POPs in the context of agribusiness (agrochemicals). The global use of agrochemicals has increased by 80% since 1990, while the worldwide market is expected to reach USD 130 billion (United States Dollars) in 2023. In some regions of the world, such as Latin America (+484%) and Asia (+97%) [10], the rising use of agrochemicals is alarming. Agrochemicals are to blame for 11 000 human deaths from poisoning per year. In addition, 385 million people fall ill every year from mild or severe cases of non-fatal poisoning [10]. The United Nations Human Rights Council estimates that 200 000 people die per year as a result of chronic exposure [11].

The movement of agrochemicals in the air is technically referred to as drift. Agrochemical molecules travel great distances through the air, infiltrate groundwater, travel through rivers, descend with rainfall, and spread through airborne dust, as well as through various other means, reaching towns and cities. The recommendations to minimize pollution from agrochemical drift are often ineffective in practice, in that they cannot control the movement of

agrochemical molecules once they are released into the environment [12].

Considering the substantial negative impact of agrochemicals, this article seeks to propose an improvement to take the current monitoring systems to the next level, by implementing a solution based on the Internet of Things (IoT). Such a solution will primarily comprise a low-cost IoT node called “DriftGLY,” which was designed and developed based on the functional concept of an early warning digital sentinel. From an IoT connectivity perspective, DriftGLY provides several options for operation in specific environments. This includes the capability to connect to WiFi, LoRaWAN, and Global System for Mobile Communications/General Packet Radio Services (GSM/GPRS) networks, facilitating the monitoring and diagnosis of agrochemical contamination levels at the edge. DriftGLY aims to alert citizens and authorities of the presence of agrochemicals in the air, using a multiplatform digital ecosystem. DriftGLY detects agrochemicals in the air through a sample collection and sensing system in the form of particulate matter and gaseous phase (similar to traditional systems). However, it can also perform phase conversions, in that it has a system allows samples to be collected in the liquid phase (such as drift of agrochemical droplets or rainwater containing diluted agrochemicals) and converts them into the gaseous phase. This enables it to diagnose contamination levels on edge and express them through its digital traffic light system.

This work introduces an additional innovation by scaling the digital traffic light based on the values of the minimum and maximum dose rate (expressed in liters per hectare) of the two herbicides selected for the study, namely 2,4-D and glyphosate. These values were previously validated by authorities and manufacturers. Scaling the traffic light is directly connected to the precise calculation of the amount of agrochemicals deposited in the spraying tanks, which directly influences their presence and effects in towns and cities. In addition to conveying contamination levels through its digital traffic light, DriftGLY sends diagnoses and metadata to an IoT-based platform for visualization and subsequent analysis. Simultaneously, and with the aim of staying connected with citizens, DriftGLY will send “Tweets” from its own X account [13], providing updates on the most significant events occurring in each monitoring context.

This study seeks to determine the effectiveness of the DriftGLY system by presenting an initial functional laboratory prototype (see Fig. 1). This prototype showcases its technical and functional features, providing empirical evidence of its proper functioning in detecting the agrochemicals selected for this study, individually and in cocktail format.

The rest of the document is structured as follows. Section II presents the current landscape of technological systems used for monitoring POPs and agrochemicals. Section III describes the system’s global architecture, with a detailed description of DriftGLY provided in Section IV. Next, Section V describes the development of the IoT-based platform, where the information generated by DriftGLY is concentrated, stored, and displayed. The calibration and validation processes used to demonstrate the feasibility of DriftGLY are outlined in

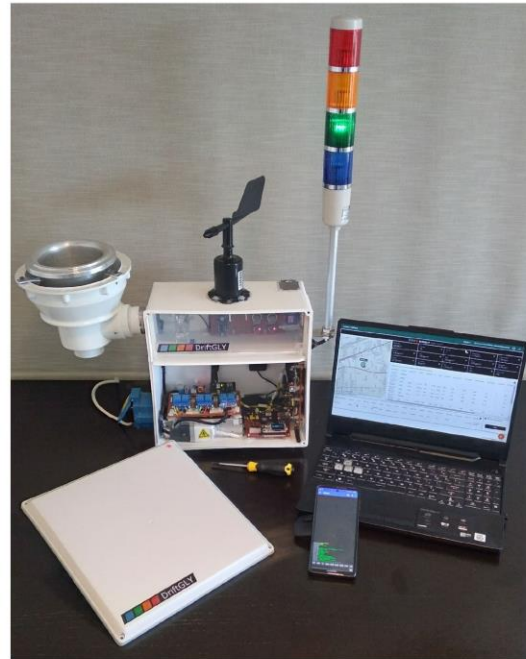


Fig. 1. DriftGLY (laboratory prototype).

Section VI, and, finally, Section VII includes the conclusion and future projects.

II. AGROCHEMICAL MONITORING BACKGROUND

According to the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), drift is defined as the movement of spray droplets of an off-target agrochemical, caused by the transport of air masses or non-adherence [14]. The percentage of an agrochemical application that could “drift” may reach up to 90% of the product sprayed on crops [15]. On average, it is estimated that approximately 25% of agrochemical sprays hit the target, while the rest directly affect other unintended agents [16].

To delve further into the characteristics of agrochemical drifts, they can be classified into three types: primary, secondary, and tertiary. Primary drift can occur during the application itself, while agrochemicals are being sprayed. Primary drift can be minimized by optimizing various factors. In this regard, monitoring climate-related variables is essential as an external technical factor associated with application technologies [15], [17]. Concerning secondary drift, after the application is completed, the effects of climate-related factors such as high temperatures, low relative humidity, changes in wind speed and direction, thermal inversion, and others, can lead to re-volatilization or evaporation of the agrochemicals applied, making them travel several kilometers. Tertiary drift is the movement of agrochemicals outside the land sprayed at times subsequent to application, ranging from weeks to months or even years, due to various phenomena. This causes agrochemicals to travel long distances from their application

points, to the extent facilitated by the movement of the upper layers of the atmosphere [18]. The consequences of tertiary drift have been revealed by several research studies [19].

In Argentina, the country where this research study was conducted, the National Service for Food Health and Quality (SENASA) is the regulatory authority responsible for enforcing federal policies related to the control and regulation of agrochemicals in the agricultural industry. By means of resolutions, SENASA establishes the legal framework that stipulates the necessary requirements for the approval and marketing of agrochemical products. Against this backdrop, SENASA embraces the best practices recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO) and includes, for each new agrochemical product, the requirement that toxicological and ecotoxicological experimental studies be conducted at accredited laboratories that comply with the international guidelines of the Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE) [20]. For agrochemical products, SENASA also relies on the toxicological classification provided by the WHO [21] and Global Harmonized System (GHS) [22], which classify these products by hazard. Furthermore, the National Institute of Agricultural Technology (INTA)—a state-run organization tasked with fostering technological innovation to enhance competitiveness and rural development in Argentina—establishes and promotes good practices in agrochemical handling and application. INTA provides that the dose rates of agrochemicals per hectare recommended by their manufacturers and SENASA must be observed, in that the excessive or disproportionate use of these products could lead to a higher risk of contamination in soil, water, and air, potentially causing severe poisoning in humans and animals [23].

In this article, we examine two herbicides certified by SENASA [24] and the combination of both to include their cocktail effect. The agrochemicals selected are the 2,4-D herbicides with toxicological type II (SENASA registration No. 38168) and glyphosate with toxicological class III (SENASA registration No. 32291). The cocktail of glyphosate and 2,4-D is widely used in agribusiness due to its effective performance in controlling undesirable weeds [25]. However, its potential adverse effects on human health and the environment have also been demonstrated [26], [27].

Several passive and continuous methods exist to monitor the drift of POPs and agrochemicals in the air. The passive methods include passive air samplers (PASs) [28], which are used for the collection of contaminants such as volatile organic compounds (VOCs), regulated POPs, and polycyclic aromatic hydrocarbons. PASs can be implemented quickly and easily, and do not require electricity. After the sampling period, samples are taken from the device and transported to a specialized laboratory for further analysis, using methods such as high-performance liquid chromatography (HPLC), liquid chromatography with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry (LC-ESI-MS/MS), among others. High volume samplers (HVSs) are also among the passive methods used for the detection of POPs and agrochemicals [29]. These samplers can collect a large volume of air in a short time, while also enabling simultaneous sampling of particulate matter. Each

sample consists of a filter in which part of the particulate matter is collected: PM 1.0 (1.0 μm), PM 2.5 (2.5 μm), and PM 10 (10 μm). They are typically supplemented by using a PAS for the collection of particles and/or gases that are deposited by rainwater.

Traditional continuous monitoring systems enable the continuous measurement of POPs (particulate matter and gaseous phase). These systems vary according to the type of pollutant being monitored [30], [31]. They are generic, expensive, and complex, while lacking edge intelligence and being unscalable.

Finally, various scientific papers [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41] have also been published based on IoT systems that enable the monitoring of air quality in urban, peri-urban, and agricultural environments in order to protect human health, the environment, and food product quality. Most of the monitoring systems discussed in these papers are low-cost and monitor different sources of pollution, such as the presence of POPs, VOCs, particulate matter, and others. Some of these systems have the ability to transmit field measurements through cellular, LoRaWAN, or WiFi connectivity. However, they typically support only a single connectivity option and lack multiple options in a single device to adapt to potential connectivity limitations common in peri-urban or rural areas. Most of these systems include cloud platforms to visualize the telemetry obtained in the field. A noteworthy study is authored by Radogna et al. [35], who developed and implemented an LoRa-based low-cost IoT system for monitoring glyphosate in an agricultural setting. In this study, sensors with different characteristics were implemented to measure only the presence of this herbicide in air, water, and soil. In the case of air, the experimental results revealed that the presence of glyphosate could be successfully detected and monitored using VOC sensors.

Unlike the previously mentioned systems and studies, DriftGLY takes a more specific approach by focusing on the monitoring of agrochemicals, both individually and in cocktail format. This perspective is highly relevant due to the documented synergistic interaction between these contaminants, which can intensify their effects and have serious implications for human health and the environment. The systems mentioned earlier have the capability to detect contaminants in their particulate and gaseous phases only. Even those that consider the liquid phase do so through analog or partially digitalized systems, without the ability to perform phase conversions for on-the-edge determinations. As a result, collected samples need to be sent to specialized laboratories for analysis, incurring additional costs and delays in implementing corrective actions. In contrast, DriftGLY has incorporated a phase conversion system that allows the collection of samples in liquid form, such as drift from agrochemical droplets or rainwater with diluted agrochemicals, which are subsequently measured in the gaseous state. This phase conversion system, integrated into DriftGLY, consists of various components that work together to enable on-the-edge determinations. Unlike the previously mentioned systems, DriftGLY stands out as an early warning system that utilizes a digital traffic light to visualize contamination levels. Furthermore, DriftGLY introduces a crucial innovation by enabling the determination of the presence of agrochemicals in the air based on the quantity

of agrochemicals applied in the agricultural environment (ultimately reaching populated areas). It is important to emphasize that DriftGLY's contribution lies in a space where early warning devices for detecting and communicating the presence of agrochemicals in the air are currently lacking. In this regard, DriftGLY is also designed to collect samples that are later sent to specialized laboratories for the analysis of more complex parameters, such as concentration expressed in milligrams per liter of agrochemicals. This parameter is linked to an inhalation toxicity class associated with an inhalation toxicity category that provides information about the severity of contamination and its effects on people and the environment.

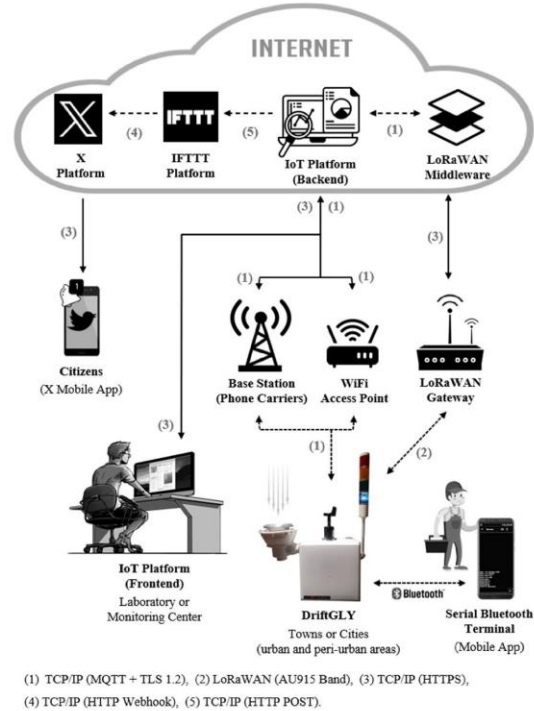
Regarding IoT communications, it is essential to highlight that the previously mentioned systems lack backup options to overcome coverage limitations often encountered in peri-urban or rural areas near towns and cities. In contrast, DriftGLY has been designed with the capability to connect to multiple networks, including WiFi, LoRaWAN, and GSM/GPRS chips on the communication module, allowing it to operate flexibly in various geographical contexts. Additionally, the previously mentioned systems do not feature external physical signage to inform citizens present on-site about contamination levels. Conversely, DriftGLY is equipped with a physical traffic light that offers immediate visualization of the contamination level to nearby individuals. Moreover, unlike the systems presented earlier, DriftGLY not only provides authorities with a specialized dashboard for accessing the readings from its digital traffic light and associated metadata, but it also publishes these values on a social network. This establishes a direct and transparent channel of communication with citizens.

III. DRIFTGLY ARCHITECTURE

The main purpose of DriftGLY and its comprehensive digital ecosystem embodied in its architecture (see Fig. 2) is to continuously and automatically monitor the presence of agrochemicals in the air. Its core objective is to contribute to safeguarding the health of the population exposed and the environment. DriftGLY displays the contamination levels detected using a digital traffic light, transmitting its statuses to an IoT-based platform, and simultaneously posting them on X social network. DriftGLY senses air samples every 5 min, being able to detect contamination early.

It is worth noting that the works [42], [43] have served as a foundation for the development of some of the components, both software and hardware, used in this article. DriftGLY, along with the aforementioned works, is part of a broader research initiative addressing three significant environmental challenges interconnected through the influence of contamination resulting from the use of agrochemicals in the agro-industrial context, ultimately impacting Smart Cities. These challenges manifest in three fundamental domains: air (DriftGLY), water [43], and, as a result of the interaction between these two, along with other complex factors, the proliferation of disease-transmitting insect vectors to humans [42]. These three challenges hold substantial significance for both public health and ecological balance.

The architecture is based on an IoT platform to receive, store, and publish data from several monitoring sites at which the DriftGLY devices will operate. The IoT platform used for



(1) TCP/IP (MQTT + TLS 1.2), (2) LoRaWAN (AU915 Band), (3) TCP/IP (HTTPS), (4) TCP/IP (HTTP Webhook), (5) TCP/IP (HTTP POST).

Fig. 2. Digital ecosystem associated with DriftGLY.

this research study was ThingsBoard [44], which was selected because of its architecture based on microservices and the integration of a Message Queue Telemetry Transport (MQTT) broker supporting two-way communications. A protocol based on remote procedure calls (RPC) was also implemented to send commands or orders from the web dashboard to the DriftGLY devices installed at each monitoring site. In certain monitoring settings where WiFi or cellular connectivity is unavailable (such as peri-urban or rural areas), The Things Networks (TTN) middleware [45] was also integrated to support LoRaWAN communications [46], [47]. For this research study, a LoRaWAN in the Australian frequency band (AU915) was implemented (see Table I), in compliance with the radio spectrum standards issued by the National Communications and Media Regulator of Argentina (ENACOM). The gateway used in this study was Dragino LG02 [48], which was integrated into TTN by means of the hypertext transfer protocol secure (HTTPS) protocol. The TTN middleware was integrated into the IoT platform through MQTT over transport layer security (TLS) v1.2. The architecture also includes the integration of the IoT platform with the If This Then That (IFTTT) platform [49]. IFTTT allows triggers to be set up that initiate automated reactions. This feature enables its integration with X social network through the Webhooks communication system (also known as "reverse API"), which operates through HTTP requests, thus allowing Tweets to be sent from the official account of the DriftGLY system. The purpose of using this social media platform is to establish

TABLE I
LORAWANRADIO PARAMETERS

Parameters	Values
Region	Argentina
Regulatory Entity	ENACOM
Channel Plan	AU915 (Australian band)
ISM (Industrial, Scientific and Medical) band	915-928 MHz
Frequency Sub-Band (downlink)	1 (3 Kbits/s)
Service Provider (Middleware)	TTN
Gateway (hardware)	Dragino LG02
Network Join Procedure	Over-The-Air-Activation
Payload size	11 to 242 bytes (195 bytes used)
SF (Spreading Factors)	SF7 (125 kHz)
TX restriction	400 ms
Data rate	0.976 kbps to 12.5 kbps
EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)	+ 30 dBm (TX Power)

a more direct communication link with citizens, for them to be informed about the potential contamination that may exist in their towns or cities. If citizens require access to more detailed information, they can also access the IoT platform’s web dashboard through a public and freely accessible uniform resource locator (URL). Finally, the architecture also includes a tool used by the system installer in the monitoring context: a mobile app named Serial Bluetooth Terminal (SBT), developed by Kai Morich [50], which allows Bluetooth commands to be sent and received. In this case, this tool was used to perform tests and define settings on the DriftGLY devices.

IV. DRIFTGLY IMPLEMENTATION

DriftGLY has been designed to operate outdoors, and thus features a robust IP65 (Ingress Protection Code 65) polypropylene enclosure. This enclosure houses various electronic modules, including the computing and communications module (CCM), sensing module (SM), and control and power module (CPM) (see Fig. 3). Additionally, the enclosure integrates a collection system to gather samples of agrochemicals in their particulate, gaseous, and liquid forms, using an aluminum recipient (capacity: 1000 cm³). The collection system also features a robust acrylonitrile butadiene styrene (ABS) structure that houses the aluminum recipient. This recipient is connected via a conduit (Ø 2.5 in) to a sensing cabin located inside the central polypropylene cabinet of DriftGLY (capacity: 5115 cm³). For agrochemical samples in the liquid phase (drift from agrochemical droplets or diluted in the form of rain), the system detects their presence using a rain sensor. Additionally, it incorporates an evaporation system (band heater) to transform the liquid phase into a gaseous phase, enabling measurement in a similar manner to that of HVS systems (particulate matter and gaseous phase). The collection system also includes a 50-mL receptacle with a small filter where liquid samples are stored for subsequent analysis at the laboratories (similar to PAS systems). For the present research study, this receptacle was used to collect samples, which were later sent to a laboratory in order to validate the proper functioning of DriftGLY (see Section VI). The main function of DriftGLY’s sensing cabin is to capture, measure,

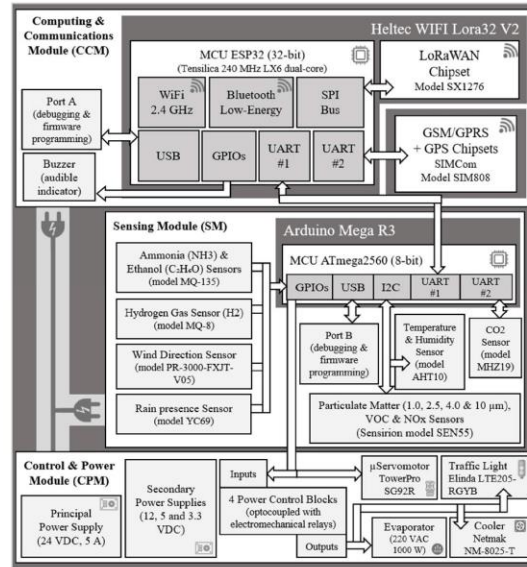


Fig. 3. Implemented hardware.

and release air samples. The sensing cabin is hermetic. Inside, there are sensors (SM), an internal system for the intake and exhaust of air samples (cooler), and a hatch assisted by a micro servo motor to enable the release of air samples to the outside. After completion of the air sample evaporation process in the collection system, the cooler is turned on in intake mode to transfer the air samples into the sensing cabin. Once inside, the air samples are analyzed by the sensors, and when this process is complete, the cooler is activated (in exhaust mode) and the hatch is opened to release the analyzed air samples to the outside. Once the process of capturing, measuring, and releasing air samples is finished (which takes 3 min), DriftGLY determines whether agrochemicals are present. Based on the result, it activates a color on the digital traffic light and communicates the results to the IoT and X platforms. DriftGLY was designed and developed from a low-cost perspective, as opposed to the traditional technological solutions referred to in Section II, which propose more expensive, complex, and barely scalable alternatives.

The development of this work required a total investment of USD 1.023. From this budget, USD 450 was allocated to the construction of the first DriftGLY prototype (hardware), while the LoRaWAN gateway represented a cost of USD 98. The subscription to the IoT platform for six months amounted to USD 60. In addition, USD 415 was allocated for the purchase of essential inputs and accessories to carry out laboratory tests.

A. Computing and Communications Module (CCM)

From the perspective of ensuring the automatic and stand-alone functioning of DriftGLY at each monitoring site, the CCM manages the overall functional logic of the system, handles IoT communication links, and controls the

other modules (SM and CPM) of DriftGLY. To meet these requirements, we embedded the Heltec WiFi Lora32 V2 board [51] into DriftGLY. This board features a powerful dual-core 32-bit micro-controller unit (MCU) based on the ESP32 Tensilica 240 MHz LX6. In addition to this significant computing resource, the Heltec board integrates the SX1276 chipset (915 MHz) for LoRaWAN communications (AUS915), a 2.4-GHz WiFi chipset, and a Bluetooth low energy (BLE) chipset for bidirectional interaction with the SBT Mobile App. This app is used to define settings and send commands via BLE to conduct tests and technical diagnostics on DriftGLY. As a complementary feature, the CCM also integrates a GSM/GPRS + global positioning system (GPS) chipset, specifically, the SIMCom SIM808 [52] model. With these IoT connectivity options, DriftGLY will be able to operate in urban, peri-urban, or rural environments, accommodating the connectivity options available in these settings. The CCM is also capable of establishing two-way communication with the SM through the universal asynchronous receiver-transmitter (UART) port to request the execution of air sample sensing tests, and receives the response or feedback once these processes are completed.

B. Sensing Module (SM)

The SM is equipped with an Arduino Mega R3 board [53], which, in turn, integrates the 8-bit Atmel MCU, model ATmega2560. This MCU manages the main and secondary sensors, as well as auxiliary assistance actuators for the process of collecting and sensing agrochemical samples in the air. The main sensors of the SM, responsible for indirectly sensing the presence of agrochemicals in the air, include the Sensirion sensor, model SEN55 [54]. This sensor is able to measure particles PM 1.0, PM 2.5, PM 4.0, and PM 10 in a range of 0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Additionally, it can measure VOCs and nitrogen oxides (NO_x) in a range of 0–500 index points—an index developed by the manufacturer that simulates smell perception by the human nose. This sensor has a $\pm 10\%$ precision error and comes factory-calibrated. Sensirion has calibrated it using a TSI DustTrak¹ aerosol and dust monitor, model DRX8533. Together with the SEN55 sensor, the MQ-135 [55] and MQ-8 [56] sensors were also integrated. MQ-135 was calibrated to measure ammonia (NH_3) and ethanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) in a range of 10–300 ppm (parts per million), while the MQ-8 was calibrated to measure hydrogen gases in a range of 100–1000 ppm.

As mentioned in Section I, the range of agrochemicals is considerably extensive, with each having a specific chemical composition (this article will not delve into these specifics). However, the detection and precise measurement of agrochemicals require specialized analytical techniques, which are complex and costly, being typically performed in laboratory settings, once samples of these pollutants are collected in the field. In this regard, the aforementioned sensors are meant to indirectly detect the presence of agrochemicals. These and other sensors are used by the POPs and agrochemicals monitoring systems presented in Section II. Additionally, secondary sensors were also integrated, such as the MHZ19C

¹Trademarked.

NDIR (nondispersive infrared) [57], which measures the presence of carbon dioxide (CO_2) in the air within a range of 400–2000 ppm (accuracy error: ± 50 ppm). The rationale for incorporating CO_2 and NO_x sensors is to enhance the understanding of events in the setting where agrochemical applications are made. The factory-calibrated AHT10 sensor [58] was also implemented, which measures temperature in a range of -40 °C to 85 °C (accuracy error: 0.3 °C) and relative humidity in a range of 0%–100% RH (accuracy error: 2% RH). The rationale for using this sensor is based on determining whether the detection of agrochemicals in the air carried out by DriftGLY is enhanced by these climate-related variables, which are linearly associated with the enhancement and propagation of drift from agrochemical spraying. The YC69 rain presence sensor [59] was also implemented to help DriftGLY determine whether the conversion from liquid to gaseous phase should be performed (evaporator switch-on) to more accurately measure the presence of agrochemicals. Lastly, a PR-3000-FXJT-V05 wind direction sensor [60] was deployed to help determine what is happening in the measurement context and to understand from which cardinal point the detected agrochemical drifts come.

C. Control and Power Module (CPM)

The CPM has a main switching power supply (24 VDC, 5 A) and three secondary switching power supplies (12, 5, and 3.3 VDC) to supply the other modules of DriftGLY. In addition, the CPM also integrates four power control blocks optocoupled with electromechanical relays to control DriftGLY actuators (traffic light, evaporator, cooler, and micro servo motor). The first actuator of the CPM is the Elindar traffic light, model LTE205-RGYB [61], which consists of four red, yellow, green, and blue incandescent lamps. The first three colors (red, yellow, and green) were assigned to communicate the air pollution status, while the last one (blue) was assigned to indicate that the sensing and communication process is taking place. The second actuator is an evaporator equipped with a Tempco band heater, model MBH20549 (220 VAC, 1000 W) [62]. Its maximum temperature is 480 °C. For this study, the operating temperature was limited to 150 °C (the band heater was attached to the perforated aluminum recipient). The third actuator is a Netmak cooler, model NM-8025-T (size: 80 × 80 mm, airflow: 30 m^3/h , and 1400–1800 r/min) [63]. It works as an internal air intake and exhaust system within DriftGLY. The fourth actuator is a TowerPro micro servo motor, model SG92R (stall torque: 2.5 kg/cm, weight: 9 g, and operating speed: 0.1 s/60°) [64]. It operates a hatch within the DriftGLY cabin to release the air sensed by DriftGLY's SM. The CPM is controlled by the SM through the native digital and analog GPIOs (general-purpose input-output) of its MCU.

This first version of DriftGLY operates through the conventional electrical grid and does not include internal batteries. It is primarily designed for deployment in areas with access to the standard electrical grid, as its primary function is to monitor areas where agrochemical drifts have a harmful impact. However, during the design phase, the possibility of integrating an external solar panel system (e.g., on-grid type) was considered as a backup in case of conventional electrical grid interruptions.

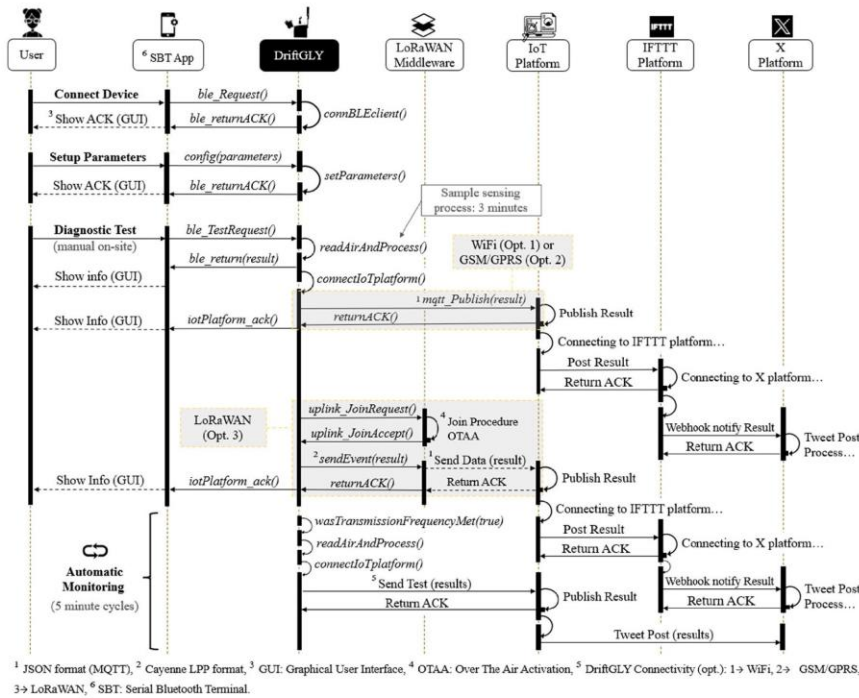


Fig. 4. UML sequence diagram of the firmware (DriftGLY).

D. Firmware Developed

The entire firmware was developed in C/C++ programming language, using Arduino and Visual Studio Code Integrated Development Environments (IDEs). To debug the firmware, the “ESP-PROG” hardware [65] was used, which was connected to the Joint Test Action Group (JTAG) port of the MCU.

Regarding IoT communications, the firmware of this module is capable of connecting and operating in WiFi networks (fixed or mobile), as well as in GSM/GPRS cellular networks. For these communication links, the MQTT protocol (over TLS 1.2) and an RPC-based protocol were implemented in the firmware, allowing information and orders to be received from the web dashboard (frontend) of the IoT platform. DriftGLY is also able to connect to LoRaWAN networks. Furthermore, the mechanisms required to send (uplink) and receive (downlink) messages through these LPWAN networks were implemented in the firmware [66]. The latter (downlink) was deployed to receive information or commands from the web dashboard of the IoT platform (e.g., reprogramming the transmission frequency of synchronous events). Due to the limited payload size defined by the LoRaWAN standard for data messaging, the Cayenne Low Power Payload (LPP) library [67] was used. Cayenne LPP is a standardized and proven format that enables a substantial reduction in the number of bytes to be sent. In this specific case, the use of Cayenne LPP helped reduce the payload to 195 bytes, including the Cayenne global structure (data ID + data type + data size).

In order to set up DriftGLY (at the monitoring site), the installer uses the SBT mobile app to send the applicable settings for the device to be able to operate autonomously and automatically. In this respect, DriftGLY firmware administers and saves such settings on its flash memory (non-volatile). DriftGLY firmware also administers its SRAM for certain technical and functional circumstances in which the information is temporarily used and protected. Once DriftGLY has been fully set up, the installer can request a sensing test of an air sample using the SBT mobile app. When this occurs, the CCM firmware requests a sensing test from the SM via the UART port. After 3 min—the time it takes the SM to complete the sensing process and send the response—the firmware processes such information and sends the results to the SBT mobile app to locally notify the user. A few seconds later, DriftGLY submits the information related to the test to the IoT platform through previously established connectivity. Based on the color displayed on the traffic light, the IoT platform will ask IFTTT to post it on X.

Fig. 4 depicts a unified modeling language (UML) sequence diagram illustrating the behavior and interaction of DriftGLY with the system components. The DriftGLY firmware also features programmable functional logic to transmit synchronous events to the IoT platform at a configurable frequency. The sensing and communication frequency of DriftGLY to the IoT platform was set at 5 min (288 communications per day) for the three types of supported connectivity. In the case of X notifications, only critical events with yellow and red states

in the traffic light are posted, these being associated with the presence of agrochemicals in the air.

V. IOT PLATFORM

ThingsBoard [44] was the IoT platform selected for this study, as it allows generic and customized IoT devices to be collected, processed, visualized, and managed. The platform combines scalability and performance to ensure data persistence. ThingsBoard allows IoT entities to be securely provided, supervised, and monitored, through enriched application programming interfaces (APIs) from the server side. The platform is able to transform and standardize data from the devices and set up and trigger incoming telemetry event alarms, attribute updates, device downtime, and other significant user actions.

A web dashboard (frontend) was designed and developed within ThingsBoard, which allows for real-time visualization of the monitoring data from each DriftGLY device installed (whether broadcasting via WiFi, GSM/GPRS, or LoRaWAN). The user can access information specific to each installed device: DriftGLY geo-location through interactive maps; the address, province, and country in which the device is located; the person in charge of the site (name and contact details); type of place where DriftGLY will operate; and name of installer in charge. In addition to contextual information, the web dashboard displays details about the monitoring status at each specific site, including the contamination status through its digital traffic light indicator and the type of agrochemical detected. The web dashboard also displays specific technical information about DriftGLY, such as communication status (link type, signal level, and type of submitted events) and DriftGLY-specific data (device ID and firmware version). It also provides supplementary data about the sensors and actuators presented in Sections IV-B and IV-C. In this regard, the platform also incorporates a Rule Engine section where rules can be set up to notify platform operators via email upon their activation (e.g., the presence of a red traffic light, low WiFi signal level, or other events). All information submitted from DriftGLY persists on databases within the platform and is available for the user to perform searches by date and time, ensuring the system's traceability. Additionally, the IoT platform also has a REST (representational state transfer) API, which allows for access to all data and a copy of such data for subsequent processing with third party platforms to perform future studies.

VI. EXPERIMENTAL VALIDATION

As mentioned in Section I, this study seeks to determine the effectiveness of the DriftGLY system by presenting an initial functional laboratory prototype (Fig. 5 depicts the node on a 1.8-m post). Therefore, apart from describing its technical and functional features (see Sections III-V), this section provides empirical evidence of its proper functioning. To achieve this, the experimental calibration and validation processes are presented.

A. Calibration Process

To calibrate and construct DriftGLY's digital traffic light, the minimum and maximum dose rate values (expressed



Fig. 5. Experimental setup.

TABLE II
SAFETY INTERVALS OF THE DIGITAL TRAFFIC LIGHT

Segment ID	Agrochemical name	Agrochemical type	Treatment type	Agrochemical dose rate (l/ha)		Traffic Light (assignment)
				A	B	
1				0 (white)		Okay
2	2,4-D	Herbicide	Individual	≥ 0.5 ¹	≤ 3.5 ¹	Warning
3				≥ 3.6		Hazard
4				0 (white)		Okay
5	Glyphosate	Herbicide	Individual	≥ 2 ¹	≤ 6 ¹	Warning
6				≥ 7		Hazard
7				0 (white)		Okay
8	2,4D + Glyphosate	Herbicide + Herbicide	Cocktail	(0.5)+(2)	(3.5)+(6)	Warning
9				(3.6)+(7)		Hazard

¹ Minimum and maximum dose rates published by agrochemical manufacturers (SENASA certified).

in liters per hectare) of the herbicides 2,4-D [68] and glyphosate [69] were used. These dose rate values are detailed in the technical data sheets of these products and are parameters that have been previously established by authorities and manufacturers as part of their homologation and subsequent commercialization process. Table II presents the dose rate values for the agrochemicals 2,4-D, glyphosate, and the cocktail of these compounds. These safety intervals are associated with the states of the digital traffic light, both for each individual product and in the case of the cocktail. The color yellow, labeled "Warning," indicates the presence of any of the two selected agrochemicals (or cocktail) within the dose rate ranges established by the authorities. Meanwhile, the color red, labeled "Hazard," indicates the presence of any of the two selected agrochemicals (or cocktail), but with dose rates in excess or outside the specified range. Finally, the color green, labeled "Okay," indicates the absence of agrochemicals (see Table II).

The DriftGLY calibration process was conducted in the municipality of Ezeiza, Province of Buenos Aires, Argentina, on a 1-hectare field that was fit to operate as a testing laboratory. Each field test was conducted using a Dogo backpack ground sprayer, model DOG18020, for professional use, with a capacity of 20 L, a pressure of 3 bars, and a coverage of

20–30 droplets/cm² [70]. For the tests conducted, the amount of agrochemicals to be used and deposited in the sprayer tank was calculated following the recommendations of Caseley [71] and the FAO. In this respect, the agrochemical dose rate (l/ha) recommended by the manufacturer and the national certifying authority was multiplied by the capacity of the sprayer tank (liters). This value was then divided by the application volume (l/ha). This parameter depends on the type of spraying method used (ground or aerial). For this study, a ground sprayer was used, and so an average application volume of 100 l/ha was adopted, also as recommended by Caseley [71] and the FAO. After determining the quantity of agrochemical product, the composition of the spraying broth was established. For this study, only water was used, as it is the fundamental and traditional medium for dissolving agrochemicals.

To conduct the calibration tests, a day with suitable weather conditions was chosen, following the recommended good practices for agrochemical application (relative humidity: 70% RH, temperature: 20 °C, and wind speed: 7 km/h) [12]. Before and during the tests, these parameters were monitored from the local meteorological service’s website [72], while, in the field, these variables were confirmed using the DriftGLY prototype sensors (temperature and humidity). The calibration process was conducted as follows.

- 1) *Preparation of Calibration Samples:* As shown in Table III, the calibration process involved a total of 180 samples that were prepared and placed in 15 containers with a capacity of 20 L, following the guidelines of Caseley [71] and the FAO regarding the application volume and the quantity of agrochemicals to be deposited in the Dogo sprayer. The calibration samples were divided into three groups: 60 samples for 2,4-D, 60 samples for glyphosate, and 60 samples for the cocktail of both herbicides. The 180 samples were measured by the sensors integrated into DriftGLY (PM 1.0, PM 2.5, PM 4.0, PM 10, VOCs, ammonia, ethanol, and hydrogen gases).
- 2) *Samples Transmission:* Each of the measurements taken was transmitted to the IoT platform via WiFi connectivity and manually monitored through the SBT Mobile App.
- 3) *Download Data:* Once the tests were completed, the metadata from the IoT platform was downloaded in CSV (comma separated values) format for statistical analysis using the XLSTAT statistical software [78].
- 4) *Calibration:* The calibration model adopted was the multiple linear regression (MLR) model, which is a versatile statistical model for assessing the relationships between a continuous outcome and multiple predictors. Through the XLSTAT software, the three MLR models for 2,4-D, glyphosate and the cocktail were developed. The results obtained indicate that the MLR models applied to 2,4-D, glyphosate and the cocktail of both agrochemical products showed a high level of accuracy in prediction. The coefficients of determination (multiple R, R-squared, and adjusted R-squared) for all three cases exceeded 95%. This suggests that over 95% of the variability in the agrochemical dosage rate could be explained by the MLR model, indicating excellent

TABLE III
DOSES ESTABLISHED FOR THE CALIBRATION PROCESS

Agrochemical name	Agrochemical dose rate (l/ha)	Spray Volume (l/ha) ²	Spray Quantity (broth) ³		Calibration samples
			Agrochemical product (l)	Water (l)	
2,4-D	0 (white)	0	0	20	20
	0.50 ¹	100	0.10	19.90	10
	3.50 ¹		0.70	19.30	10
	7		1.40	18.60	10
	14		2.80	17.20	10
Glyphosate	0 (white)	0	0	20	20
	2 ¹	100	0.40	19.60	10
	6 ¹		1.20	18.80	10
	12		2.40	17.60	10
	24		4.80	15.20	10
2,4-D + Glyphosate (Cocktail)	0 (white)	0	0	20	20
	(0.50)+(2) ¹	100	(0.10)+(0.40)	19.50	10
	(3.50)+(6) ¹		(0.70)+(1.20)	18.10	10
	(7)+(12)		(1.40)+(2.40)	16.20	10
	(14)+(24)		(2.80)+(4.80)	12.40	10
Totals					180

¹ Minimum and maximum dose rates published by agrochemical manufacturers (SENASA certified).
² Average spray volume for agrochemicals recommended by Caseley et al. and FAO.
³ Broth established (agrochemicals and water) for the calibration and validation processes.

TABLE IV
EQUATIONS OF REGRESSION MODELS

$Y_{2,4-D} = [0.57+(X1*0.05)+(X2*0.04)+(X3*0.01)+(X4*0.01)+(X5*0.01)+(X6*0.01)]^1$
$Y_{Glyphosate} = [0.25+(X1*0.01)+(X2*0.09)+(X3*0.09)+(X4*0.01)+(X5*0.02)+(X7*0.79)]^1$
$Y_{Cocktail} = [0.79+(X1*0.01)+(X2*0.67)+(X3*0.06)+(X4*0.01)+(X5*0.02)+(X6*0.01)+\dots+(X7*0.03)+(X8*0.01)]^1$

¹ X1: PM 1 (µg/m³), X2: PM 2.5 (µg/m³), X3: PM 4 (µg/m³), X4: PM 10 (µg/m³), X5: VOC Index, X6: H2 (ppm), X7: Ethanol (ppm), X8: Ammonia (ppm).

predictive capability. The standard errors obtained were low, with values of 0.27 for 2,4-D, 0.30 for glyphosate, and 0.34 for the cocktail. These values indicate the precision of the model, revealing the degree of data dispersion around the regression line and suggesting that the model’s predictions tend to be very close to the actual values. As a complement to these parameters, the three regression equations were also defined for each of the agrochemicals individually and cocktail format (see Table IV). In summary, the results demonstrate a high predictive capacity and accuracy of the MLR model applied to predict the presence and dosage rate of 2,4-D, glyphosate, and the cocktail. These findings support the choice and effectiveness of the model in its ability to make precise predictions regarding the presence of agrochemicals in the air based on their dosage rate.

- 5) *Integration of Regression Equations:* In light of the encouraging outlook provided by the results obtained, the next step involved integrating into DriftGLY’s firmware the three regression equations (see Table IV) and the specific parameters presented in Table V, which define the safety thresholds for each traffic light color. This integration marked a crucial progression in the validation process. Up to this point, DriftGLY has acquired the ability to autonomously utilize the MLR models

TABLE V
PARAMETERS OF THE MODELS DEVELOPED CALIBRATION PROCESS

Agrochemical name	Agrochemical dose rate (l/ha)	Traffic Light values ²	Traffic Light Results
2,4-D	0 (white)	from 0 (or less) to 1.12	Okay
	0.50 ¹	from 1.13 to 3.53	Warning
	3.50 ¹		
	7	from 3.54 to 5.69 (or more)	Hazard
14			
Glyphosate	0 (white)	from 0 (or less) to 1.52	Okay
	2 ¹	from 1.53 to 3.04	Warning
	6 ¹		
	12	from 3.05 to 5.34 (or more)	Hazard
24			
2,4-D + Glyphosate (Cocktail)	0 (white)	from 0 (or less) to 21.01	Okay
	(0.50)+(2) ¹	from 21.02 to 238.52	Warning
	(3.50)+(6) ¹		
	(7)+(12)	from 238.53 to 471.49 (or more)	Hazard
(14)+(24)			

¹ Minimum and maximum dose rates published by agrochemical manufacturers (SENASA certified).
² Results of the model calibration and prediction studies.

and traffic light parameters for making predictions about the presence and dosage rate of sprayed agrochemicals, assigning a traffic light color based on the outcomes.

B. Validation Process

The DriftGLY validation process was conducted at the same site as the calibration process. The weather conditions during validation were appropriate and in line with those recommended by the good practices for agrochemical application (relative humidity: 73% RH, temperature: 19 °C, wind speed: 8 km/h) [12]. Each test was transmitted by DriftGLY to the IoT platform via WiFi connectivity.

The validation process was conducted using a total of 27 tests, segmented into three groups: nine tests for 2,4-D, nine tests for glyphosate, and nine tests for the cocktail of these (see Table VI). In each of the three defined groups, three trials were conducted free of this herbicide (“Okay”), three with levels corresponding to the yellow color of the traffic light (“Warning”), and three trials with levels corresponding to the red color of the traffic light (“Hazard”).

As a result of the validation tests, DriftGLY successfully identified all 27 tests, correctly assigning the traffic light color to each sample related to 2,4-D, glyphosate, and the cocktail, following the predefined intervals in the calibration processes. In Figs. 6–8, the results of the regression functions in relation to the liters per hectare of agrochemical dose rate and how these values are mapped to the color code of the traffic lights are shown. The colored circles (2,4-D) and triangles (glyphosate) represent the values used in the calibration process, while the black ones indicate those used during the validation process. Regarding Fig. 8, it is important to note that the connected circles (2,4-D) and triangles (glyphosate) with lines correspond to the same sample. It is important to note that during the validation process of the proposed system, the correct functioning of the architecture in general was also verified. DriftGLY’s hardware autonomously measured the 27 tests successfully and transmitted them through WiFi connectivity

TABLE VI
RESULTS FROM THE TESTS

Test ID	Agrochemical name	Agrochemical dose rate (l/ha)	Spray Volume (l/ha)	Spray Quantity (broth)		DriftGLY	
				Agrochemical product (l)	Water (l)	Determination	Traffic Light (result)
1	2,4-D	0 (white)	0	0	20	Non-detectable Agrochemicals	Okay
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10	2,4-D	100	100	2	18	2,4-D	Warning
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19	2,4-D + Glyphosate (Cocktail)	100	100	2	18	Glyphosate	Hazard
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							

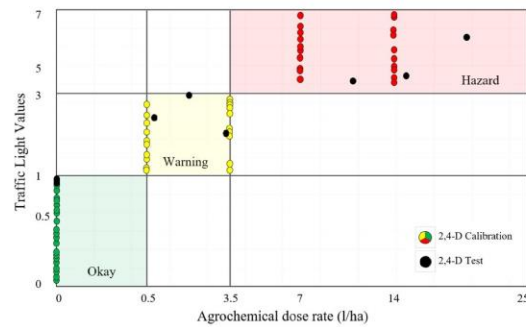


Fig. 6. Validation of the MLR model for the 2,4-D.

to the IoT platform. This platform, in turn, displayed all the traffic light diagnostics and additional data on its web dashboard (connectivity information, sensor telemetry, actuator status, and other relevant variables). Moreover, the 17 tests containing agrochemicals were shared on social network X, demonstrating the proper functioning of the complementary platforms and integrations.

Based on the results obtained, DriftGLY emerges as an innovative early warning system that employs a digital traffic light to depict contamination levels based on the rate of agrochemical application in agricultural settings. In this context, DriftGLY’s role complements the services provided by specialized laboratories that analyze samples with agrochemical presence, employing complex and costly equipment to assess contamination severity. As mentioned earlier (Sections I–IV), DriftGLY is also designed to collect samples that are subsequently sent to these laboratories. In this study, a selection of

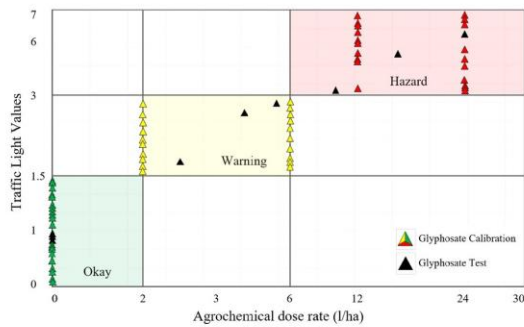


Fig. 7. Validation of the MLR model for the glyphosate.

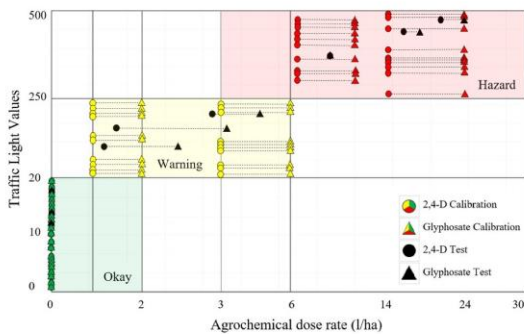


Fig. 8. Validation of the MLR model for the cocktail (2,4-D and glyphosate).

samples from the validation process was sent to a laboratory to confirm the proper functioning of DriftGLY.

Additionally, as an example of real-world procedures, we present the supplementary parameters issued by these specialized laboratories when agrochemical presence is detected. To validate the determinations made by DriftGLY with a laboratory, seven out of the 27 tests used in the validation process were selected and collected for the laboratory to ascertain the presence or absence of agrochemicals in these samples. The laboratory chosen for this work holds official certifications and authorizations to conduct agrochemical analyses [73]. The seven samples collected (each of 8 mL) were obtained from the DriftGLY receptacle and filter (capacity: 50 mL). This receptacle was designed to capture and store samples for subsequent laboratory analysis. To analyze each sample, the laboratory used the LC-MS/MS method for the determination of 2,4-D and the LC-ESI-MS/MS method for the determination of glyphosate. After conducting the analyses, the laboratory provided reports [74] detailing the determinations of each sample, indicating the type of agrochemical detected and, as supplementary information, the concentration (mg/L) of these products (see Table VII). The concentration values reported by the laboratory are not associated with the dose rate of agrochemicals per hectare applied in the fields, but rather correspond to the classification of acute inhalation toxicity as outlined in SENASA resolutions [75], [21]. In this context, the applicable standard is the inhalation median lethal concentration (LC50) and is expressed as the weight of substance per unit volume of normal air (mg/L).

TABLE VII
LABORATORY RESULTS

Test ID	Agrochemical name	Agrochemical dose rate (l/ha)	DriftGLY ¹		Laboratory analysis ²	
			Determination	Traffic Light results	Determination	Product concentration (mg/l)
1	White	0	Non-detectable Agrochemicals	Okay	Non-detectable Agrochemicals	0
6	2,4-D	3	2,4-D	Warning	2,4-D	2216
9		20	2,4-D	Hazard	2,4-D	9921
14	Glyphosate	4.50	Glyphosate	Warning	Glyphosate	16268
16		10	Glyphosate	Hazard	Glyphosate	45412
23	2,4-D + Glyphosate (Cocktail)	(1.50)+(4.50)	2,4-D + Glyphosate	Warning	2,4-D + Glyphosate	(264)+(12747)
26		(15)+(17)	2,4-D + Glyphosate	Hazard	2,4-D + Glyphosate	(980)+(11357)

¹ Diagnostics established by the DriftGLY Traffic Light in the validation process (test samples).

² Laboratory results to diagnose type and proportions of agrochemicals in the test samples.

The LC50 standard is the concentration of toxins in the air that, breathed for one hour, has the capacity to kill 50% of a representative population of the experimental species selected and used under previously established conditions within a period of 14 days. SENASA established four classes of inhalation toxicity for LC50, class IV being the highest with concentration levels higher than >20 mg/L [76]. As shown in Table VII, the samples with agrochemicals presented much higher concentrations than class IV and are presented for the “Hazard” and “Warning” states of the DriftGLY traffic light. This work does not delve into this standard (LC50) and its consequences. However, it is worth mentioning that, in the presence of one of these two states of the traffic light, the proposed system would serve to alert the population and in the case of the authorities, would allow them to be agile and efficient in taking protection measures, and in carrying out laboratory analysis of the samples obtained in DriftGLY to execute corrective actions.

In conclusion, the seven tests previously identified by DriftGLY were compared with the laboratory assessments. It was confirmed that all determinations made by DriftGLY were accurate and correct (see Table VII). Furthermore, the laboratory verified that samples containing agrochemicals exhibited significantly high concentrations of these contaminants. Beyond confirming the presence of these contaminants at the measurement site, current systems do not provide information about their origins. In this context, DriftGLY can offer valuable insights. In addition to determining whether someone has exceeded the agrochemical application dose rate, it can also identify sources of contamination through wind direction and provide data on possible violations of the appropriate meteorological conditions for agrochemical application by measuring temperature and humidity. This allows authorities to take effective corrective and preventive measures against potential offenders. The results presented in this study support the viability of DriftGLY as an early warning system for the continuous and automated monitoring of the presence of agrochemicals in the air. This system can function in conjunction with existing systems, making it easier for authorities to control contamination originating from the

agro-industrial context and its impact on urban, peri-urban, and rural areas.

VII. CONCLUSION

In conclusion, DriftGLY has been designed, developed, calibrated, and its proper functioning has been validated. DriftGLY stands out as a low-cost early warning system that employs a digital traffic light to continuously and automatically monitor the presence of agrochemicals in the air, both individually and in cocktail format. The primary contribution of DriftGLY lies in a space where early warning devices to detect and communicate the presence of agrochemicals in the air are currently lacking. The key innovation of DriftGLY is the close relationship between the configuration of its digital traffic light and the precise calculation of the amount of agrochemicals deposited in the spray tanks. This configuration is specifically based on the parameter of the dose rate expressed in liters per hectare of these contaminants. This rate is directly related to the pollution that impacts the environment and citizens in the areas where agribusiness operates.

DriftGLY can detect agrochemicals in their particulate and gaseous forms. Also, it incorporates an original phase conversion system that allows for the collection of liquid samples. This includes drift from agrochemical droplets or rainwater with diluted agrochemicals, which are subsequently measured in their gaseous state. Leveraging these capabilities, DriftGLY is also designed to collect samples that are sent to specialized laboratories for the analysis of more complex parameters. DriftGLY is an IoT device with edge computing capabilities, multiple connectivity options, and a digital ecosystem comprising various platforms capable of digitally communicating events in every monitoring context, whether in urban or peri-urban areas of towns or cities. Unlike previous systems, DriftGLY not only provides authorities with a dedicated web dashboard for accessing the readings from its digital traffic light and associated metadata but also publishes these values on the social network X, thereby establishing a direct and transparent channel of communication with citizens.

To demonstrate the proper functioning of DriftGLY in this study, the two most widely used agrochemicals in agribusiness, 2,4-D and glyphosate, were utilized, and the cocktail effect between these herbicides was evaluated. Through the calibration processes conducted with 180 segmented samples for 2,4-D and glyphosate, as well as for the cocktail, three MLR models were constructed to create the digital traffic light, based on different dose rates of these agrochemicals expressed in liters per hectare. The results of the calibration process demonstrated a high predictive capacity and accuracy of the MLR models applied to detect the presence and dose rate of agrochemicals, both individually and in cocktail format. In the validation process, DriftGLY correctly detected and assigned a traffic light state to 100% of the 27 tests, confirming its proper functioning. Following the empirical validation process with DriftGLY, a selection of seven test samples from the validation process were sent to a laboratory to confirm that all the results obtained by DriftGLY were correct.

Regarding future projects, four initiatives are envisaged. The first initiative involves overcoming a limitation that requires

integrating other types of agrochemicals into the DriftGLY ecosystem. It is crucial to note that this study only homologated two herbicides (for the purpose of demonstrating its feasibility). To incorporate any other type of agrochemical in the future, such as insecticides, fungicides, or others, a new calibration and validation process will be required. Additionally, it is worth mentioning that it may be necessary to add a new sensor to DriftGLY's hardware if the existing sensors cannot detect the new agrochemical product that needs to be homologated. The latter would not be an issue since DriftGLY's hardware (SM) has the capability to integrate new sensors. The second initiative involves developing a predictive machine learning model within the IoT platform to create risk maps. These maps will not only identify areas with agrochemical presence but will also make predictions about when and where agrochemical contamination might occur. These predictions are based on the status of the digital traffic light on the DriftGLY devices installed at various monitoring sites, taking into account both the history of the traffic lights and environmental conditions such as temperature, humidity, and wind direction. To achieve this, decision trees could be suitable for classification and regression problems. Once the model proves its effectiveness, it will be integrated into the IoT platform, enabling the provision of predictions regarding the state of the traffic light at specific locations through an accessible risk map on the platform's frontend. The third initiative entails conducting a proof of concept (PoC) with ten DriftGLY devices in a town in the Argentine provinces of Santa Fe or Entre Ríos. These provinces have higher agrochemical contamination and significant cancer incidence rates resulting from exposure to these chemicals [19], [77]. The main goal of the PoC is to strategically deploy the system in such a town, with the aim of conducting a six-month monitoring campaign in a real-world application context to verify whether the proposed system, in addition to performing its primary function, can also successfully utilize different network standards based on coverage. Regarding the fourth initiative, given that one of the limitations of the current system is its requirement to be connected to a conventional power grid, it would be highly advisable to modify the design of the power system to enable connection to a renewable energy source, such as solar panels or a small wind turbine. Additionally, it should be equipped with a backup battery system to prevent power outages during periods when these renewable sources do not supply electricity.

REFERENCES

- [1] Rachel Carson Website. (1962). *Silent Spring Book (Preview)*. [Online]. Available: <https://www.rachelcarson.org/silent-spring>
- [2] United Nations Treaty Collections. (2023). *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (chapter XXVII)*. [Online]. Available: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtsg_no=X XVII-15&chapter=27&clang=_en
- [3] Rotterdam Convention. (2022). *Rotterdam Convention Information*. [Online]. Available: <http://www.pic.int/>
- [4] World Health Organization (WHO). (2023). *Food Safety: POPs*. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/food-safety-persistent-organic-pollutants-\(POPS\)](https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/food-safety-persistent-organic-pollutants-(POPS))
- [5] European Commission. (2023). *POPs*. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/chemicals/international_conventions/index_en.htm

[6] Basel Convention. (2022). *Basel Convention Information*. [Online]. Available: <http://www.basel.int/>

[7] International Pollutants Elimination Network (IPEN). (2022). *IPEN: For a Toxics-Free Future*. [Online]. Available: <https://ipen.org/projects/international-POPS-elimination-project-ipep>

[8] United Nations Environment Programme. (2023). *Persistent Organic Pollutants (POPs)*. [Online]. Available: <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/persistent-organic-pollutants-POPs>

[9] Portal of the Publication's Office of the European Commission. (2022). *POPs and Amending (79/117/EEC)*. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02004R0850-20160322&qid=146969107172>

[10] Pesticide Action Network. (2022). *Pesticide Atlas*. [Online]. Available: https://www.pan-europe.info/sites/pan-europe.info/files/public/resources/reports/PesticideAtlas2022_Web_20221010.pdf

[11] United Press International. (2017). *U.N. Report Estimates Pesticides Kill 200,000 People Per Year by Eric DuVall*. [Online]. Available: https://www.upi.com/Top_News/World-News/2017/03/09/UN-report-estimates-pesticides-kill-200000-people-per-year/1161489037649/

[12] Enough is Enough. There is an Alternative: Agroecology. We do not want to be Fumigated Towns. (2021). *Criticism of the Reports of INTA and the Ministry of Agriculture on Agrochemical Drifts by Marcos Tomasoni*. [Online]. Available: <https://bastaesbasta.blogspot.com/2020/03/critica-los-informes-del-inta-y-el.html>

[13] Twitter (X Corp.). (2023). *Twitter Social Network Company (Home Page)*. [Online]. Available: <https://twitter.com/home>

[14] ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). (2023). *Published Standards*. [Online]. Available: <https://asabe.org/Publications-Standards/Standards-Development/National-Standards/Published-Standards>

[15] A. Etiennot and A. Piazza. "Good practices of application on extensive flat crops. Distances to urban areas. Criteria and solutions," *Argentine Toxicolog. Act.*, vol. 18, no. 2, pp. 40–53, 2010.

[16] A. Chaim. "Spray deposition efficiency on vine, comparing nozzles and sprayers," *Pesticides: J. Ecotoxicology Environ.*, vol. 1, pp. 39–46, Jan. 2004.

[17] Ecuadorian Scientific Commission. (2007). *The Aerial Spraying System of Plan Colombia and Its Impacts on the Ecosystem and Health on the Ecuadorian Border*. [Online]. Available: https://www.accionecologica.org/wp-content/uploads/comision_cientifica_ecuatoriana.pdf

[18] DocPlayer. (2012). *Risk Maps for Pesticide Drift in the Ituzaingó*. [Online]. Available: <https://docplayer.es/33570096-Mapas-de-riesgo-por-derivada-plaguicidas-en-barrio-ituzaingo-anexo-cordoba-argentina.html>

[19] E. Lorenzatti et al., "Pesticides in air. Preliminary study in the city of Santa Fe," *Nat. Univ. Litoral*, vol. 12, no. 1, pp. 129–135, 2008.

[20] Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). (2023). *OECD Guidelines, Section 4 (Health Effects)*. [Online]. Available: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/oecd-guidelines-for-the-testing-of-chemicals-section-4-health-effects_20745788

[21] World Health Organization (WHO). (2019). *Recommended Classification of Pesticides by Hazard*. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/332193/9789240005662-eng.pdf?sequence=1>

[22] International Labour Office. (2022). *Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals (GHS)*. [Online]. Available: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/-ed_dialogue/-lab_admin/documents/publication/wcms.871192.pdf

[23] National Institute of Agricultural Technology (INTA). (2013). *Good Practice Guidelines for the Management of Phytosanitary*. [Online]. Available: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/script-mp-inta-bpa_aplicacin_de_fitosanitarios.pdf

[24] SENASA National Registry of Plant Therapeutics. (2023). *Consult Formulated Agrochemical Products*. [Online]. Available: <https://aps2.senasa.gov.ar/vademecum/app/publico/formulados>

[25] C. Palma-Bautista, H. E. Cruz-Hipólito, R. Alcántara-de la Cruz, J. G. Vázquez-García, M. Yannicari, and R. De Prado, "Comparison of premix glyphosate and 2,4-D formulation and direct tank mixture for control of *Conyza canadensis* and *Epilobium ciliatum*," *Environ. Pollut.*, vol. 281, Jul. 2021, Art. no. 117013.

[26] V. Lozano et al., "Freshwater dissolved oxygen dynamics: Changes due to glyphosate, 2,4-D and their mixture, both under clear and turbid-organic conditions," *Cold Spring Harbor Lab.*, vol. 239, Feb. 2021, Art. no. 105957.

[27] V. L. Lozano, "Hidden impacts of environmental stressors on freshwater communities could be revealed at lower concentrations by correlation of abundances network analyses: An example with herbicides glyphosate, 2,4-D, and their mixtures," *Austral Ecol.*, vol. 47, no. 5, pp. 1144–1153, Aug. 2022.

[28] L. Galon, L. Bragagnolo, E. P. Korf, J. B. dos Santos, G. M. Barroso, and V. H. V. Ribeiro. "Mobility and environmental monitoring of pesticides in the atmosphere—A review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 25, pp. 32236–32255, Jul. 2021.

[29] Digitel Elektronik AG. (2023). *HVS DHA-80*. [Online]. Available: <https://digitel-ag.com/product/digitel-aerosol-sampler-dha-80/>

[30] Envea Global. (2023). *Particulate Monitor (Product Description)*. [Online]. Available: <https://www.envea.global/s/ambient/particulate-monitors/mp101m-opm/>

[31] ThermoFisher. (2023). *TEOM Monitor*. [Online]. Available: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/ar/es/TEOM1405D>

[32] P. Das, S. Ghosh, S. Chatterjee, and S. De, "A low cost outdoor air pollution monitoring device with power controlled built-in PM sensor," *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 13, pp. 13682–13695, Jul. 2022.

[33] M. Fekih et al., "Participatory air quality and urban heat islands monitoring system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–14, 2021.

[34] S. Ali, T. Glass, B. Parr, J. Potgieter, and F. Alam, "Low cost sensor with IoT LoRaWAN connectivity and machine learning-based calibration for air pollution monitoring," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–11, 2021.

[35] A. V. Radogna et al., "A monitoring framework with integrated sensing technologies for enhanced food safety and traceability," *Sensors*, vol. 22, no. 17, p. 6509, Aug. 2022.

[36] C. Wu, C. Wang, Q. Fan, Q. Wu, S. Xu, and N. N. Xiong, "Design and analysis of an data-driven intelligent model for persistent organic pollutants in the Internet of Things environments," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 13451–13463, 2021.

[37] S. Ghosh, P. Das, S. De, S. Chatterjee, and M. Portmann, "Local reference-free in-field calibration of low-cost air pollution monitoring sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–13, 2022.

[38] W. Hernandez, A. Mendez, R. Zalakeviciute, and A. M. Diaz-Marquez, "Analysis of the information obtained from PM_{2.5} concentration measurements in an urban park," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 9, pp. 6296–6311, Sep. 2020.

[39] G. D'Elia et al., "Influence of concept drift on metrological performance of low-cost NO₂ sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–11, 2022.

[40] M. Njaime, F. A. Olivier, H. Snoussi, J. Akl, C. Chahla, and H. Omrani, "Data cleaning to fine-tune a transfer learning approach for air quality prediction," in *Proc. IEEE Int. Smart Cities Conf. (ISC2)*, Sep. 2022, pp. 1–5.

[41] S. Dhingra, R. B. Madda, A. H. Gandomi, R. Patan, and M. Daneshmand, "Internet of Things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair)," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5577–5584, Jun. 2019.

[42] J. Aira, T. Olivares, F. M. Delicado, and D. Vezzani, "MosquitoIoT: A system based on IoT and machine learning for the monitoring of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–13, 2023.

[43] J. Aira, T. Olivares, and F. M. Delicado, "SpectroGLY: A low-cost IoT-based ecosystem for the detection of glyphosate residues in waters," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–10, 2022.

[44] ThingsBoard. (2022). *What is ThingsBoard*. [Online]. Available: <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>

[45] The Things Network. (2022). *The Things Fundamentals on LoRaWAN*. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>

[46] P. Ferrari et al., "On the use of LoRaWAN and cloud platforms for diversification of mobility-as-a-service infrastructure in smart city scenarios," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–9, 2022.

[47] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, and E. Sisinni, "Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 12, pp. 3340–3349, Dec. 2017.

[48] Dragino. (2023). *Gateway LG02 (Datasheet)*. [Online]. Available: https://www.dragino.com/downloads/downloads/datasheet/EN/Datasheet_LG02_OLG02.pdf

[49] IFTTT. (2023). *IFTTT Services*. [Online]. Available: <https://ifttt.com/explore>

[50] APK Mirror. (2023). *Serial Bluetooth Terminal 1.40*. [Online]. Available: <https://www.apkmirror.com/apk/kai-morich/serial-bluetooth-terminal/serial-bluetooth-terminal-1-40-release/serial-bluetooth-terminal-1-40-android-apk-download/>

[51] Heltec Automation. (2018). *WiFi LoRa 32 (V2)*. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>

[52] SIMCom. (2023). *SIMCom SIM808 (Documentation)*. [Online]. Available: <https://www.simcom.com/product/SIM808.html>

[53] Arduino. (2023). *Arduino Mega Board*. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

[54] Sensirion. (2023). *SEN55 (Product Description)*. [Online]. Available: <https://sensirion.com/products/catalog/SEN55/>

[55] Zhengzhou Winsen Electronics. (2023). *MQ-135 Sensor Module*. [Online]. Available: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf)

[56] Zhengzhou Winsen Electronics Technology. (2023). *MQ-8 Sensor Module (Product Description)*. [Online]. Available: <https://www.winsen-sensor.com/sensors/h2-sensor/mq8.html>

[57] Zhengzhou Winsen Electronics. (2023). *CO₂ Sensor (MH-Z19C)*. [Online]. Available: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19c-pins-type-co2-manual-ver1_0.pdf

[58] Eshop. (2022). *AHT10 (Technical Manual)*. [Online]. Available: https://server4.eca.ir/eshop/AHT10/Aosong_AHT10_en_draft_0c.pdf

[59] Circuit Digest. (2022). *Rain Sensor Arduino (Tutorial)*. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-rain-sensor-with-arduino>

[60] Shandong Renke. (2022). *Wind Direction Sensor*. [Online]. Available: <https://www.renkeer.com/product/polycarbon-wind-direction-sensor/>

[61] Elindar. (2023). *LTE205S-RGYB (Product Description)*. [Online]. Available: <http://www.elindar.com.ar/ver-comando.html>

[62] SPS Industrial. (2023). *Band Heater (Product Description)*. [Online]. Available: <https://www.spsindustrial.com/band-heater-240v-7-in-dia-900-deg-f-2vyp3>

[63] Netmak. (2023). *Cooler Red Led Light (Product Description)*. [Online]. Available: <https://netmak.ar/#/nm-8025-1/>

[64] Wecl Electronic. (2023). *SG92R (Product Description)*. [Online]. Available: http://www.wecl.com.hk/distribution/PDF/Robotics_IoT/58-01-9024.pdf

[65] Mouser. (2023). *Espressif Systems ESP-PROG (Product Description)*. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP-PROG?qs=0lSvoLzn4L9lCAjJ8r9cdg%3D%3D>

[66] Q. M. Qadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, and Z. Zhang, "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77454–77473, 2018.

[67] Cayenne. (2021). *Cayenne LPP Docs*. [Online]. Available: <https://developers.myldevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-how-lorawan-works>

[68] Farmchem. (2023). *2,4-D (Product Description)*. [Online]. Available: <http://farmchemsa.com.ar/productos/allgram-24-d-amina-60>

[69] Gleba. (2022). *Glifoglex (Product Description)*. [Online]. Available: <https://gleba.com.ar/producto/glifoglex/>

[70] Dogo Tools. (2023). *Dogo Sprayer (Product Description)*. [Online]. Available: <https://www.dogoherramientas.com.ar/tienda/bosque-y-jardin/pulverizadores/pulverizador-20-litros-profesional-pjardin-y-agro>

[71] Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). *Chapter 10. Herbicides by J. C. Caseley*. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/t1147st1147s0e.htm>

[72] National Meteorological Service (SMN). (2023). *SMN Main Portal*. [Online]. Available: <https://www.smn.gov.ar/>

[73] Melacrom Laboratory. (2023). *Melacrom Certifications*. [Online]. Available: <https://www.melacrom.com.ar/Empresa/Certificaciones.aspx>

[74] DriftGLY Repository. (2023). *Melacrom Laboratory: DriftGLY Reports List*. [Online]. Available: <https://t.ly/FbRT>

[75] National Service of Health and Food Quality of Argentina (SENASA). (1999). *SENASA Resolution 350-1999*. [Online]. Available: <http://www.senasa.gov.ar/normativas/resolucion-350-1999-senasa-servicio-nacional-de-sanidad-y-calidad-agroalimentaria>

[76] Chamber of Agricultural Health and Fertilizers of Argentina. (2012). *Toxicological Classification and Labeling of Phytosanitary Products. Local and International Regulatory Criteria*. [Online]. Available: <https://www.casafe.org/wp-content/uploads/2019/05/Clasificacion-toxicologica-etiquetado-fitosanitarios.pdf>

[77] D. Verzeñassi et al., "Cancer incidence and death rates in Argentine rural towns surrounded by pesticide-treated agricultural land," *Clin. Epidemiol. Global Health*, vol. 20, Mar. 2023, Art. no. 101239.

[78] Addinsoft XLSTAT. (2023). *A Complete Statistical Add-in For Microsoft Excel*. [Online]. Available: <https://www.xlstat.com>



Javier Aira received the bachelor's degree in management of automation and robotics systems from the National University of Lomas de Zamora, Lomas de Zamora, Argentina, in 2016, and the master's degree in strategic management in information technology from the European University of the Atlantic, Santander, Spain, in 2020. He is currently pursuing the Ph.D. degree in advanced computer technologies in the IoT discipline in smart cities with the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain.

He has more than 19 years of experience in the area of Research and Development applied to industry, specifically in the area of Research and Development applied to fully digital solutions.



Teresa Olivares received the Ph.D. degree in computer science from the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, in 2003.

She is an Associate Professor with the Department of Computing Systems, University of Castilla-La Mancha. She is a member of the research group High-Performance Networks and Architectures, Albacete Research Institute of Informatics, Albacete. She has participated in more than 40 research projects and has coauthored more than 50 research papers in journals, conferences, and book chapters. Her main scientific research interests include the Internet of Things standards, communications and protocols, heterogeneous low-power wireless sensor networks and standards, smart environments, industry 4.0, and reverse logistics.



Francisco M. Delicado received the Ph.D. degree in computer engineering from the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, in 2005.

He has been an Associate Professor at the Department of Computer Engineering, University of Castilla-La Mancha, since 2007. He is a member of the research group High-Performance Networks and Architectures, Albacete Research Institute of Informatics, Albacete. His research interests include software-defined networking (SDN), wireless sensor networks (WSN), heterogeneous low-power WSN, and cloud networking.

2.3 MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)

- **Title:** MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)
- **Abstract:** Millions of people around the world are infected with mosquito-borne diseases each year. One of the most dangerous species is *Aedes aegypti*, the main vector of viruses such as dengue, yellow fever, chikungunya, and Zika, among others. Mosquito prevention and eradication campaigns are essential to avoid major public health consequences. In this respect, entomological surveillance is an important tool. At present, this traditional monitoring tool is executed manually and requires digital transformation to help authorities make better decisions, improve their planning efforts, speed up execution, and better manage available resources. Therefore, new technological tools based on proven techniques need to be designed and developed. However, such tools should also be cost-effective, autonomous, reliable, and easy to implement, and should be enabled by connectivity and multi-platform software applications. This article presents the design, development, and testing of an innovative system named “MosquIoT.” It is based on traditional ovitraps with embedded Internet of Things (IoT) and tiny machine learning (TinyML) technologies, which enable the detection and quantification of *Ae. aegypti* eggs. This innovative and promising solution may help dynamically understand the behavior of *Ae. aegypti* populations in cities, shifting from the current reactive entomological monitoring model to a proactive and predictive digital one.
- **Authors:** Javier Aira; Teresa Olivares; Francisco M. Delicado; Darío Vezzani
- **Status:** Published
- **Published in:** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Volume: 72)
- **Citation:** J. Aira, T. Olivares, F. M. Delicado and D. Vezzani, "MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023.
- **Article Sequence Number:** 2509613
- **Date of Publication:** 06 April 2023
- **ISSN Information:**
 - **Print ISSN:** 0018-9456
 - **Electronic ISSN:** 1557-9662
- **DOI:** 10.1109/TIM.2023.3265119 (click to view the contribution online)
- **Publisher:** IEEE
- **Funding Agency:** This work was supported under PID2021-123627OB-C52 project, which funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by European Regional Development Fund (ERDF), “A way to make Europe,” EU (European Union).

MosquIoT: A System Based on IoT and Machine Learning for the Monitoring of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae)

Javier Aira[✉], Teresa Olivares[✉], Francisco M. Delicado[✉], and Darío Vezzani[✉]

Abstract—Millions of people around the world are infected with mosquito-borne diseases each year. One of the most dangerous species is *Aedes aegypti*, the main vector of viruses such as dengue, yellow fever, chikungunya, and Zika, among others. Mosquito prevention and eradication campaigns are essential to avoid major public health consequences. In this respect, entomological surveillance is an important tool. At present, this traditional monitoring tool is executed manually and requires digital transformation to help authorities make better decisions, improve their planning efforts, speed up execution, and better manage available resources. Therefore, new technological tools based on proven techniques need to be designed and developed. However, such tools should also be cost-effective, autonomous, reliable, and easy to implement, and should be enabled by connectivity and multi-platform software applications. This article presents the design, development, and testing of an innovative system named “MosquIoT.” It is based on traditional ovitraps with embedded Internet of Things (IoT) and tiny machine learning (TinyML) technologies, which enable the detection and quantification of *Ae. aegypti* eggs. This innovative and promising solution may help dynamically understand the behavior of *Ae. aegypti* populations in cities, shifting from the current reactive entomological monitoring model to a proactive and predictive digital one.

Index Terms—*Aedes aegypti*, entomological surveillance, Internet of Things (IoT), low-power wide-area network (LPWAN), machine learning, ovitraps, smart cities, tiny machine learning (TinyML).

I. INTRODUCTION

ONE of the most dangerous animals on earth is a tiny insect, the mosquito. More than 500 million people are

Manuscript received 23 November 2022; revised 9 March 2023; accepted 20 March 2023. Date of publication 6 April 2023; date of current version 19 April 2023. This work was supported under PID2021-123627OB-C52 project, which funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by European Regional Development Fund (ERDF), “A way to make Europe.” EU (European Union). The Associate Editor coordinating the review process was Dr. Yu Yang. (Corresponding author: Javier Aira.)

Javier Aira is with the International Doctoral School, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: jorgejavier.aira@alu.uclm.es).

Teresa Olivares is with the Department of Computing Systems, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: teresa.olivares@uclm.es).

Francisco M. Delicado is with the Department of Computer Engineering, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain (e-mail: francisco.delicado@uclm.es).

Darío Vezzani is with the National Scientific and Technical Research Council (CONICET), Multidisciplinary Institute on Ecosystems and Sustainable Development (UNCPBA-CICPBA), Tandil, Buenos Aires B7000, Argentina (e-mail: dvezani@gmail.com).

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2023.3265119

1557-9662 © 2023 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

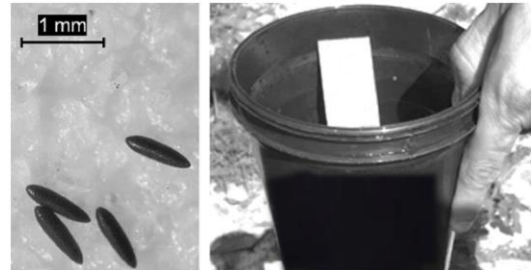


Fig. 1. Left: *Ae. aegypti* eggs. Right: Traditional ovitrap.

infected with mosquito-borne diseases every year, with more than three million of them dying from these infections [1]. In addition, currently, half of the world’s population, about 3.5 billion people, are at risk of infection from mosquito-borne diseases. Mosquitoes can be anthropophilic, carriers of viruses, protozoans, and nematodes, making them highly effective and mobile agents for transmitting dangerous diseases among human populations [1]. One of the most dangerous species of anthropophilic mosquitoes is the *Aedes aegypti*, the main vector of viruses such as dengue, yellow fever, chikungunya, and Zika [2], [3], [4]. For example, before 1970, only nine countries had experienced dengue epidemics, but the disease is now endemic in more than 100 countries in Africa, the Americas, the Eastern Mediterranean, South-East Asia, and the Western Pacific. The Americas, South-East Asia, and Western Pacific are the most seriously affected regions [2], [5]. *Ae. aegypti* may satisfy all of its biological requirements in human habitats, and may even develop in arid urban settings as a result of man-made humid conditions prevailing in cities. The essential resource for the proliferation of *Ae. aegypti* is water stored in artificial containers in urban areas, where they develop through their immature stages. Therefore, the most effective and efficient preventive measures are those aimed at eliminating water storage containers. *Ae. aegypti* has typically domestic habits and, although it has urbanized, the species has also been found in peri-urban, rural, and even wild habitats [6].

As part of current entomological surveillance campaigns, the reliable and proven ovitrap method is used [7] (Fig. 1, right) for detecting and quantifying *Ae. aegypti* eggs. This method is extremely sensitive and efficient in generating early

alerts [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Entomological surveillance campaigns are planned and executed by government agencies. To determine the existence of eggs, ovitraps are collected seven days after they are set up. Samples should be gathered carefully and taken to the labs, ensuring they arrive there in appropriate conditions. These processes rely on good practices by the personnel involved, since, in addition to careful transportation, samples should also be moved under certain temperature and humidity conditions to ensure their preservation. Given these circumstances, the potential benefit and value of an automatic system that would provide real-time information about the behavior of *Ae. aegypti* populations in cities is evident, in that it would avoid the logistics involved in transporting samples to the labs, the lab analyses (preparation and reading times), and associated costs. A mass roll-out of such a solution would allow for the automatic building of dynamic risk maps and the development of predictive models to provide the authorities with digital tools that enhance their campaigns to prevent and contain potential epidemic outbreaks of these diseases.

Regarding the field of technological mosquito monitoring and surveillance systems, there is diverse literature on embedded trap systems, some of which are at the investigation stage, while others are commercially available. An analysis of the published research studies reveals proposals based on the use of sensors to classify insects by their flight sounds [14], acoustic traps for the surveillance of *Ae. aegypti* during rear-and-release operations [15], vision-based counting and recognition systems for flying insects [16], [17], and mosquito counting systems based on optical sensing [18], [19]. At a more advanced stage, we may also find products or solutions which are more consolidated at the industrial level. For example, Vectrack is a complex device able to identify mosquito species, sex, and age using optoelectronic sensors [20]. Additionally, Bzigo is a mosquito laser detector using a new flying insect localization system that pinpoints the mosquito's location, even in the dark [21]. Finally, BG-Sentinel mimics convection currents created by the human body, employs attractive visual cues, and releases artificial skin emanations to capture selected mosquito species [22]. The above-mentioned systems are complex and expensive, limiting their scalability.

Considering the substantial impact of *Ae. aegypti* on health, the goal of this research study was to propose an improvement and upgrade to the current entomological surveillance systems, implementing a solution based on disruptive technologies such as the Internet of Things (IoT) and tiny machine learning (TinyML). This solution primarily comprises an IoT-based system called "MosquitoIoT," which was designed and developed under the functional concept of traditional ovitraps. The goal was to digitize this traditional and efficient method, whose name may be understood as a tool to "hunt" mosquitos but which, in fact, works as a sensor of the female mosquito's oviposition activity. Accordingly, the proposed system would enable the automatic detection and counting of eggs laid by *Ae. aegypti*, remotely sending such information to a cloud platform through several IoT communication links, for viewing, storage, and subsequent examination. This study also focuses on determining the effectiveness and efficiency of the MosquitoIoT

system. To do so, we present a first functional laboratory prototype, showcasing its technical and functional characteristics and the empirical evidence of its correct functioning in detecting *Ae. aegypti* eggs through actual samples used for the system training and validation.

The rest of the document is structured as follows: Section II delves into *Ae. aegypti* oviposition behavior and delimits the geographic area of application of this article. Section III describes the system's global architecture, with special emphasis on the interplay between its various building blocks. Section IV provides a detailed description of MosquitoIoT. Section V contains a technical and functional description of a Mobile App associated with MosquitoIoT for its setup on the installation site. Section VI describes the development of the IoT platform, where the information on the evidence collected using MosquitoIoT will be concentrated, stored, and displayed. Section VII describes the experimental validation processes that allowed us to demonstrate the technical and functional feasibility of MosquitoIoT. Finally, Section VIII contains the conclusions and future projects.

II. Aedes Aegypti: Oviposition Background

The breeding habitats of *Ae. aegypti* are primarily man-made. These include old tires, flower vases, bottles, drinking troughs, or containers of any kind found in various urban areas, such as wastelands, graveyards, dumpsites, and dwellings. When the conditions are suitable, *Ae. aegypti* tend not to travel far from aquatic sites, where the mosquito develops its immature stages. However, under certain conditions, dispersion up to 800 m has been observed [23], [24]. When a female *Ae. aegypti* completes its feeding, she lays individual, disperse eggs in different places, which is known as "skip oviposition." The female is attracted to dark or rigid wall-shaded recipients and prefers relatively clean waters with little organic content [25]. As for reproduction, this species lays eggs a few millimeters above fresh water, where larvae will pupate and subsequently emerge as adults [26]. In nature, many factors contribute to the choice of the egg-laying site: the amount of food available in the body of water, the number of larvae already present, the temperature, the humidity, the amount of light, and, primarily, the fresh nature of the water [6], [26], [27]. During oviposition, *Ae. aegypti* females may lay from 50 to 150 tiny eggs (size: ≈ 0.8 mm). Such eggs are laid in the recipient walls above the water level. When the recipient is again filled with water, the eggs sink and hatch. A group of eggs will hatch every time the water level rises in the recipient. In this way, hatching occurs as a staggered process to ensure survival even under unfavorable conditions (for instance, in times of drought). At the time of oviposition, eggs are white and almost transparent and become darker when in contact with air (Fig. 1, left).

In the Americas, the southern limit for dengue spread is the Province of Buenos Aires (Argentina). Each epidemic over the last decade has seen this limit shift southward. Saladillo is currently the southernmost location (in Argentina) with indigenous cases of dengue. Accordingly, this study is conducted in the city of Tandil, Province of Buenos Aires,

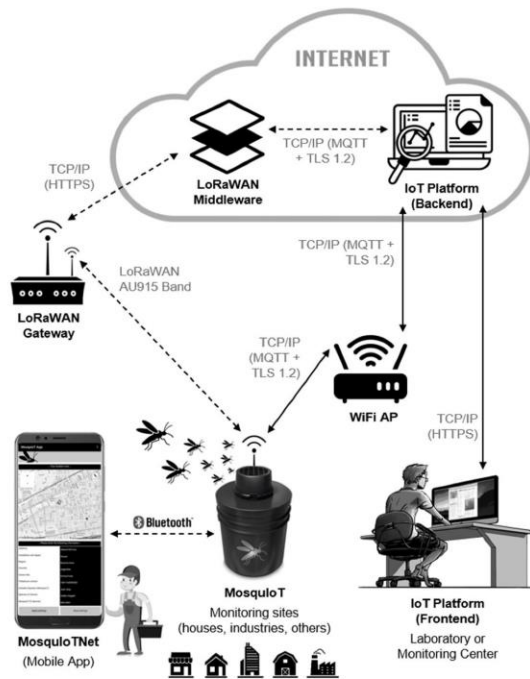


Fig. 2. Digital ecosystem associated with MosquitoIoT.

Argentina. Tandil is a medium-sized city located some 200 km south of the current limit of dengue spread, where *Ae. aegypti* was not detected until early 2019. Upon such findings, several entomological studies led by Dr. Vezzani provided empirical evidence that *Ae. aegypti* had settled in the city [12]. Against this backdrop, and for purposes of this study, a significant number of *Ae. aegypti* eggs were available from ovitraps set up in the city of Tandil. The geographic area of application of this study is Argentina. However, in the future, this scope may be expanded to other countries in America or other continents, as the sites, times, and seasons in which *Ae. aegypti* females lay eggs follow foreseeable behavioral patterns [25]. Such information is meant to execute prevention and surveillance actions through digital solutions such as that proposed in this article.

III. MOSQUITOIoT ARCHITECTURE

As mentioned, the main purpose of MosquitoIoT and its associated architecture (Fig. 2) is to digitize the currently used traditional entomological *Ae. aegypti* mosquito surveillance systems by implementing a comprehensive digital ecosystem that allows these insects’ oviposition to be monitored in cities and peri-urban areas. Accordingly, we seek to ensure that vector monitoring and surveillance performed by IoT sensors (MosquitoIoT) set up at several locations of the city submit their readings several times a day, and that those in charge of the entomological surveillance may easily have a view of the

current situation or risk map. In this respect, the architecture was conceived with the aim of making its application in the industry as affordable as possible, bridging the gap between the scientific and the industrial world, and considering all the digital services a subject-matter expert might need to make prompt and accurate decisions. As regards the architecture, an IoT platform was implemented to receive, store, and display all the data from the several surveillance sites where MosquitoIoT will operate. The IoT platform used for this research study was ThingsBoard [46], which was selected for its architecture based on micro-services and an embedded message queue telemetry transport (MQTT) broker, which supports two-way communications from MosquitoIoT, when connected to a WiFi network. In this respect, two-way MQTT communication capabilities between MosquitoIoT and the IoT platform were also ensured, supporting standard telemetry and remote procedure calls (RPC) to send commands or orders from the Web Dashboard (frontend of the IoT platform) to the MosquitoIoT devices set up at the surveillance sites. At certain surveillance settings in which WiFi connectivity is unavailable (such as peri-urban or rural areas), the things networks (TTN) middleware [28] was also integrated to support LoRaWAN communications. This network is part of the low-power wide-area network (LPWAN) group [29], which has become increasingly popular in the IoT field because of its inherent low consumption and broad coverage range [30], [31]. For this research study, we implemented a LoRaWAN in the Australian frequency band (AU915: 915–928 MHz), in compliance with the radio spectrum standards issued by the Argentine federal telecommunications authority (ENACOM). The implementation of LoRaWAN requires several components, namely, the gateway in charge of spreading the network, establishing a two-way communication with this network, and acting as a bridge to the TTN middleware. The gateway used in this study was Dragino LG02, which was integrated into TTN by means of the hypertext transfer protocol secure (HTTPS) protocol. The TTN middleware was integrated into the IoT platform through MQTT over TLS v1.2, following the same logic as in WiFi communications. We also implemented two-way communications with field devices. Finally, the architecture also showcases the existence of a tool designed and developed for the system installer on the field—a Mobile App called “MosquitoNet” intended to facilitate the installation, calibration, and setup of MosquitoIoT at each surveillance site.

IV. MOSQUITOIoT IMPLEMENTATION

Following the same methodology used in traditional ovitraps, each MosquitoIoT comprises a black recipient (Fig. 2) and has the same functional features as ovitraps, but with certain digital functionalities that will later be discussed in further detail. The MosquitoIoT recipient contains tap water with a certain amount of brewer’s yeast to attract female mosquitos to these traps to lay their eggs, a disposable tongue depressor where mosquito eggs will be laid, and the MosquitoIoT’s own electronics within a highly leak-proof case. In this respect, the primary purpose of MosquitoIoT is to automate the detection and count of *Ae. aegypti* eggs laid

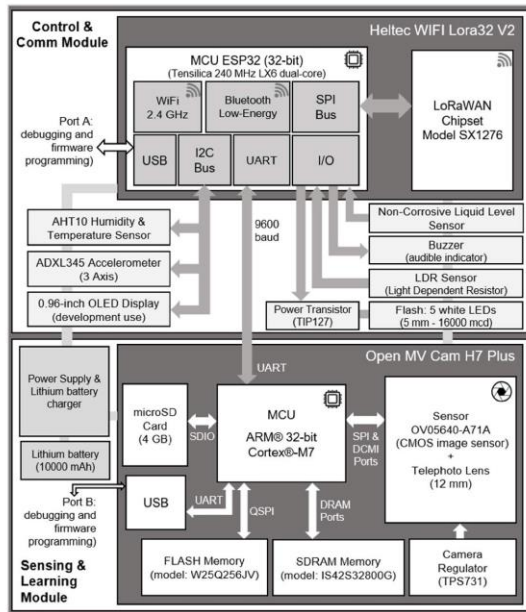


Fig. 3. Implemented hardware.

on the tongue depressor and remotely send that information to the surveillance center. In determining the number and types of eggs laid, the MosquitoT sensor uses a camera as the primary sensor to detect the presence of eggs on the tongue depressor located inside the recipient. With this set of technologies, the purpose of the research is to design and develop an automatic and stand-alone system to sense and transmit data on the detected density of mosquitos and to send such telemetric data to the IoT platform that will automatically build the risk maps. MosquitoT was designed under a low-cost perspective, as opposed to the technological solutions referred to in the introduction to this article [14], [15], [16], [18], [19], [20], [21], [22], which propose more expensive, complex and barely scalable alternatives. The construction of the first MosquitoT prototype required an investment of just United States Dollar (USD) 150. In a mass production setting, this cost might decrease by approximately 20%.

MosquitoT has two well-differentiated hardware modules (Fig. 3)—the Sensing and Learning module, in charge of detecting and counting *Ae. aegypti* eggs on the tongue depressor, and the Communications and Control module, which serves as the controller of the Sensing and Learning module and integrates the IoT communication engines [WiFi, LoRaWAN, and bluetooth low energy (BLE)]. In addition, the latter includes a set of sensors to ensure accurate system functioning in general: an environment temperature and humidity sensor, a light intensity sensor within the recipient, a three-axis accelerometer that warns about the recipient potentially tipping over, and a water level sensor to detect the presence of water inside the recipient (without water, females will not lay their eggs).

A. Sensing and Learning Module

The Sensing and Learning module comprises a development board called OpenMV CAM (CAMera) H7 PLUS [32] and its add-ons: a telephoto lens and a 4 GB micro secure digital (microSD) card to store captured snapshots, the firmware developed and supplemental libraries. The Sensing and Learning module also includes the hardware associated with the MosquitoT power supply—the ability to connect an external 12 V direct current (dc) power supply and an internal power supply by means of a 10000 mAh lithium battery and its respective charge and control electronic circuit. The battery is rechargeable (fast charge) and easily replaceable by the installer at the time of servicing (the time at which the water and tongue depressor are replaced). The OpenMV development board is a stand-alone artificial vision platform that features a camera and a powerful microcontroller (MCU). The MCU is an STM32H743II advanced RISC machine (ARM) Cortex M7 running at 480 MHz with 32 MBs synchronous dynamic random-access memory (SDRAM), 1 MB of static random access memory (SRAM), and 32 MB of external flash +2 MB of internal flash. The OpenMV board also features an OV5640-A071A CMOS image sensor [33] manufactured by OmniVision Technologies, capable of capturing 2592×1944 pixel (5 Mpixel) images. For this study, the camera was set at a high definition (HD) of 1280×720 pixels. However, for the specific purposes of this study, a 512×512 -pixel sub-resolution was established. As mentioned, a 12 mm telephoto lens (F2.0 opening and 1/3" format) was embedded to ensure the *Ae. aegypti* eggs are more accurately detected, read, and counted.

B. Learning Phase

The recent developments in MCU architecture and the design of algorithms have enabled the execution of sophisticated Machine-Learning workloads, even in small MCUs. Embedded Machine Learning—also known as TinyML [34], [35], [36], [37]—is the Machine Learning field used when applied to embedded systems such as that discussed here. TinyML can be implemented in low-power systems to perform complex automated tasks. There are significant benefits associated with the implementation of TinyML in IoT-based devices. Such benefits are clearly summarized by the bandwidth, latency, economics, reliability, and privacy (BLERP) [38], which means that the wideband of Machine Learning algorithms may retrieve meaningful information from data that would otherwise be inaccessible due to wide-band limitations. As to latency, the Machine Learning models in the device are able to respond to inputs in real time, enabling applications as stand-alone vehicles that would otherwise not be feasible if they relied on the network latency. Concerning economics, since data are processed on the device (edge), embedded Machine Learning systems avoid the costs of transmitting data through a network and processing them in the cloud. In terms of reliability, systems controlled on the device by models of this kind are more reliable than those using a cloud connection. Finally, in terms of privacy, when data are processed within an embedded system and are never transmitted to the cloud, user privacy is secured.

In order for MosquitoT to be able to detect and quantify *Ae. aegypti* eggs, a TinyML model had to be designed, developed, and implemented within the system. In this respect, for the purposes of this study, the selected open-source platform was Edge Impulse's Machine Learning [39], [40], [41], [42], [43], which supports TensorFlow Lite [44], [45] and enables the execution of customized imaging segmentation and classification models within IoT devices. In this study, we used the deep learning architecture customized by Edge Impulse known as faster objects more objects (FOMO) [47], [48], [49] applicable to TinyML solutions. This architecture enables object detection in low computational capacity devices. The idea behind FOMO is finding the right balance between accuracy, speed, and memory to reduce learning models to extremely reduced sizes. The granularity of FOMO's output can be configured based on the application and can detect many instances of objects in a single image. In this respect, apart from FOMO, there are other traditional models such as you only look once (YOLO)v5 [50] or MobileNet-single shot detector (SSD) [51], but these are not recommended to detect many tiny objects of similar size within the same image. FOMO is based on the customization of MobileNetV2 [48], a convolutional neural network (CNN) developed by Google [53] released as part of the TensorFlow Lite image classification library. The MobileNetV2 architecture [52] promotes the development of technology applied to visual object recognition, including semantic classification, detection, and segmentation. This article will not delve into the operation of MobileNetV2 but, in order to understand the architecture implemented in this work, it should be highlighted that it consists of the so-called "Depthwise Separable Convolutions" formed by a deep convolution, which filters the input and then applies a convolution with a kernel set to a size of 1×1 (convolution point). MobileNetV2 evolved to a block composed of three serial convolutions [52], [62], [63], [66], where the point convolution at the end of the block does just the opposite (reduces the number of channels), and the first layer of the block will now be an expansion layer with the name of "Bottleneck" that makes smaller the images that traverse the network. In FOMO (MobileNetV2) rectified linear unit 6 (ReLU6) [67] is used as the activation function and the output of the "Bottleneck" layer does not have the activation function applied. This layer produces low-dimensional data and the existence of a non-linearity after this layer would destroy useful information [62]. The parameters configured within FOMO (MobileNetV2) for the use case of interest are presented in Table I [48]. The mentioned features of MobileNetV2 make it performance-efficient [64], [65], which is the main reason why Edge Impulse developers adopted and customized it for FOMO. The latter, in addition to having inherited functionalities from MobileNetV2, incorporates as well its own distinctive functionality that allows object detection based on input image analysis through grid division and heat maps [48]. A technique similar to image classification is then executed to classify the grids independently. By default, the grid size is 8×8 pixels. This means that for the sub-resolution established in the snapshots captured by MosquitoT (512×512 pixels), the heat map will be 64×64 , making FOMO flexible and useful, even

TABLE I
FOMO (MOBILENETV2) SETTINGS

Parameter / Field	Content
layers	1
filters	32
kernel_size	1
strides	1
activation	ReLU6

if images are large and objects are tiny. Instead of detecting bounding boxes as YOLO v5 and MobileNet-SSD do, FOMO predicts the center of the object, since many object detection solutions are only concerned with the location of the objects in the frame, rather than their size. The centroid detection feature used by FOMO is more efficient from a computing perspective than the prediction of the bounding box and requires less data or parameter settings [48]. In summary, FOMO is an algorithm that allows objects to be detected, monitored, and counted in real time, and which may be run locally in MCUs, thanks to the possibility of using its software development kit (SDK) in MicroPython [54].

For this work, the Machine Learning algorithm construction was based on four building blocks: input, processing, learning, and deployment. The input block involved defining the type of data to be used for model training. In this case, the input data were the snapshots of the tongue depressors and their associated eggs. The processing block is a feature extraction system based on digital signal processing (DSP) operations from which the model learns [55] and standardizes the images, converting each pixel channel into a floating value between 0 and 1. The deep learning model (FOMO) was then parameterized and implemented. This model allows information on the object of interest (*Ae. aegypti* eggs) to be generated, determining quantities and positions in the plane of the objects of interest observed in the image. The learning block was set up with an 0.80 threshold, which is the minimum confidence level required to ascertain the presence of *Ae. aegypti* eggs on the tongue depressors. In addition to the aforementioned threshold, general training adjustments were also made within the Edge Impulse platform, which is presented in Table II [68]. Once the learning algorithm was built, the model was deployed within MosquitoT (this process will be described in Section IV-C).

C. Communications and Control Module

From the point of view of ensuring the automatic and autonomous operation of MosquitoT (at each monitoring place), the Communications and Control module plays a very important role, since it provides edge intelligence that will ensure that monitoring is carried out at each with efficiency. In this context and in the event of an operational problem, MosquitoT is expected to issue alerts in real time to those responsible for monitoring to carry out the corresponding corrective actions (as explained in Section I, please consider that this does not occur in current traditional systems). To meet

TABLE II
GENERAL TRAINING SETTINGS

Parameter / Field	Content
training_model	keras
alpha	0.35
training_cycles	200
learning_rate	0.001
input_num_channels	1
disable_per_channel_quantization	false.
num_classes	1
train_dataset	90
override_mode	segmentation
profile	quantized (in8)

this requirement, the sensors integrated were the following: an accelerometer [70], which informs in real time about the state of the physical position of the recipient (it was customized in such a way that it only communicates two possible states: well-positioned and overturned), a light-dependent resistor (LDR) [71] to determine if the lid of the recipient was opened (if this happens, oviposition will not take place), a non-corrosive liquid level sensor to detect the presence or absence of water inside the recipient [73] (if there is no water, oviposition will not occur) and finally, a power control module [72] was incorporated, made up of an array of high-brightness LEDs that allow the tongue depressor to be illuminated as well as the associated eggs (this ensures the homogeneity of the measurements by the main MosquitoT sensor). Additionally, in the Communications and Control module, a temperature and relative humidity sensor [74] were incorporated. It provides specific meteorological information from the place where they were detected and is complemented with the information sent about the number of eggs detected. This sensor provides valuable information for expert entomological monitoring personnel about oviposition trends and probabilities at monitoring places. The architecture of the MosquitoT Communications and Control module was designed in such a way that it allows it to fulfill the previously mentioned functions and, from a more technical aspect, its objectives were oriented toward centralized computing, control of IoT communication links, and the possibility of having robust native electronic interfaces (I/O) to integrate plug-in sensors and actuators. To meet these requirements, it was decided to integrate the Heltec WiFi Lora32 V2 board [57], which has a powerful 32-bit dual-core MCU based on ESP32 Tensilica 240 MHz LX6 [58]. In addition to this important computing resource, the Heltec board integrates the SX1276 (915 MHz) [69] chipset for LoRaWAN communications, a 2.4 GHz WiFi module, and a BLE module to interact bidirectionally with MosquitoTNet (Mobile App).

D. Firmware Developed

As mentioned in Section IV-B, the Communications and Control module includes a powerful MCU, thanks to which we were able to design, develop and express the system's

operating logic, using complex firmware with the C/C++ programming language. Arduino and Visual Studio Code integrated development environments (IDEs) were used to develop the firmware. "ESP-Prog" hardware was used to debug this firmware, which is connected to the ESP32 Joint Test Action Group (JTAG) port for real-time debugging.

In terms of IoT communications, the firmware of this module is able to connect and operate in WiFi networks (fixed or mobile). For this communication link, the MQTT protocol (over TLS 1.2) and an RPC-based protocol were implemented in the firmware, allowing information and orders from the IoT platform's Web Dashboard (frontend) to be received. MosquitoT is also able to connect to LoRaWAN networks. Furthermore, the mechanisms required to send (Uplink) and receive (Downlink) messages through these LPWAN networks were implemented in the firmware. In the latter case, to receive information or orders from the IoT platform's Web Dashboard (e.g., remote egg reading order on demand or rescheduling at the event transmission frequency). Due to the reduced payload size defined by the LoRaWAN standard for data messaging, specifically for the frequency schedule established and governed by ENACOM (AU915), the defined Payload ranges from 11 to 242 bytes. The Cayenne low power payload (LPP) [59] library was used, which provides a convenient and easy way to send data over LPWAN networks such as LoRaWAN. Cayenne LPP is a standardized and proven format that enables a substantial reduction in the number of bytes to be sent and allows MosquitoT to simultaneously send multiple data from its sensors and context parameters, based on pre-established rules and technical characteristics. In our specific case, the use of Cayenne LPP helped reduce the payload to 110 bytes, including the Cayenne global structure (data ID + data type + data size).

In order to set up MosquitoT (at the surveillance site), the installer uses the MosquitoTNet App to send the applicable configuration for it to be able to operate autonomously and automatically. In this respect, MosquitoT firmware administrators and saves such configurations on its Flash memory (non-volatile). MosquitoT firmware also manages its SRAM for certain technical and functional circumstances in which the information is used and protected in a volatile manner. Upon completion of the MosquitoT configuration, the installer may request a reading from the MosquitoTNet App. The Control and Communications module firmware requests a reading from the Sensing and Learning module through the universal asynchronous receiver-transmitter (UART) port. Ten seconds later—the average time it takes for the sensor (camera) to send the response—the firmware processes such information and sends the results to the App to notify the user. A few seconds later, MosquitoT submits all the information related to the test to the IoT platform through previously established connectivity. Fig. 4 shows a unified modeling language (UML) sequence diagram, a conceptual scheme that expresses the behavior and interaction of the MosquitoT firmware with the other components of the system. MosquitoT firmware also features programmable functional logic for event transmission time frequency to the IoT platform and prior to such transmission. MosquitoT firmware reads the tongue depressor

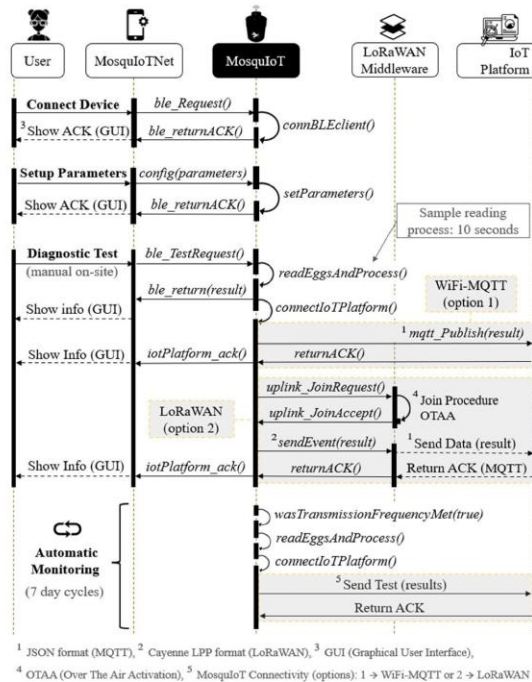


Fig. 4. UML sequence diagram of the firmware (MosquitoT).

to check for the presence of *Ae. aegypti* eggs. The time-frequency of the reading set in MosquitoT depends on the communication link established and the battery autonomy. In case of establishing a WiFi link, and in order for the battery to last seven days, the transmission frequency is recommended to be set up once daily (under any circumstances, the sole event submitted will have four readings performed every 6 h, with its pertinent timestamp). In the case of programming the LoRaWAN communication link for seven days' autonomy, the recommended transmission frequency is four times a day.

The Sensing and Learning module encompasses the design and development of a complex firmware program using MicroPython programming language, and OpenMV LLC's OpenMV IDE (v2.9.0) as programming IDE [60]. A USB port with an OpenMV board was used to debug the firmware developed. In addition, within the same IDE, Serial Terminal, red, green, and blue (RGB) frame buffer viewer and Histogram Display were used for debugging, displaying in real time all processes run by the system's operating system, the performance of the firmware developed, and real-time images of the camera showing the objects of interest being read and quantified. The firmware developed detects and quantifies the *Ae. aegypti* eggs: in order to initially perform this task, the firmware takes five snapshots every 2 s, and prompts a function based on the trained and optimized model for *Ae. aegypti* egg reading (described in Section IV-A). When the model detects the presence of eggs of the species of interest, it assigns an individual ID to each, globally quantifies them, and finally

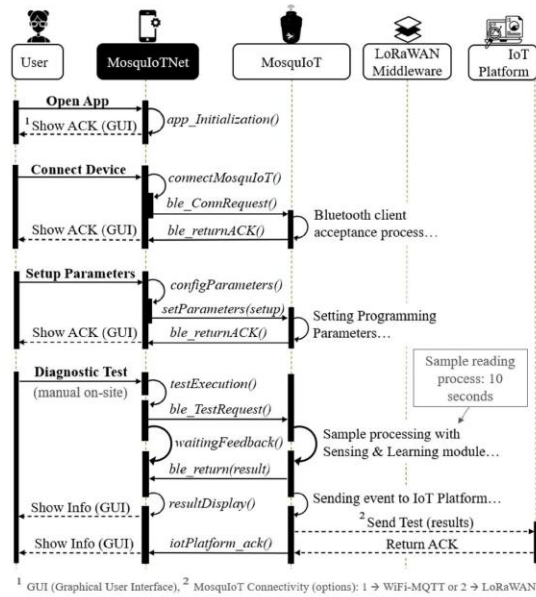


Fig. 5. UML sequence diagram of the MosquitoTNet (Mobile App).

prompts a function that calculates the individual confidence score of each egg read. The latter function also averages the individual confidence score of each of the five snapshots. If that Score is equal to or higher than 0.80, the eggs will be deemed to belong to the *Ae. aegypti* species. To complete the process, when the reading results are available, such information is communicated through the UART port, reporting the number of eggs read, timestamp, and context data inherent to the OpenMV camera (sensor model, hardware version, firmware version, Hardware Abstraction Layer (HAL) version, operating system, frame size, and pixformat). In addition, the firmware also saves all captured snapshots in a microSD memory so as to have evidence and traceability of the readings performed.

V. MOSQUITONET

During the design and development process of MosquitoT, the creation of a Mobile App (MosquitoTNet) was considered essential for the installation, configuration, calibration, and functional diagnosis of the device at the surveillance site. Massachusetts Institute of Technology (MIT) App Inventor [61] was the tool selected to develop the App.

When the user runs MosquitoTNet for the first time, it will be prompted to enable the use of two specific resources: BLE and GPS. These resources are essential to communicate MosquitoTNet with MosquitoT (through BLE) and for the App to be able to transfer the GPS coordinates to the device, for it to be subsequently geo-referenced from the IoT platform. From a functional perspective, MosquitoTNet allows the user to set up the required parameters to ensure the successful and autonomous operation of MosquitoT at the surveillance site. Fig. 5 presents a UML sequence diagram,

representing these functionalities. The setup parameters to be input into MosquitoNet include the address, province, and country where the device is running, the person in charge of the site (name and contact details), type of place where Mosquito is running (home, business, public building, factory or field), name of installer in charge (member of the mosquito surveillance campaign staff), species of interest (in this case, *Ae. aegypti*), device ID previously assigned from the IoT platform, according to the surveillance campaign established by the experts, and finally, the possibility to enable and set up Mosquito's IoT communication engine. Concerning the last of these, the WiFi network parameters can be set up from MosquitoNet (establishing the network and password). If the device is located in a place with LoRaWAN coverage, such connectivity may be easily established from the App.

When setting up Mosquito (at the surveillance site), local diagnosis tests may be carried out from MosquitoNet to calibrate the device and request readings on demand to rapidly calculate the number of eggs read. When the user requests a test reading from Mosquito, the system will submit the results within approximately 10 s, displaying on MosquitoNet the number of eggs read, timestamp, and an ID of the assay. Finally, MosquitoNet also notifies the user if the data have been successfully transmitted to the IoT platform.

VI. IOT PLATFORM

ThingsBoard [46] is the IoT platform selected for this study, as it allows generic and customized IoT devices to be collected, processed, visualized, and managed. The platform combines scalability and performance to ensure data persistence. ThingsBoard enables the secure provision, supervision, and monitoring of IoT entities, through enriched application programming interfaces (APIs) from the server side. The platform is able to transform and standardize data from the devices, and set up and trigger incoming telemetry event alarms, attribute updates, device downtime, and users' actions.

A Web Dashboard (frontend) was designed and developed within ThingsBoard, which allows the surveillance of each Mosquito device installed to be visualized in real time (whether transmitting from a WiFi network or LoRaWAN). In this respect, the user may have access to information specific to each installed device: Mosquito geo-location through interactive maps, the address, province, and country in which the device is running, person in charge of the site (name and contact details), type of place where Mosquito is running, and name of installer in charge. In addition to the context information, the Web Dashboard displays information about the surveillance status at each specific site, detailing the species and number of mosquito eggs read in the last communication to the platform. The Web Dashboard also displays specific technical information about Mosquito, such as information on the status of communications (type of communication link, signal level, and types of events submitted), and specific Mosquito data (device ID and firmware version). It also provides supplemental data about the main egg reading sensor (in this case, the OpenMV CAM): sensor name, hardware version, firmware version, HAL version, and specific camera

configuration details (operating system version, frame size, and pixformat). In addition, the platform also displays the temperature and humidity details typically transmitted by Mosquito. Default rules were defined in the platform for these physical quantities to establish maximum and minimum thresholds. Based on these thresholds, e-mail notifications or alerts are sent when such quantities infringe the rules. Looking forward, this functionality seeks to maximize egg reading success on site and provide the platform with basic data to train Machine Learning modules for users to be able to better understand these vectors at the specific surveillance sites. In addition, as explained in Section IV-C, Mosquito features an accelerometer to pinpoint the device's position and notify the platform upon detecting the permanent tilt of the device. The platform displays information on Mosquito's position and is able to create a rule to trigger and send an e-mail alert to the person in charge of the site upon receiving a tilt event. When receiving an event of this nature, it is understood that Mosquito was tilted, that the water inside it was spilled, and consequently, that the samples contained in the device will no longer be useful for entomological surveillance. In this respect, the person in charge of the site will have to take corrective actions in situ. Finally, the Web Dashboard also displays the water level status inside Mosquito (a vital input for *Ae. aegypti* to lay eggs). All information submitted from Mosquito persists on databases within the IoT platform and is available for the user to perform searches by date and time, ensuring the respective system traceability. Additionally, the IoT platform has a representational state transfer (REST) API, which allows all retrieved data and their time series to be accessed and a copy of such data to be rapidly obtained for subsequent processing with another third party's platforms to perform future studies.

VII. EXPERIMENTAL VALIDATION

Most Machine Learning projects begin by collecting data. For the purposes of this study, we obtained a substantial amount of *Ae. aegypti* eggs on the field by means of traditional ovitraps. With these samples, a training and validation plan was designed to develop the Machine Learning algorithm that would allow Mosquito to recognize and quantify *Ae. aegypti* eggs: a total of 90 tongue depressors with 715 *Ae. aegypti* eggs were established for the training samples, while ten tongue depressors with 67 eggs were established for the validation set. The eggs on all the tongue depressors (100) were quantified using the same methodology implemented by labs or subject-matter experts: a manual reading of each tongue depressor and its associated eggs was performed by means of a TMPZ-C1200 Galileo microscope. Once the eggs on each tongue depressor (training and validation) were quantified, a firmware program was developed in Mosquito to capture snapshots at each of the 90 tongue depressors set for the training model (explained in Section IV-C). These snapshots were taken at an HD sub-resolution of 512×512 pixels (in which Mosquito will operate in the practice). By way of example, Fig. 6 shows one of the 90 tongue depressors used for model training purposes (tongue depressor 16 with 6 *Ae. aegypti* eggs).

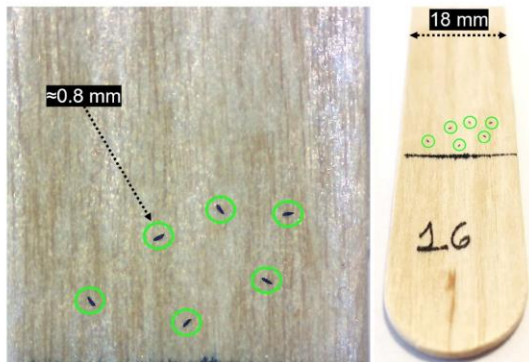


Fig. 6. Tongue depressor N°16 used for model training.

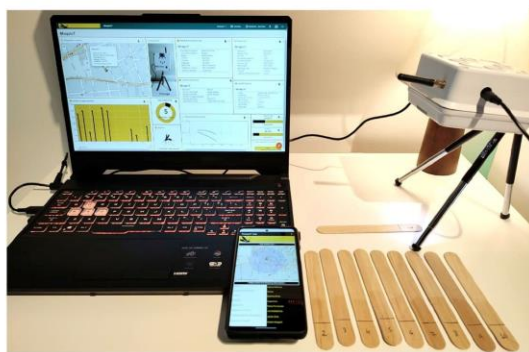


Fig. 7. Experimental setup.

Once the Machine Learning model was implemented within MosquitoT, actual assays were performed with the validation set (ten tongue depressors with 67 eggs). Validation assays were performed in a lab, using a customized MosquitoT prototype to be able to operate in this type of setting (Fig. 7). As part of the validation process performed, apart from *Ae. aegypti* eggs, other objects of varying sizes, colors, and textures (seeds, soil, stones, and grains) were laid on tongue depressors in an attempt to “mislead” the model developed and implemented in MosquitoT in order to validate the model robustness. By way of example, Fig. 8 shows tongue depressors (samples 02, 05, 06, and 07) with their respective validation results (the green circle is indicative of the successful detection of eggs). It is worth mentioning that in the validation assays performed, no eggs from species other than *Ae. aegypti* were used. This is because, in the geographic area of the study (central region of Argentina), no other species of mosquitoes lay their eggs on artificial recipient walls. Therefore, there are no possibilities for MosquitoT to be “misled” by eggs from other species on the tongue depressors. The only mosquito species ovipositing on the ovitraps are *Ae. aegypti* and *Ae. albopictus* [7]. The latter is not present in the region of interest [56].

The results obtained were highly promising, in that MosquitoT succeeded in detecting and quantifying all the eggs

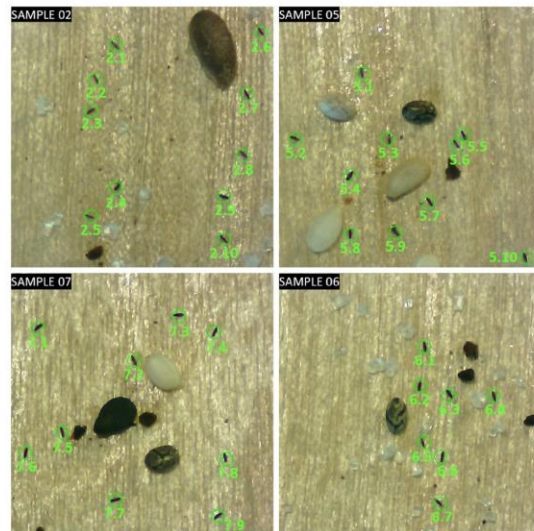


Fig. 8. Tongue depressors used to validate the trained model.

on the ten tongue depressors designated as the validation set. Table III shows the results obtained, which are arranged as follows (from left to right): ID of each tongue depressor used for validation assays (ID Sample), number of eggs read and counted manually using the lab microscope, number of eggs read and counted automatically by MosquitoT, and ID of each egg read and counted by MosquitoT (Egg ID). The last column shows the average individual confidence score for each egg read by MosquitoT. In order for an object read by MosquitoT to be considered an *Ae. aegypti* egg, it should be equal to, or higher than, 0.80, as can be seen from the analysis performed and averages calculated by the MosquitoT algorithm when taking five snapshots with the same sample. Each of the 67 eggs read by MosquitoT exceeded the established threshold. The model validation process was thus successful.

Once the tests were carried out with the validation samples, focused on the accuracy of the TinyML model implemented within MosquitoT, a global test (end-to-end) was carried out to validate the correct functionality of all the digital components in an automatic and autonomous format: from the sensor (MosquitoT) to the IoT platform through the WiFi communication link (transmitting four times a day, frequency of 6 h). Let us highlight that the time segmentation responds to the current and traditional sample collection procedures carried out by the personnel assigned to the entomological campaigns to monitor *Ae. aegypti* (explained in Section I of this work).

For this proof of concept (PoC), one tongue depressor was prepared and installed per day with a variable number of *Ae. aegypti* eggs that responded to the possible behaviors that could be manifested in the field. In the first period (PA) of the PoC, a tongue depressor was installed that increased the number of eggs sequentially as the days passed (typical and expected behavior of the mosquito). In the second period (PB),

TABLE III
RESULTS FROM THE TEST SAMPLES

Tongue depressor (ID Sample)	Number of existing Eggs ¹	Numbers of Eggs read with MosquitoT	Egg ID	MosquitoT Results (confidence score per Egg read) ²
01	3	3	1.1	0.98 ✓
			1.2	0.95 ✓
			1.3	0.97 ✓
02 (Fig. 8)	10	10	2.1	0.98 ✓
			2.2	0.94 ✓
			2.3	0.99 ✓
			2.4	0.98 ✓
			2.5	0.84 ✓
			2.6	0.87 ✓
			2.7	0.94 ✓
			2.8	0.98 ✓
			2.9	0.95 ✓
			2.10	0.94 ✓
03	2	2	3.1	0.95 ✓
			3.2	0.93 ✓
04	8	8	4.1	0.87 ✓
			4.2	0.88 ✓
			4.3	0.99 ✓
			4.4	0.98 ✓
			4.5	0.97 ✓
			4.6	0.99 ✓
			4.7	0.98 ✓
			4.8	0.90 ✓
05 (Fig. 8)	10	10	5.1	0.98 ✓
			5.2	0.91 ✓
			5.3	0.99 ✓
			5.4	0.89 ✓
			5.5	0.96 ✓
			5.6	0.99 ✓
			5.7	0.96 ✓
			5.8	0.82 ✓
			5.9	0.97 ✓
			5.10	0.80 ✓
06 (Fig. 8)	7	7	6.1	0.99 ✓
			6.2	0.94 ✓
			6.3	0.95 ✓
			6.4	0.99 ✓
			6.5	0.82 ✓
			6.6	0.98 ✓
			6.7	0.90 ✓
07 (Fig. 8)	9	9	7.1	0.97 ✓
			7.2	0.90 ✓
			7.3	0.93 ✓
			7.4	0.91 ✓
			7.5	0.83 ✓
			7.6	0.98 ✓
			7.7	0.94 ✓
			7.8	0.86 ✓
			7.9	0.98 ✓
08	4	4	8.1	0.90 ✓
			8.2	0.99 ✓
			8.3	0.88 ✓
			8.4	0.94 ✓
09	5	5	9.1	0.93 ✓
			9.2	0.89 ✓
			9.3	0.97 ✓
			9.4	0.82 ✓
			9.5	0.99 ✓
10	9	9	10.1	0.91 ✓
			10.2	0.93 ✓
			10.3	0.84 ✓
			10.4	0.92 ✓
			10.5	0.97 ✓
			10.6	0.98 ✓
			10.7	0.85 ✓
			10.8	0.91 ✓
			10.9	0.95 ✓

¹ Readings were taken through a laboratory microscope.
² Each result expressed is the result of an average of 5 snapshots made with MosquitoT

there was no presence of eggs (a behavior that could also occur). In the third period (PC), there was a behavior of egg

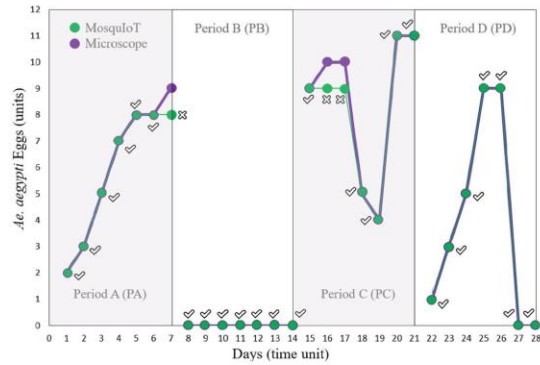


Fig. 9. Results of the Proof of Concept carried out over 28 days.

TABLE IV
PROOF OF CONCEPT RESULTS

Tongue depressor (ID Sample)	Day	Period (7 days)	Numbers of Eggs read				Result	
			Laboratory Microscope	MosquitoT				
				M1 ¹	M2 ¹	M3 ¹		M4 ¹
1	1	PA	2	2	2	2	2	✓
2	2		3	3	3	3	3	✓
3	3		5	5	5	5	5	✓
4	4		7	7	7	7	7	✓
5	5		8	8	8	8	8	✓
6	6		8	8	8	8	8	✓
7	7		9	8	8	8	8	✗
8	8	PB	0	0	0	0	0	✓
9	9		0	0	0	0	0	✓
10	10		0	0	0	0	0	✓
11	11		0	0	0	0	0	✓
12	12		0	0	0	0	0	✓
13	13		0	0	0	0	0	✓
14	14		0	0	0	0	0	✓
15	15	PC	9	9	9	9	9	✓
16	16		10	9	9	9	9	✗
17	17		10	9	9	9	9	✗
18	18		5	5	5	5	5	✓
19	19		4	4	4	4	4	✓
20	20		11	11	11	11	11	✓
21	21		11	11	11	11	11	✓
22	22	PD	1	1	1	1	1	✓
23	23		3	3	3	3	3	✓
24	24		5	5	5	5	5	✓
25	25		9	9	9	9	9	✓
26	26		9	9	9	9	9	✓
27	27		0	0	0	0	0	✓
28	28		0	0	0	0	0	✓
Totals & Accuracy			129	126	126	126	126	≈ 97.67 %

¹ Measurements made automatically by MosquitoT (frequency: 6 hs)

loss and with the passing of days, a significant increase in oviposition. In the last period (PD), a behavior of egg loss due to flooding or overturning of the recipient was noticed (Fig. 9).

The results obtained from the PoC were very promising since the classification accuracy of MosquitoT was ≈97.67%, managing to identify and count 126 of the 129 eggs that were counted manually with the Galileo TMPZ-C1200 laboratory

microscope (Table IV). From the point of view of the performance and stability of the MosquitoT firmware, during the 672 h of continuous operation that the PoC required, it did not show any stability problems, which successfully complied with its routine of sensing tongue depressors every 6 h during the 28 test days. From the point of view of stability in terms of communications, MosquitoT carried out 112 communications in a timely manner through a WiFi network to the IoT platform. In addition, it was possible to verify that there were no lags greater than 1 s between the MosquitoT timestamp and one of the timestamps of the event received in the MQTT broker of the IoT platform. To conclude, the first MosquitoT laboratory prototype achieved important and promising results that will enable its evolution in the next stages of the project.

VIII. CONCLUSION

This work concerns the design, development, and functional testing of MosquitoT, a device based on traditional ovitraps powered by IoT and TinyML technologies, digitizing and automating the reading and counting of eggs laid by *Ae. aegypti*—the vector mosquito of the dengue and other viruses. This system could prove extremely useful to the provincial and municipal authorities of Argentina (geographic area of application) to have a dynamic understanding of the populations of this insect and to prevent diseases, such as dengue, chikungunya, Zika, and others.

The major benefit of MosquitoT within the current traditional ovitrap context lies in the proposed technology performing automatic and ongoing surveillance (once or several times a day). Moreover, thanks to the IoT platform implemented, the system is able to build risk maps to provide the authorities with a dynamic surveillance tool in real time. In traditional ovitraps, the process is slow and manual. Egg reading or detection is performed manually with the aid of a laboratory microscope seven days after the installation of the recipient at the surveillance site (this methodology is more corrective than preventive and human error could be frequent). This work introduces the first MosquitoT laboratory prototype which, through evidenced training and validation processes, has been proven to work efficiently and effectively, from reading and counting eggs to submitting and displaying the information on the IoT platform's Web Dashboard (frontend). In addition, in order to successfully run MosquitoT installation, configuration, and functional diagnosis processes at the various surveillance sites, the MosquitoTNet App was developed.

Concerning future works, and based on the promising results obtained from the first laboratory prototype, a next phase is envisaged involving a new PoC with an upgraded version of MosquitoT fit to outdoor settings, as well as field assays, deploying specimens in certain cities of the region of interest to visualize the respective risk map and the associated predictive model on the IoT platform. The primary purpose of the PoC is to show that by making the current ovitrap system digital with MosquitoT, the current *Ae. aegypti* detection campaigns, which are intrinsically associated with the prevention of *Ae. aegypti* -borne diseases, can be enhanced and taken to the next level.

REFERENCES

- [1] C. Potter, "Stop the biting: Targeting a mosquito's sense of smell," *Cell*, vol. 156, pp. 878–881, Feb. 2014.
- [2] A. Murugesan et al., "Dengue virus," in *Emerging and Reemerging Viral Pathogens*, M. M. Ennaji, Ed. Cambridge, MA, USA: Academic, 2020, ch. 16, pp. 281–359.
- [3] European Centre for Disease Prevention and Control. (2020). *Aedes aegypti*. [Online]. Available: <https://www.ecdc.europa.eu/en/disease-vectors/facts/mosquito-factsheets/Ae.-aegypti>
- [4] J. Ramos. (2020). *The Yellow Fever Mosquito Aedes aegypti (Linnaeus): The Breeding Sites*. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/69709>
- [5] WHO. (2020). *Dengue and Severe Dengue*. [Online]. Available: <https://apps.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/en/>
- [6] W. Tracey, "Mosquitos: The taste of water," *eLife*, vol. 8, Jul. 2019, Art. no. 48654.
- [7] J. Silver et al., *Mosquito Ecology: Field Sampling Methods*, 3rd ed. Springer, 2008.
- [8] B. Johnson, S. Ritchie, and D. Fonseca, "The state of the art of lethal oviposition trap-based mass interventions for arboviral control," *Insects*, vol. 8, no. 1, p. 5, Jan. 2017.
- [9] A. Hasnan, N. C. Dom, H. Rosly, and C. S. Tiong, "Quantifying the distribution and abundance of *Aedes* mosquitoes in dengue risk areas in Shah Alam, Selangor," *Proc.-Social Behav. Sci.*, vol. 234, pp. 154–163, Oct. 2016.
- [10] H. H. Wu, "A dengue vector surveillance by human population-stratified ovitrap survey for *Aedes* (Diptera: Culicidae) adult and egg collections in high dengue-risk areas of Taiwan," *J. Med. Entomol.*, vol. 50, no. 2, pp. 261–269, 2013.
- [11] C. Silva et al., "Comparative evaluation of trap efficiency for the capture and collection of *Aedes aegypti* under field conditions," *Cadernos Saúde Coletiva*, vol. 26, pp. 241–248, Aug. 2018.
- [12] D. Vezzani et al., "Surveillance of the dengue vector at its distribution limit. A collaborative experience between the scientific, municipal and citizen ambits," *Medicina*, vol. 82, no. 4, pp. 505–512, 2022.
- [13] R. Fay, "A preferred oviposition site as a surveillance method for *Aedes aegypti*," *Mosquito News*, vol. 26, no. 4, pp. 531–535, 1966.
- [14] Y. Chen, A. Why, G. Batista, A. Mafra-Neto, and E. Keogh, "Flying insect classification with inexpensive sensors," *J. Insect Behav.*, vol. 27, no. 5, pp. 657–677, Sep. 2014.
- [15] B. J. Johnson, B. B. Rohde, N. Zeak, K. M. Staunton, T. Prachar, and S. A. Ritchie, "A low-cost, battery-powered acoustic trap for surveilling male *Aedes aegypti* during rear-and-release operations," *PLoS ONE*, vol. 13, no. 8, Aug. 2018, Art. no. e0201709.
- [16] Y. Zhong, J. Gao, Q. Lei, and Y. Zhou, "A vision-based counting and recognition system for flying insects in intelligent agriculture," *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1489, May 2018.
- [17] M. Preti, F. Verheggen, and S. Angeli, "Insect pest monitoring with camera-equipped traps: Strengths and limitations," *J. Pest Sci.*, vol. 94, no. 2, pp. 203–217, Mar. 2021.
- [18] I. Potamitis, I. Rigakis, N. Vidakis, M. Petousis, and M. Weber, "Affordable bimodal optical sensors to spread the use of automated insect monitoring," *J. Sensors*, vol. 2018, pp. 1–25, 2018.
- [19] J. Wang, S. Zhu, Y. Lin, S. Svanberg, and G. Zhao, "Mosquito counting system based on optical sensing," *Appl. Phys. B*, vol. 126, no. 2, Feb. 2020.
- [20] (2021). *European Transnational and Automated Vector Surveillance System*. Vectrack Description. [Online]. Available: <https://higieneambiental.com/control-de-plagas/sistema-europeo-de-vigilancia-vectorial-transnacional-y-automatizado>
- [21] Israel21. (2021). *Mosquito Laser Detector. (Bzigo Product Description)*. [Online]. Available: <https://es.israel21c.org/detector-laser-de-mosquitos-adios-a-las-picaduras/>
- [22] BG-Sentinel. (2020). *The BG-Sentinel: Bioagents' Mosquito Trap for Researchers*. [Online]. Available: <https://www.bg-sentinel.com/>
- [23] N. A. Honório, W. D. C. Silva, P. J. Leite, J. M. Gonçalves, L. P. Lounibos, and R. Lourenço-de-Oliveira, "Dispersal of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (diptera: Culicidae) in an urban endemic dengue area in the state of Rio de Janeiro, Brazil," *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, vol. 98, no. 2, pp. 191–198, Mar. 2003.

- [24] P. Reiter, G. G. Clark, R. A. Anderson, and M. A. Amador, "Short report: Dispersal of *Aedes aegypti* in an urban area after blood feeding as demonstrated by rubidium-marked eggs," *Amer. J. Tropical Med. Hygiene*, vol. 52, no. 2, pp. 177–179, Feb. 1995.
- [25] Argentine Ministry of Health. (2016). *Guidelines for the Prevention and Control of Aedes Aegypti*. [Online]. Available: <https://bancos.salud.gob.ar/sites/default/files/2018-10/0000000235cnt-01-directrices-dengue-2016.pdf>
- [26] M. Bentley et al., "Chemical ecology and behavioral aspects of mosquito oviposition," *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 34, pp. 401–421, 1989.
- [27] C. C. Jansen and N. W. Beebe, "The dengue vector *Aedes aegypti*: What comes next," *Microbes Infection*, vol. 12, no. 4, pp. 272–279, Apr. 2010.
- [28] The Things Network. (2022). *The Things Fundamentals on LoRaWAN*. [Online]. Available: <https://www.thingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- [29] Q. M. Quadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, and Z. Zhang, "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77454–77473, 2018.
- [30] M. Rizzi et al., "Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 12, pp. 3340–3349, Dec. 2017.
- [31] P. Ferrari, E. Sisinni, P. Bellagente, D. F. Carvalho, A. Depari, A. Flammini, M. Pasetti, S. Rinaldi, and I. Silva, "On the use of LoRaWAN and cloud platforms for diversification of mobility-as-a-service infrastructure in smart city scenarios," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–9, 2022.
- [32] OpenMV. (2021). *OpenMV Cam H7 Plus*. [Online]. Available: <https://openmv.io/collections/cams/products/openmv-cam-h7-plus>
- [33] (2021). *OV5645 (General Description)*. [Online]. Available: <https://www.ovt.com/sensors/OV5645>
- [34] S. Soro, "TinyML for ubiquitous edge AI," 2021, *arXiv:2102.01255*.
- [35] H. Han and J. Siebert, "TinyML: A systematic review and synthesis of existing research," in *Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun. (ICAIIIC)*, Feb. 2022, pp. 269–274.
- [36] B. Sudharsan et al., "TinyML benchmark: Executing fully connected neural networks on commodity microcontrollers," in *Proc. IEEE 7th World Forum Internet Things (WF-IoT)*, Jun./Jul. 2021, pp. 883–884.
- [37] R. Partha, "A review on TinyML: State-of-the-art and prospects," *J. King Saud Univ.-Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, pp. 1595–1623, Apr. 2022.
- [38] J. Bier. (2021). *AI and Vision at the Edge*. [Online]. Available: <https://www.eetimes.com/ai-and-vision-at-the-edge/>
- [39] Edge Impulse. (2021). *General Description Services*. [Online]. Available: <https://www.edgeimpulse.com/>
- [40] A. Rana, Y. Dhiman, and R. Anand, "Cough detection system using TinyML," in *Proc. Int. Conf. Commun. Power Technol. (IC3P)*, Jan. 2022, pp. 119–122.
- [41] S. Hong et al., "Edge impulse machine learning for embedded system design," *J. Korea Soc. Digit. Ind. Inf. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 9–15, 2021.
- [42] Z. Wang, W. Wang, Z. Zhang, F. Hu, X. Xia, and L. Chen, "DeepEdge: A novel appliance identification edge platform for data gathering, capturing and labeling," *Sensors*, vol. 22, no. 7, p. 2432, Mar. 2022.
- [43] A. Gkogkidis, V. Tsoukas, S. Papafotikas, E. Boumpa, and A. Kakarountas, "A TinyML-based system for gas leakage detection," in *Proc. 11th Int. Conf. Modern Circuits Syst. Technol. (MOCASST)*, Jun. 2022, pp. 1–5.
- [44] D. Robert et al., "Tensorflow lite micro: Embedded machine learning for tinyml systems," in *Proc. Mach. Learn. Syst.*, vol. 3, 2021, pp. 800–811.
- [45] Edge Impulse. (2022). *TensorFlow Lite Reference Models (Edge Impulse Docs)*. [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/pre-built-datasets/tensorflow-lite-reference-models>
- [46] ThingsBoard. (2022). *What is ThingsBoard?* [Online]. Available: <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>
- [47] L. Moreau. (2022). *Announcing FOMO, TinyML, Computer Vision*. [Online]. Available: <https://www.edgeimpulse.com/blog/announcing-fomo-faster-objects-more-objects>
- [48] Edge Impulse. (2022). *FOMO*. [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/edge-impulse-studio/learning-blocks/object-detection/fomo-object-detection-for-constrained-devices>
- [49] The Next Web. (2022). *FOMO is a TinyML Neural Network*. [Online]. Available: <https://thenextweb.com/news/fomo-tinyml-neural-network-object-detection>
- [50] PyImageSearch. (2022). *Introduction to the YOLO Family*. [Online]. Available: <https://pyimagesearch.com/2022/04/04/introduction-to-the-yolo-family/>
- [51] K. S. Kumar et al., "A mobile-based framework for detecting objects using SSD-mobilenet in indoor environment," in *Proc. Intell. Big Data Technol.-Beyond Hype (ICBDCC)*. Singapore: Springer, 2021, pp. 65–76.
- [52] A. Howard et al., "MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications," 2017, *arXiv:1704.04861*.
- [53] Google AI Blog. (2018). *MobileNetV2*. [Online]. Available: <https://ai.googleblog.com/2018/04/mobilenetv2-next-generation-of-on.html>
- [54] Edge Impulse. (2022). *Edge Impulse, FOMO Libraries*. [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/deployment/running-your-impulse-locally>
- [55] A. So et al., "Digital signal processing and computer vision," in *Intelligent Building Systems (The International Series on Asian Studies in Computer and Information Science)*, vol. 5. Boston, MA, USA: Springer, 1999.
- [56] G. C. Rossi, "Annotated checklist, distribution, and taxonomic bibliography of the mosquitoes (Insecta: Diptera: Culicidae) of Argentina," *Check List*, vol. 11, no. 4, p. 1712, Aug. 2015.
- [57] Heltec Automation. (2018). *WiFi LoRa 32 (V2)*. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>
- [58] Espressif. (2021). *ESP32 Datasheet, Version 3.8*. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [59] Cayenne. (2021). *Cayenne LPP, Cayenne Docs*. [Online]. Available: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/loralora-how-lorawan-works>
- [60] OpenMV. (2021). *OpenMV IDE Overview*. [Online]. Available: <https://docs.openmv.io/openmvcam/tutorial/openmvide-overview.html>
- [61] Massachusetts Institute of Technology (MIT) App Inventor. (2021). *With MIT App Inventor, Anyone Can Build Apps With Global Impact*. [Online]. Available: <https://appinventor.mit.edu/>
- [62] A. Mohan. (2020). *Review On MobileNet V2*. [Online]. Available: <https://medium.datadriveninvestor.com/review-on-mobile-net-v2-ec5cb7946784>
- [63] M. Hollemans. (2018). *MobileNet Version 2*. [Online]. Available: <https://machinethink.net/blog/mobilenet-v2/>
- [64] H. Jingbo et al., "Surface water quality classification based on MobileNetV2," in *Proc. J. Phys., Conf.*, vol. 1646, 2020, Art. no. 012049.
- [65] P. N. Huu et al., "Proposed detection face model by MobileNetV2 using Asian data set," *J. Elect. Comput. Eng.*, vol. 2022, pp. 1–19, Art. no. 9984275, doi: 10.1155/2022/9984275.
- [66] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L.-C. Chen, "MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks," in *Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, Jun. 2018, pp. 4510–4520.
- [67] D. Liu. (2017). *A Practical Guide to ReLU*. [Online]. Available: <https://medium.com/@danqing/a-practical-guide-to-relu-b83ca804f1f7>
- [68] Edge Impulse. (2023). *Classification (Keras)*. [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/edge-impulse-studio/learning-blocks/classification>
- [69] Semtech. (2023). *SX1276 Wireless Module*. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-RF/loralora-connect/sx1276>
- [70] Components101. (2020). *ADXL345 Accelerometer*. [Online]. Available: <https://components101.com/modules/adxl345-accelerometer-module>
- [71] Sunrom Electronic. (2023). *Light Sensing Module*. [Online]. Available: <https://www.sunrom.com/pl/light-sensing-module-ldr>
- [72] Alldatasheet.com. (2023). *TIP127 (PNP Darlington Power Transistor)*. [Online]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/617300/NJSEMI/TIP127.html>
- [73] Autodesk Instructables. (2023). *Water Level Sensor Arduino (Tutorial)*. [Online]. Available: <https://www.instructables.com/How-to-use-a-Water-Level-Sensor-Arduino-Tutorial/>
- [74] Electro Schematics. (2022). *AHT10 Sensor*. [Online]. Available: <https://www.electroschematics.com/temperature-sensor/>



Javier Aira received the bachelor's degree in management of automation and robotics systems with the National University of Lomas de Zamora, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina, in 2016, and the master's degree in strategic management in information technology from the European University of the Atlantic, Santander, Spain, in 2020. He is currently pursuing the Ph.D. degree in advanced computer technologies in the IoT discipline in smart cities at the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain.

He has more than 18 years of experience in the industry, specifically in the area of research and development applied to fully digital solutions.



Francisco M. Delicado received the Ph.D. degree in computer engineering from the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, in 2005.

He has been an Associate Professor with the Department of Computer Engineering, University of Castilla-La Mancha, since 2007, and a member of the research group High-Performance Networks and Architectures, Albacete Research Institute of Informatics, Albacete. His research interests include software-defined networking (SDN), wireless sensor networks (WSN), heterogeneous low-power WSN, and cloud networking.



Teresa Olivares received the Ph.D. degree in computer science from the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain, in 2003.

She is currently an Associate Professor with the Department of Computing Systems, University of Castilla-La Mancha. She is a member of the research group High-Performance Networks and Architectures, Albacete Research Institute of Informatics, Albacete. She has participated in more than 40 research projects and has coauthored more than 50 research articles in journals, conferences, and

book chapters. Her main scientific research interests include the Internet of Things standards, communications and protocols, heterogeneous low-power wireless sensor networks and standards, smart environments, industry 4.0, and reverse logistics.



Dario Vezzani received the Ph.D. degree in biological science from the University of Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, in 2003.

He is currently working with the Ecosystems Institute, National University of the Center of Buenos Aires Province, Tandil, Argentina. He is also a member of the National Scientific and Technical Research Council (CONICET), Tandil. His research interests include ecology and the control of mosquitoes.



3 Discusión

Esta tesis doctoral se enfocó en tres desafíos medioambientales interrelacionados que se originan a partir de la contaminación provocada por el uso de agroquímicos en el sector agroindustrial. Estos desafíos tienen un impacto significativo en la salud de la población y en el equilibrio ecológico. El objetivo principal de esta investigación fue proponer soluciones tecnológicas innovadoras para abordar estos desafíos, beneficiando a individuos y ecosistemas afectados por la contaminación de estos químicos. Con el fin de alcanzar este objetivo principal, se formularon tres objetivos parciales o secundarios, y sus sub-objetivos y cuestiones de investigación (CIs). En este capítulo, se detallan las contribuciones significativas que evidencian la forma en que se han tratado y respondido a estos desafíos de investigación.



3.1 Sobre los resultados obtenidos del objetivo 1 (SpectroGLY)

Para este objetivo, se inició el proceso de investigación con un exhaustivo estudio del estado actual del problema de la contaminación de aguas con el herbicida glifosato y su consiguiente impacto en la salud pública y el entorno ambiental. Durante este análisis, se concibió y diseñó un semáforo digital que se integró en el primer prototipo de SpectroGLY (Fig. 8), permitiendo la identificación de rangos de concentración de residuos de glifosato, que abarcan desde los 10 hasta los 2000 mg/L.



Fig. 8 SpectroGLY con una muestra de agua ya analizada

Los indicadores que conforman el semáforo digital incluyen el LD50 (Average Lethal Dose), LC50 (Lethal Concentration 50), NOAEL (No-Observed-Adverse-Effect Level) y LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level). Además, se realizó una revisión del estado actual de las tecnologías digitales utilizadas para detectar glifosato en aguas [79], [120]-[135], así como de los métodos analíticos quimiométricos que son compatibles con el concepto del semáforo digital de SpectroGLY. En este contexto, se evaluó la técnica analítica propuesta por Bhaskara et al. [136]. Dicha técnica se basa en una reacción química colorimétrica del glifosato en presencia de ninhidrina, un reactivo cromogénico, y la presencia de un catalizador, el molibdato de sodio, lo que permite la detección a través de espectroscopía. Esta reacción produce un producto violeta conocido como el “púrpura de Ruhemann” con una máxima absorción en el rango visible a 570 nm. La técnica propuesta por Bhaskara et al. demostró su eficacia, lo que llevó a un estudio más profundo sobre la tecnología de espectrometría VIS-NIR y finalizó con la implementación de esta técnica dentro SpectroGLY a través de la utilización del sensor multiespectral AS7265X [137], que abarca un rango espectral de 410 a 940 nm y admite 18 longitudes de onda con un FWHM (Full Width at Half Maximum) de 20 nm. Este sensor viene previamente calibrado por el fabricante y cuenta con la capacidad de integrar un obturador equipado con tres LEDs (uno de 5700 Kelvin de luz blanca, otro de 405 nm de luz ultravioleta, y el tercero de 875 nm de luz infrarroja) que tiene el objetivo de mejorar y homogeneizar las mediciones realizadas en las muestras (Fig. 9). La elección

del sensor multiespectral AS7265X resultó adecuada y respecto al rendimiento de SpectroGLY, el fabricante del sensor multiespectral detalla que el error de precisión es del 12%.



Fig. 9 SpectroGLY (Módulo de Sensado): sensor AS7265X, obturador y LEDs

Como resultado de esta contribución y obtención de este importante conocimiento, se logró diseñar, desarrollar y calibrar el primer prototipo funcional de SpectroGLY. Este dispositivo se caracteriza por su bajo coste, portabilidad, facilidad de uso y dimensiones compactas. Basado en la tecnología VIS-NIR, permite la detección de residuos de glifosato en agua. En términos de conectividad IoT, SpectroGLY admite múltiples alternativas para operar en los contextos mencionados, incluyendo WiFi y LoRaWAN. En el caso de esta última se incluyó para dar conectividad al dispositivo en áreas donde las redes tradicionales presentan limitaciones o no tienen cobertura.

En cuanto a la alimentación, SpectroGLY ofrece dos opciones: una alimentación externa a través de una fuente convencional y una alimentación interna mediante una batería de litio que proporciona hasta 24 horas de autonomía en uso continuo. Además, se incorporaron sensores adicionales para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema, incluyendo un sensor de temperatura y humedad ambiente, ya que estas variables influyen en la precisión del sensor AS7265X. También se incluyó un acelerómetro de tres ejes que verifica las condiciones óptimas para el muestreo. Todas

las funciones de SpectroGLY se complementan con un actuador sonoro (buzzer) que informa al usuario sobre el éxito de las operaciones o cualquier problema que pueda surgir durante las pruebas. Además, SpectroGLY está equipado con un display OLED (Organic Light-Emitting Diode) que proporciona al usuario información sobre el funcionamiento del dispositivo.

En términos de arquitectura, se contribuyó con el diseño, desarrollo e implementación de un ecosistema digital multiplataforma que comprende una aplicación móvil, una plataforma IoT y un MW LoRaWAN, todos diseñados para operar sinérgicamente con SpectroGLY (Fig. 10).



Fig. 10 Ecosistema digital asociado al proyecto SpectroGLY

El proceso de diseño e implementación de la arquitectura en principio incluyó la selección, configuración, despliegue, diseño y desarrollo del “backend” y “frontend” de la plataforma IoT utilizando de base la plataforma comercial ThingsBoard [141] en modalidad de servicio PaaS. El dashboard web (“frontend”) desarrollado muestra la geoposición de SpectroGLY, basada en las coordenadas GPS del smartphone del usuario (a través de la aplicación móvil), la firma espectral obtenida de las muestras analizadas y los resultados de las pruebas (Fig. 11). El dashboard web ofrece al usuario la capacidad de realizar pruebas manuales y visualizar los parámetros más significativos de cada prueba: número de prueba, identificación de la muestra, origen de la muestra, agroquímico analizado, tipo/cantidad de agentes reactivos utilizados y otros parámetros

que ayudan a comprender mejor el contexto en el que se ejecutó la prueba. Como complemento, la plataforma valida y asegura que las mediciones en el campo se realicen a temperatura y humedad ambiente. La posición del equipo en el momento de la medición también se analiza y se visualiza en el dashboard web. Toda la información enviada desde SpectroGLY a través del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) persiste en las bases de datos dentro de la plataforma y está disponible para que el usuario realice búsquedas por fecha y hora, asegurando la respectiva trazabilidad.

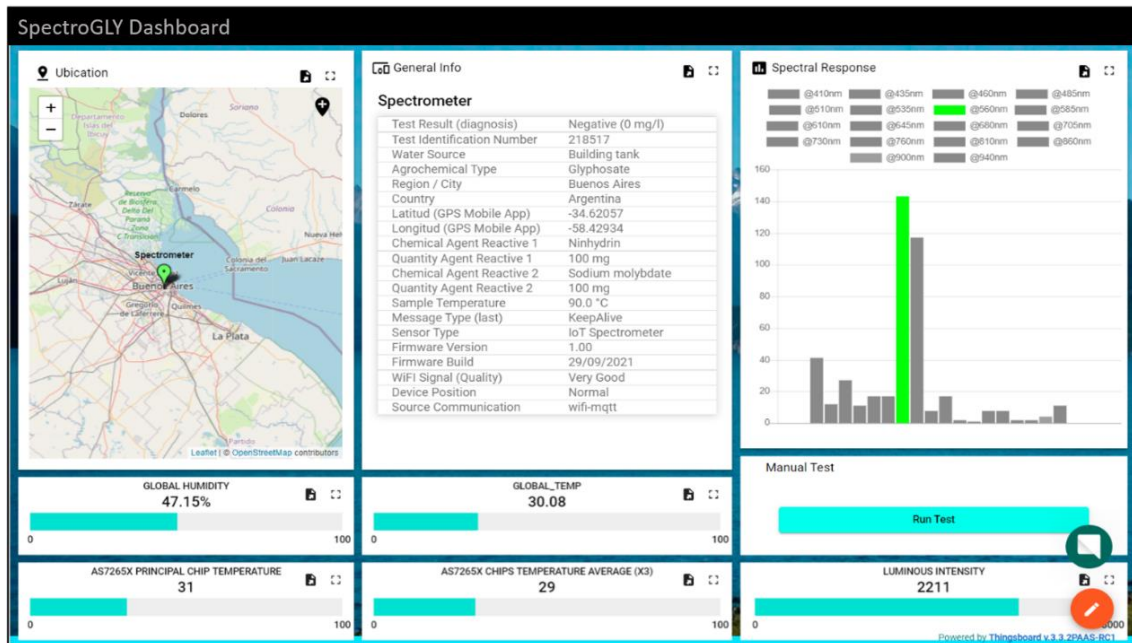


Fig. 11 Dashboard web (frontend) desarrollado para el proyecto SpectroGLY

También se configuró el MW LoRaWAN The Things Networks (TTN) [142] junto con el Gateway Dragino LG02 [143] para establecer una red LoRaWAN en la banda australiana (AU915: 915-928 MHz), cumpliendo con los estándares del espectro radioeléctrico establecidos por el ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones de Argentina). La integración entre el Gateway y TTN se llevó a cabo mediante el protocolo HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure), y TTN se conectó a ThingsBoard mediante el uso del motor de integraciones de esta plataforma IoT, que emplea MQTT + TLS (Transport Layer Security) versión 1.2 para integrarse con sistemas de terceros.

Además, se desarrolló una aplicación móvil para dispositivos Android (Fig. 12), que permite la interacción bidireccional con SpectroGLY y la obtención en tiempo real de los resultados de las muestras de agua analizadas. La aplicación se diseñó y desarrolló utilizando MIT App Inventor [144]. Para validar la funcionalidad de los componentes integrados en la arquitectura, se realizaron pruebas sinérgicas que abarcaron todos los elementos, incluido el dispositivo SpectroGLY. Estas pruebas también evaluaron las opciones de conectividad establecidas para operar en diversos contextos de medición, como WiFi y LoRaWAN. Los elementos mencionados se integraron y sincronizaron de

manera efectiva con SpectroGLY, lo que permitió el análisis de muestras de agua sin importar el contexto de medición. Esto aseguró que los resultados fueran susceptibles de un procesamiento eficiente, fácil de utilizar y de rápida visualización. Gracias a esta arquitectura, SpectroGLY posibilitó a los usuarios obtener los resultados de sus muestras en tan solo 10 minutos, eliminando la necesidad de enviar las muestras al laboratorio para su evaluación y diagnóstico, como se hacía tradicionalmente. Este enfoque se traduce en una optimización de tiempos y costes. Además, la arquitectura incorporó un módulo funcional que tiene la capacidad de emitir alertas tempranas a las autoridades de control, permitiéndoles tomar medidas correctivas para evitar que las personas estuvieran expuestas a agua contaminada con glifosato, mitigando así potenciales riesgos para la salud y el medio ambiente.

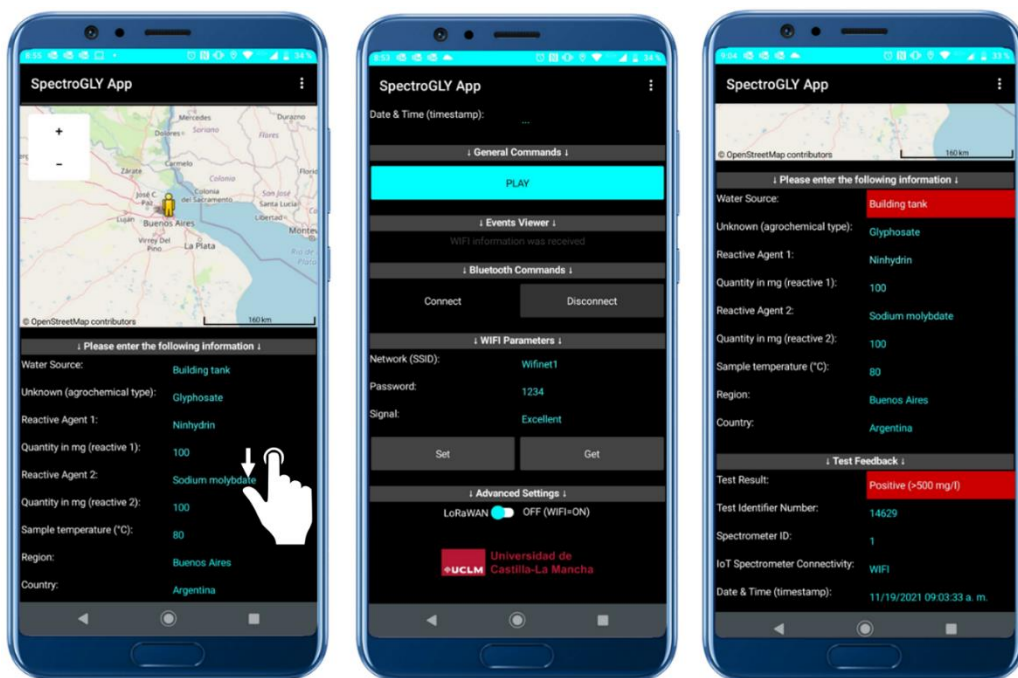


Fig. 12 Aplicación móvil desarrollada para SpectroGLY

Finalmente, en términos metodológicos en cuanto a la calibración y validación de SpectroGLY, se comenzó con la selección y acondicionamiento de un laboratorio de ensayos, cumpliendo con todas las normativas de seguridad necesarias para llevar a cabo los procesos de calibración y validación de SpectroGLY. En este entorno controlado, se preparó el compuesto glifosato junto con sus componentes auxiliares, que incluían un agente reactivo y un catalizador. Estos materiales se utilizaron para el proceso de calibración mediante un conjunto de 12 muestras designadas como muestras de calibración (Fig. 13). Las lecturas de estas muestras de calibración se llevaron a cabo y los datos asociados a estas lecturas se sometieron a análisis estadístico utilizando el software XLSTAT [145]. El propósito de este análisis fue construir una curva de calibración con una longitud de onda de 560 nm y derivar la ecuación de regresión lineal que define el modelo resultante.

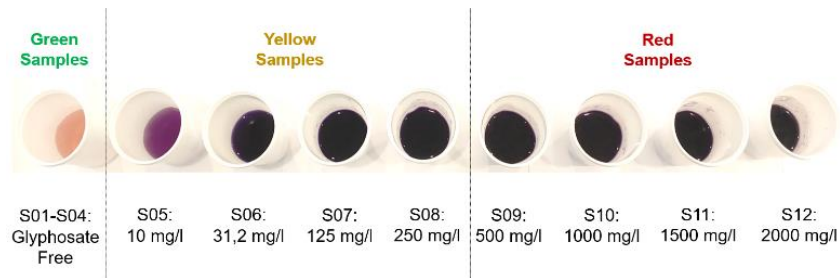


Fig. 13 Resultado colorimétrico obtenido en el proceso de calibración

Posteriormente, después de la obtención de la curva de calibración y los parámetros específicos del semáforo digital a partir del análisis de las muestras de calibración, la ecuación de regresión lineal se incorporó en el firmware de SpectroGLY. En cuanto a la validación funcional, se prepararon 15 muestras de prueba que se analizaron mediante SpectroGLY. Los resultados se compararon con el color del semáforo asignado a cada muestra, lo que permitió verificar empíricamente el correcto funcionamiento de SpectroGLY en la asignación precisa de colores. Adicionalmente, se adquirió, configuró y calibró un espectrómetro de alta resolución de laboratorio, modelo AvaSpec-ULS3648 de Avantes [146], con un rango espectral de 200 a 1100 nm (VIS-NIR), un FWHM de 0,05 a 20 nm (configurable) y un error de precisión menor a 1%. Este espectrómetro se calibró a la misma longitud de onda de 560 nm y se utilizaron las muestras de prueba que previamente se habían analizado con SpectroGLY para realizar ensayos funcionales comparativos. Como resultado de este proceso, se validó y confirmó que los resultados obtenidos por SpectroGLY eran consistentes y coincidían con los del espectrómetro de laboratorio (Fig. 14). No se observaron falsos positivos ni negativos. En conclusión, estos importantes resultados posicionan a SpectroGLY como una herramienta altamente prometedora para prevenir posibles casos de intoxicación por la ingesta de agua contaminada con glifosato.

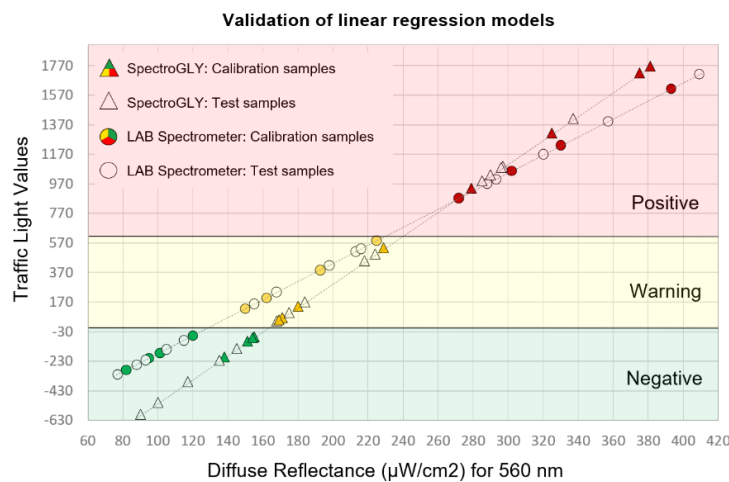


Fig. 14 Verificación gráfica del correcto funcionamiento de SpectroGLY

3.2 Sobre los resultados obtenidos del objetivo 2 (DriftGLY)

Para este segundo objetivo, se inició el proceso de investigación mediante un exhaustivo estudio del estado del arte sobre la problemática de la contaminación causada por agroquímicos presentes en el aire debido a fenómenos de deriva, y su impacto tanto en la salud pública como en el contexto medioambiental. Se llevó a cabo un análisis técnico de las derivas de agroquímicos en el contexto agroindustrial, investigando las causas y factores técnicos responsables de su generación, sus consecuencias, los actores involucrados y las variables externas que amplifican o mitigan su impacto [89], [81], [90], [91]. Asimismo, se procedió al estudio, análisis y configuración de un semáforo digital que se incorporó en el primer prototipo de DriftGLY (Fig. 15), basado en los valores de tasa de dosis mínima y máxima (en litros por hectárea) de los agroquímicos seleccionados para este estudio, específicamente los herbicidas 2,4-D [106] y glifosato [107]. Estos valores de tasa de dosis se basan en las estipulaciones de las autoridades y fabricantes como parte de su proceso de homologación, permitiendo su posterior comercialización [147]. El semáforo digital dentro de DriftGLY se configuró en tres estados: el color amarillo, identificado como “Warning”, se utiliza para señalar la presencia de cualquiera de los dos agroquímicos (o una combinación de ellos) dentro de los rangos de dosis establecidos por las autoridades y fabricantes. En contraste, el color rojo, etiquetado como “Hazard”, indica la presencia de cualquiera de los dos agroquímicos (o una combinación) con tasas de dosis que superan o están fuera del rango especificado. Por último, el color verde, marcado como “Okay”, señala la ausencia de agroquímicos.

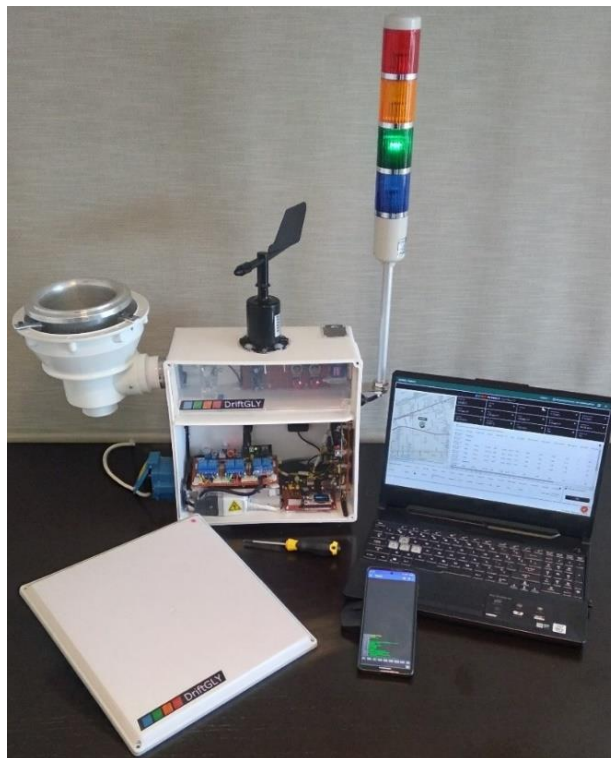


Fig. 15 Primer prototipo funcional de DriftGLY

Además, se realizó una revisión detallada del estado del arte en cuanto a los sistemas tecnológicos actuales empleados para la detección y el monitoreo de agroquímicos en el aire [92]-[105] con un énfasis especial en aquellos que detectan estos compuestos en sus formas particuladas, gaseosas y líquidas. Cabe destacar que, en el caso de la fase líquida, la mayoría de los sistemas disponibles son analógicos, manuales y costosos. Durante esta revisión, se examinaron también los desafíos relacionados con el muestreo de las muestras obtenidas a través de los sistemas existentes, abordando aspectos como el tiempo requerido, la logística y los costes asociados al envío de dichas muestras a laboratorios especializados para su análisis, así como las acciones correctivas necesarias para abordar situaciones de contaminación en diversos contextos. Como resultado de la obtención de conocimiento, se llevó a cabo un estudio, búsqueda y selección de sensores y actuadores de bajo coste y alta confiabilidad que se integrarían en DriftGLY para la recogida, detección y monitoreo de forma automática de la presencia de los herbicidas seleccionados y su efecto en forma de cóctel. Como resultado de este estudio, se incorporaron y calibraron en DriftGLY un conjunto de sensores, incluyendo sensores de partículas en suspensión (PM 1.0, PM 2.5, PM 4.0 y PM 10), sensores VOCs (Volatile Organic Compound), sensores de óxido de nitrógeno (NO_x), sensores de amoníaco (NH₃), sensores de ethanol (C₂H₆O), sensores de hidrógeno, junto con otros sensores complementarios como el dióxido de carbono (CO₂), sensores de temperatura, sensores de humedad relativa, sensores de presencia de lluvia y sensores de dirección del viento. En cuanto a los actuadores, se integraron e implementaron cuatro componentes. El primer actuador fue un semáforo físico con cuatro lámparas de colores: rojo, amarillo, verde y azul. Este semáforo permite visualizar el estado de la contaminación del aire a las personas que se encuentren en las proximidades de DriftGLY, utilizando los colores para comunicar dicho estado. Los tres primeros colores (rojo, amarillo y verde) se asignaron para indicar el estado de contaminación del aire, mientras que el último color (azul) se destinó a señalar que el dispositivo está realizando el proceso de medición y comunicación de datos a la nube. El segundo actuador consiste en un evaporador con un calentador de banda que posibilita la evaporación de las muestras de deriva de gotas de agroquímicos o el agua de lluvia con agroquímicos diluidos. El tercer actuador es un ventilador que facilita la circulación de aire dentro del compartimento de DriftGLY, actuando tanto para la entrada como la salida del aire. El cuarto actuador es un micro servomotor que permite liberar las muestras de aire ya analizado dentro del sistema.

A través de la integración y calibración de los sensores y actuadores mencionados, se logró con éxito el desarrollo del primer prototipo funcional de DriftGLY. Este dispositivo IoT de alerta temprana, bajo coste, autónomo y robusto se diseñó para operar en entornos exteriores, permitiendo el monitoreo continuo y automático de la presencia de agroquímicos en el aire en zonas rurales, periurbanas y urbanas. DriftGLY tiene la capacidad de coleccionar y medir los herbicidas seleccionados tanto de forma individual como en combinación, en sus formas particuladas y en fase gaseosa. Además, en contraste con los sistemas de monitoreo actuales, se ha implementado un sistema de

conversión de fase que posibilita el colectado de muestras en estado líquido, como la deriva de gotas de agroquímicos o agua de lluvia con agroquímicos diluidos, para luego llevar a cabo la medición en estado gaseoso. Esto incluye un colector de muestras líquidas que utiliza un recipiente de aluminio con una capacidad de 1000 cm³ (Fig. 16), junto con un sistema de evaporación basado en un calentador de banda, que convierte la fase líquida en fase gaseosa, permitiendo así la medición de manera similar a los sistemas tradicionales que evalúan contaminantes a través del material particulado y la fase gaseosa, como los sistemas HVS (High Volume Sampler) [93]. El sistema de colectado también cuenta con un recipiente de 50 ml equipado con un filtro para retener las muestras líquidas y facilitar su análisis posterior en laboratorios, siguiendo una configuración semejante a la de los sistemas PAS (Passive Air Samplers) explorados en la revisión del estado del arte de tecnologías destinadas al monitoreo de contaminantes de esta naturaleza [92].

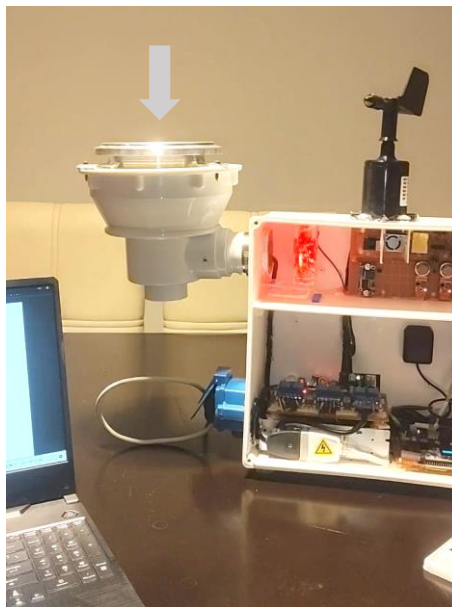


Fig. 16 DriftGLY y su colector de muestras

Desde el punto de vista de la conectividad IoT, DriftGLY proporciona diversas alternativas para su operación en los entornos previamente especificados. Esto incluye capacidades de conexión a redes WiFi, LoRaWAN y GSM/GPRS, lo que permite el monitoreo y diagnóstico de los niveles de contaminación de los agroquímicos en el borde. Estos datos se presentan a través de un semáforo digital y se transmiten a las plataformas digitales diseñadas para su visualización y posterior análisis por parte de las autoridades de control y la población en general. En lo que respecta a la alimentación, la primera versión de DriftGLY funciona a través de la red eléctrica convencional y no incluye baterías internas debido a que el sistema de evaporación tiene un alto consumo energético. DriftGLY fue diseñado principalmente para su implementación en áreas con acceso a la red eléctrica estándar, ya que su función principal es monitorear áreas donde las derivas de agroquímicos tienen un impacto perjudicial.

En términos de arquitectura, se contribuyó con el desarrollo de un ecosistema digital multiplataforma que consta de una aplicación móvil, una plataforma IoT, un MW LoRaWAN y la integración con la red social X, todos diseñados para operar de manera sinérgica con DriftGLY (Fig. 17).

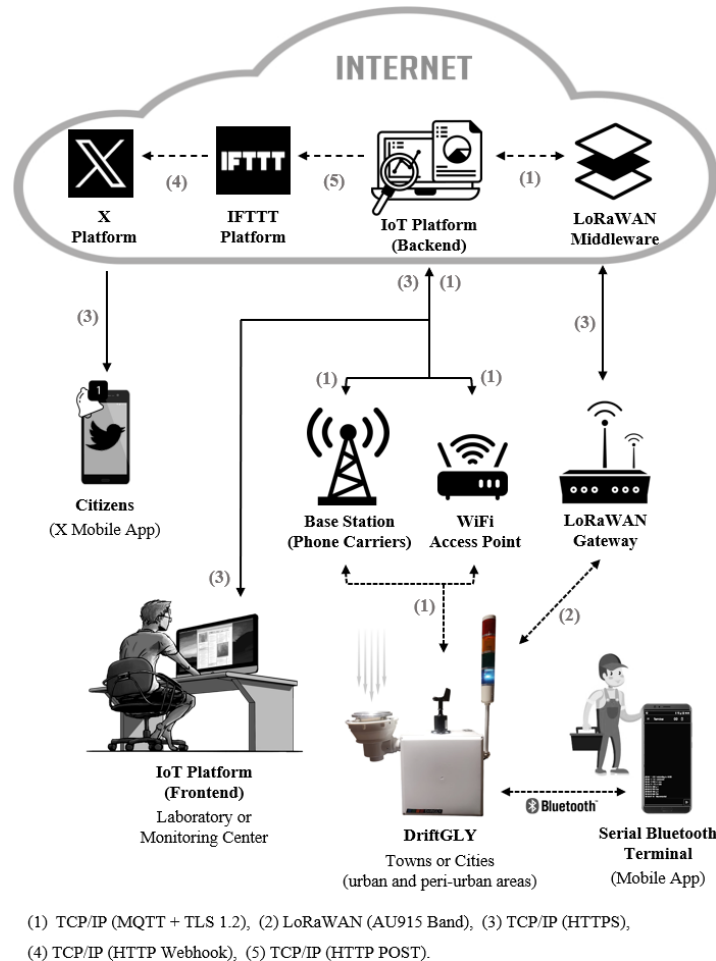


Fig. 17 Ecosistema digital asociado al proyecto DriftGLY

En el proceso inicial de diseño e implementación de la arquitectura, se optó por volver a utilizar la plataforma IoT ThingsBoard previamente empleada en el proyecto SpectroGLY. Esta decisión se tomó con el objetivo de agilizar y acelerar el desarrollo de DriftGLY. Dentro de la plataforma IoT, se llevó a cabo la creación de un nuevo proyecto, lo que implicó la configuración de un nuevo “tenant”. Esta etapa facilitó la configuración e implementación del “backend”, posibilitando así el diseño y desarrollo de un dashboard web, o “frontend”. Una función clave del dashboard es la visualización en tiempo real de los datos de monitoreo de cada dispositivo DriftGLY instalado (Fig. 18). Gracias a esta solución, el usuario también puede acceder a información específica de cada dispositivo instalado: la geolocalización a través de mapas interactivos; la dirección, provincia y país en el que se encuentra el dispositivo; la persona a cargo del sitio (nombre y detalles de contacto); el tipo de lugar donde operará DriftGLY; y el nombre del instalador a cargo. Además de la información contextual, el dashboard web muestra detalles sobre el estado

de monitoreo en cada sitio específico, incluido el estado de contaminación a través de su indicador digital de semáforo y el tipo de agroquímico detectado. El dashboard web también muestra información técnica específica sobre DriftGLY, como el estado de comunicación (tipo de enlace, nivel de señal, entre otros), y datos específicos de DriftGLY (ID del dispositivo y versión del firmware). El dashboard web también proporciona datos adicionales sobre los sensores y actuadores de DriftGLY (metadatos específicos para los especialistas técnicos). La plataforma también incorpora una sección de motor de reglas donde se pueden establecer reglas para notificar a los operadores de la plataforma por correo electrónico tras su activación (por ejemplo, un semáforo rojo, bajo nivel de señal WiFi, entre otros). Toda la información enviada desde DriftGLY persiste en las bases de datos dentro de la plataforma y está disponible para que el usuario realice búsquedas por fecha y hora, asegurando la trazabilidad del sistema.

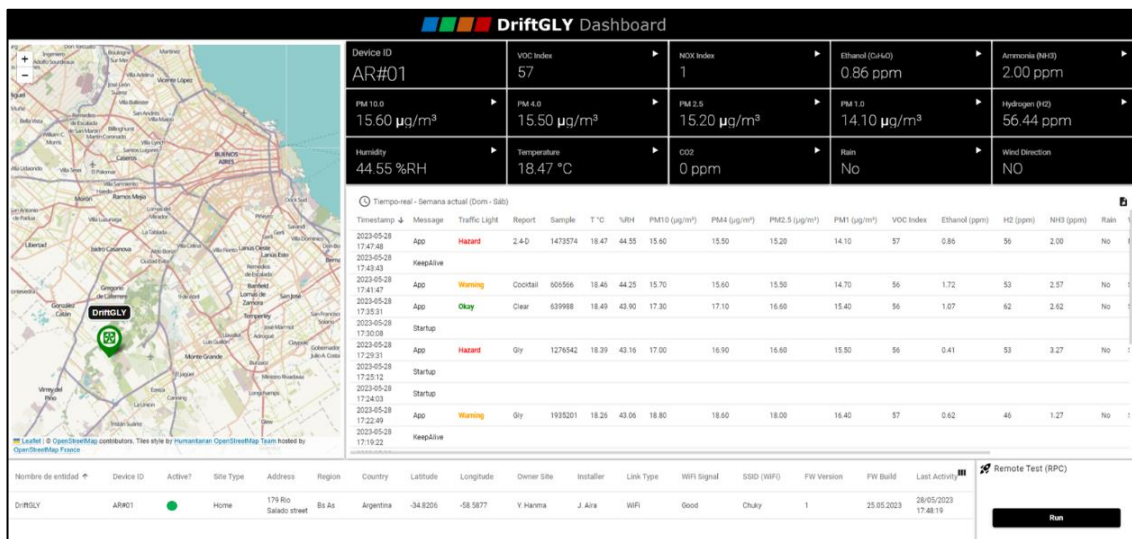


Fig. 18 Dashboard web (frontend) desarrollado para el proyecto DriftGLY

Además, con el objetivo de optimizar y acelerar el desarrollo de DriftGLY, se decidió nuevamente utilizar el MW LoRaWAN TTN junto con el Gateway Dragino LG02 para establecer una red LoRaWAN en la banda australiana (AU915), en cumplimiento de los estándares del ENACOM. La conexión entre el Gateway y TTN se realizó mediante el protocolo HTTPS, y TTN se vinculó a ThingsBoard a través del motor de integraciones de esta plataforma IoT para la integración con sistemas de terceros. Por otro lado, en la arquitectura se incorporó la plataforma IoT con la plataforma IFTTT (If This Then That) [148] para habilitar la integración con la red social X a través del sistema de comunicación Webhooks que opera a través de solicitudes HTTP (Hypertext Transfer Protocol). Esto permitió enviar Tweets desde la cuenta oficial del sistema DriftGLY de forma automatizada, lo que establece un vínculo de comunicación más directo con la ciudadanía (Fig. 19).



Fig. 19 Publicación de DriftGLY en X

La inclusión de una aplicación móvil en la arquitectura permitió la operación bidireccional de DriftGLY por parte de los instaladores, lo que facilitó las pruebas y configuraciones en el dispositivo en cada contexto de monitoreo. Para estas funcionalidades, se seleccionó la aplicación móvil denominada SBT (Serial Bluetooth Terminal) para Android, desarrollada por Kai Morich, de uso gratuito y que cumplió con todos los requerimientos del proyecto [149]. Se llevaron a cabo pruebas sinérgicas que involucraron todos los elementos de la arquitectura, incluido el dispositivo DriftGLY, y evaluaron las opciones de conectividad establecidas para operar en diversos contextos de medición (WiFi, LoRaWAN y GSM/GPRS). Estos componentes se integraron y sincronizaron de manera efectiva con DriftGLY, lo que permitió el análisis de muestras de aire en tiempo real sin importar el contexto de medición. Esto aseguró que los resultados fueran susceptibles de un procesamiento automático, eficiente y de rápida visualización. En resumen, gracias a esta arquitectura, DriftGLY posibilitó a los usuarios del sistema obtener los resultados de sus muestras en tiempo real, evitando la necesidad de transportar las muestras al laboratorio para su análisis, lo que redundará en una optimización de tiempos y costes. Además, la arquitectura permite la emisión de alertas tempranas a las autoridades pertinentes, con el fin de que estas implementen acciones correctivas que prevengan la exposición de las personas en entornos rurales, periurbanos y urbanos al aire contaminado con agroquímicos, evitando así graves problemas de salud tanto para las personas como para el medio ambiente.

Finalmente, en términos metodológicos de la calibración y validación de DriftGLY, se inició con la preparación de un campo de una hectárea, acondicionado como un laboratorio con estrictas normas de seguridad para llevar a cabo el proceso. En este contexto, el proceso de calibración se realizó de la siguiente manera: se prepararon y dispusieron un total de 180 muestras en 15 contenedores con una capacidad de 20 litros, siguiendo las directrices de Caseley et al. y la FAO [150] en relación con el volumen de aplicación y la cantidad de agroquímicos a depositar en el pulverizador utilizado. Estas muestras de calibración se dividieron en tres grupos: 60 para 2,4-D, 60 para glifosato y 60 para el cóctel de ambos herbicidas. Los sensores integrados en DriftGLY (PM 1.0, PM 2.5, PM 4.0, PM 10, COVs, amoníaco, etanol e hidrógeno gaseoso), midieron las 180 muestras. Cada medición se transmitió a la plataforma IoT mediante WiFi y se supervisó manualmente a través de la aplicación móvil SBT. Posteriormente, los metadatos de la plataforma IoT se descargaron en formato CSV (Comma-Separated Values) para el análisis estadístico mediante el software XLSTAT [145]. El modelo de calibración adoptado fue el de Regresión Lineal Múltiple (MLR), un modelo estadístico versátil para evaluar las relaciones entre un resultado continuo y múltiples predictores. A través del software XLSTAT, se desarrollaron tres modelos MLR para 2,4-D, glifosato y el cóctel, los cuales mostraron una precisión destacada en la predicción. Los coeficientes de determinación (Multiple R, R-cuadrado y R-cuadrado ajustado) superaron el 95%, indicando una capacidad predictiva excelente. Los errores estándar fueron bajos (0.27 para 2,4-D, 0.30 para glifosato y 0.34 para el cóctel), demostrando la precisión del modelo y sugiriendo que las predicciones se aproximan a los valores reales. Estos resultados destacan la capacidad predictiva y precisión del modelo MLR para prever la presencia y tasa de dosificación de 2,4-D, glifosato y el cóctel. Por último, se definieron las ecuaciones de regresión para cada agroquímico y el formato de cóctel que fueron integradas en el firmware de DriftGLY, para pasar a validar el funcionamiento del sistema final.

El proceso de validación de DriftGLY se llevó a cabo en el mismo lugar que el proceso de calibración. Las condiciones meteorológicas durante la validación fueron apropiadas y en línea con las recomendadas por las buenas prácticas para la aplicación de agroquímicos (humedad relativa: 73%, temperatura: 19°C, velocidad del viento: 8 km/h). Cada prueba fue transmitida por DriftGLY a la plataforma IoT mediante conectividad WiFi. El proceso de validación se realizó utilizando un total de 27 pruebas, segmentadas en 3 grupos: 9 pruebas para 2,4-D, 9 pruebas para glifosato y 9 pruebas para el cóctel de ambos. En cada uno de los tres grupos definidos, se realizaron tres ensayos sin este herbicida (“Okay”), tres con niveles correspondientes al color amarillo del semáforo (“Warning”) y tres ensayos con niveles correspondientes al color rojo del semáforo (“Hazard”). Como resultado de las pruebas de validación, DriftGLY identificó con éxito las 27 pruebas, asignando correctamente el color del semáforo a cada muestra relacionada con 2,4-D, glifosato y el cóctel, siguiendo los intervalos predefinidos en los procesos de calibración. Durante el proceso de validación del sistema propuesto, también se verificó el correcto funcionamiento de la arquitectura en general. El hardware de DriftGLY midió

de manera autónoma las 27 pruebas con éxito y las transmitió a través de la conectividad WiFi a la plataforma IoT. Esta plataforma, a su vez, mostró todos los diagnósticos de semáforos y datos adicionales en su panel de control web (información de conectividad, telemetría de sensores, estado del actuador y otras variables relevantes). Además, las 17 pruebas que contenían agroquímicos se compartieron en la red social X, demostrando el correcto funcionamiento de las plataformas y las integraciones complementarias. Para validar las mediciones realizadas por DriftGLY, se seleccionaron y recopilieron 7 de las 27 pruebas utilizadas en el proceso de validación para que un laboratorio especializado verificara la presencia o ausencia de agroquímicos en estas muestras [151]. El laboratorio utilizó técnicas analíticas y tecnologías del tipo LC-MS/MS (Liquid Chromatography with Tandem Mass Spectrometry) para la determinación de 2,4-D y LC-ESI-MS/MS (Liquid Chromatography Electrospray Ionization-Tandem Mass Spectrometry) para la determinación de glifosato en cada muestra. En conclusión, los 7 tests previamente identificados por DriftGLY fueron comparados con las evaluaciones de laboratorio. Se confirmó que todas las determinaciones realizadas por DriftGLY fueron precisas y correctas. Además, el laboratorio verificó que las muestras que contenían agroquímicos mostraban concentraciones significativamente altas de estos contaminantes [152].

Otro aspecto importante para destacar de DriftGLY, más allá de confirmar la presencia de estos contaminantes en el sitio de medición, es que el sistema proporciona información sobre sus orígenes, algo que los sistemas actuales no hacen. DriftGLY, además de determinar si alguien ha excedido la tasa de dosificación de agroquímicos, también puede identificar fuentes de contaminación a través de la dirección del viento y proporcionar datos sobre posibles violaciones de las condiciones meteorológicas apropiadas para la aplicación de agroquímicos al medir la temperatura y la humedad. Esto permite que las autoridades tomen medidas correctivas y preventivas efectivas contra posibles infractores. Los resultados presentados respaldan la viabilidad de DriftGLY como un sistema de alerta temprana para el monitoreo continuo y automatizado de la presencia de agroquímicos en el aire. Este sistema puede funcionar en conjunto con los sistemas existentes, facilitando a las autoridades el control de la contaminación originada en el contexto agroindustrial y su impacto en áreas urbanas, periurbanas y rurales.

3.3 Sobre los resultados obtenidos del objetivo 3 (MosquitoT)

Para alcanzar este objetivo, se inició la investigación con un estudio exhaustivo del estado actual en relación con el problema de los mosquitos en áreas rurales, urbanas y periurbanas, y su impacto en la salud pública. Se llevó a cabo un análisis técnico minucioso de los métodos y herramientas utilizados actualmente en las campañas de monitoreo entomológico, con un enfoque particular en la detección y cuantificación de los huevos depositados por el mosquito *Aedes aegypti* (Fig. 20, izquierda). El propósito de este análisis fue comprender el comportamiento de este mosquito y, en consecuencia, comprender las acciones de monitoreo llevadas a cabo por las autoridades de control,

incluyendo sus horarios y estrategias de erradicación. A continuación, se realizó una revisión exhaustiva del estado del arte sobre el método de las ovitrampas tradicionales (Fig. 20, derecha), utilizado desde hace décadas en las campañas de vigilancia entomológica planificadas y ejecutadas por agencias gubernamentales para detectar y cuantificar los huevos de *Aedes aegypti*. También se evaluó la posibilidad de adaptar y digitalizar este método tradicional mediante sensores capaces de detectar y contar los huevos de *Aedes aegypti* en las ovitrampas.

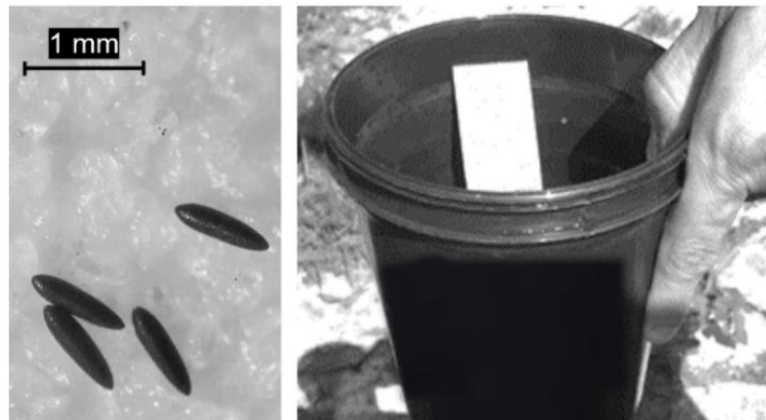


Fig. 20 Izquierda: huevos de *Aedes aegypti*. Derecha: ovitrapa tradicional

Posteriormente, se investigaron los sistemas tecnológicos actualmente empleados para la detección y seguimiento de la actividad de oviposición realizada por hembras de *Aedes aegypti*, incluyendo los métodos analíticos y tipos de sensores utilizados en dichos sistemas [153]-[161]. Se pudo verificar que los actuales sistemas tecnológicos para detectar y monitorear la actividad de insectos son costosas, complejas y poco escalables [17], [18], [20], [21], [28], [38], [42], [44]. Luego, se llevó a cabo la investigación, selección y evaluación de sensores de bajo coste y alta confiabilidad para la incorporación en el sistema MosquIoT. El sensor principal seleccionado para este propósito fue una cámara equipada con tecnología de visión por computadora [162], con capacidad para integrar redes neuronales, respaldada por la tecnología TinyML. En referencia a TinyML, resulta fundamental destacar que su adopción se justifica por los avances recientes en la arquitectura de MCUs (Microcontroller Unit) y el diseño de algoritmos, que han posibilitado la ejecución de tareas de aprendizaje automático sofisticadas incluso en MCUs de dimensiones reducidas y de acotadas capacidades de cómputo [116], [117], [118], [119]. El aprendizaje automático integrado, comúnmente denominado TinyML, constituye un campo del ML (Machine Learning) que se aplica específicamente a sistemas empotrados de bajo consumo de energía, con el propósito de llevar a cabo tareas automatizadas de alta complejidad, en plena concordancia con los objetivos que fueron establecidos para MosquIoT. La cámara se configuró en HD (High-definition) de 1280×720 píxeles, y para los propósitos específicos de este estudio, se estableció una subresolución de 512×512 píxeles. Además, se incorporó un teleobjetivo de 12 mm (apertura F2.0 y formato 1/3") para garantizar una mayor precisión en la detección y conteo de los huevos de *Aedes aegypti*. De manera complementaria, también

se incluyó un conjunto de sensores complementarios para garantizar el correcto funcionamiento del sistema en general: un sensor de temperatura y humedad ambiental, un sensor de intensidad lumínica dentro del recipiente, un acelerómetro que permite advertir sobre la posibilidad de que el recipiente se vuelque y un sensor de nivel de agua para detectar la presencia de agua dentro del recipiente (sin agua, las hembras no pondrán sus huevos).

Para habilitar la detección y cuantificación de huevos de *Aedes aegypti* en MosquIoT, se llevó a cabo un proceso de diseño, desarrollo e implementación de un modelo TinyML en el sistema. En este contexto, para los propósitos de esta investigación, se optó por emplear la plataforma de ML de código abierto denominada Edge Impulse [163]-[167], basada en TensorFlow Lite [168], [169], [170], que permite la ejecución de modelos personalizados de segmentación y clasificación de imágenes en dispositivos IoT. En particular, se utilizó la arquitectura personalizada de aprendizaje profundo denominada FOMO (Faster Objects More Objects) [171], [172], [173], la cual es aplicable a soluciones TinyML. Esta arquitectura se destacó por su capacidad para detectar objetos en dispositivos con recursos computacionales limitados, logrando un equilibrio adecuado entre precisión, velocidad y consumo de memoria, lo que permitió reducir significativamente el tamaño de los modelos de aprendizaje. La salida de FOMO puede ajustarse según las necesidades de la aplicación, y tiene la capacidad de detectar múltiples instancias de objetos en una sola imagen. FOMO se basa en la adaptación de MobileNetV2 [174], una red neuronal de tipo convolucional (CNN, o Convolutional Neural Network), desarrollada por Google [168] y lanzada como parte de la biblioteca TensorFlow Lite para la clasificación de imágenes.

En la construcción del algoritmo de ML, se llevaron a cabo cuatro etapas clave: entrada, procesamiento, aprendizaje y despliegue. La etapa de entrada implicó definir los datos utilizados para el entrenamiento del modelo, que en este caso consistieron en imágenes de depósitos de huevos de *Aedes aegypti*. El bloque de procesamiento se basó en un sistema de extracción de características respaldado por DSP (Digital Signal Processor) que estandariza las imágenes y las convierte en valores flotantes normalizados entre 0 y 1. A continuación, se configuró e implementó el modelo de aprendizaje profundo FOMO, el cual permitió la generación de información sobre los huevos de *Aedes aegypti*, incluyendo su cantidad y ubicación en el plano de las imágenes. El bloque de aprendizaje se ajustó para requerir un nivel de confianza mínimo del 0.80 para identificar la presencia de huevos de *Aedes aegypti* en los depresores linguales. Finalmente, una vez construido el algoritmo de aprendizaje, se procedió a su implementación dentro de MosquIoT. Como resultado de este trabajo, se logró diseñar y desarrollar el primer prototipo de laboratorio de MosquIoT (Fig. 21). Este dispositivo se basa en las ovitrampas tradicionales, pero se potencia con tecnologías IoT, TinyML y CNN. Su objetivo fundamental es la digitalización y automatización de la detección y el conteo de huevos depositados por el mosquito *Aedes aegypti* en los depresores linguales. La principal ventaja de MosquIoT con respecto a las ovitrampas tradicionales radica en

su capacidad para llevar a cabo una vigilancia automática y continua, con una alta frecuencia de muestreo, que puede ser de una o varias veces al día.



Fig. 21 Izquierda: Prototipo de MosquIoT en proceso de desarrollo. Derecha: Prototipo de MosquIoT finalizado (versión laboratorio)

En términos de conectividad IoT, MosquIoT admite varias opciones para operar en los contextos mencionados, incluyendo WiFi y LoRaWAN; lo que permite la transmisión de mediciones y metadatos recopilados en cada punto de monitoreo a una plataforma en la nube, donde estarán disponibles para su visualización y posterior análisis por parte de las autoridades de control. En términos de arquitectura, se ha contribuido significativamente al diseñar, desarrollar y poner en funcionamiento un ecosistema digital multiplataforma que incluye una aplicación móvil, una plataforma IoT y un Middleware LoRaWAN, todos diseñados para operar de manera sinérgica con MosquIoT (Fig. 22). En cuanto a la plataforma IoT, se optó por utilizar ThingsBoard, previamente empleada en los proyectos SpectroGLY y DriftGLY, con el objetivo de agilizar el desarrollo de MosquIoT. Siguiendo el mismo proceso, se creó un nuevo proyecto dentro de la plataforma IoT, lo que conllevó a la configuración de un nuevo “tenant”. Esta fase facilitó la configuración e implementación del “backend”, permitiendo así el diseño y desarrollo de un dashboard web, o “frontend” (Fig. 23). Este dashboard posibilita la visualización en tiempo real de la vigilancia de cada dispositivo MosquIoT instalado, ya sea transmitiendo desde una red WiFi o LoRaWAN.

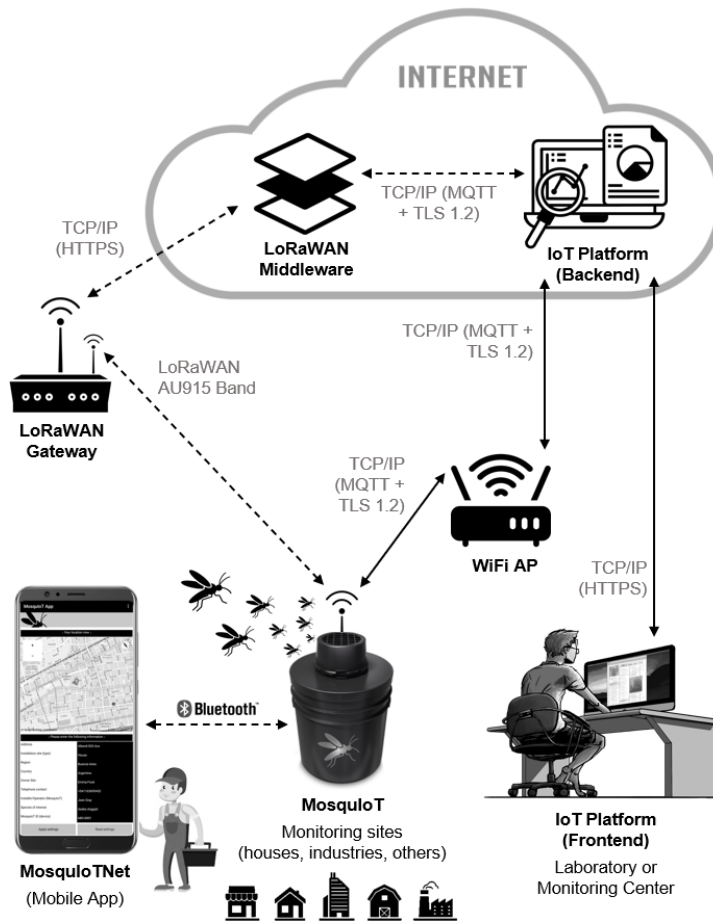


Fig. 22 Ecosistema digital asociado al proyecto MosquitoIoT

A través del dashboard web el usuario puede acceder a información específica de cada dispositivo instalado: la geolocalización de MosquitoT a través de mapas interactivos, la dirección, provincia y país en el que se encuentra el dispositivo, la persona a cargo del sitio, el tipo de lugar donde MosquitoT está operando y el nombre del instalador a cargo. Además de la información contextual, el dashboard web muestra detalles sobre el estado de vigilancia en cada sitio específico, detallando las especies y la cantidad de huevos de mosquito leídos en la última comunicación con la plataforma. El dashboard web también muestra información técnica específica sobre MosquitoT, como información sobre el estado de las comunicaciones (tipo de enlace de comunicación, nivel de señal y tipos de eventos enviados) y datos específicos de MosquitoT (ID del dispositivo y versión del firmware). También proporciona datos complementarios sobre el sensor principal de lectura de huevos (cámara): nombre del sensor, versión de hardware, versión del firmware, versión de HAL (Hardware Abstraction Layer) y detalles específicos de configuración de la cámara (versión del sistema operativo, tamaño de fotograma y formato de píxeles).

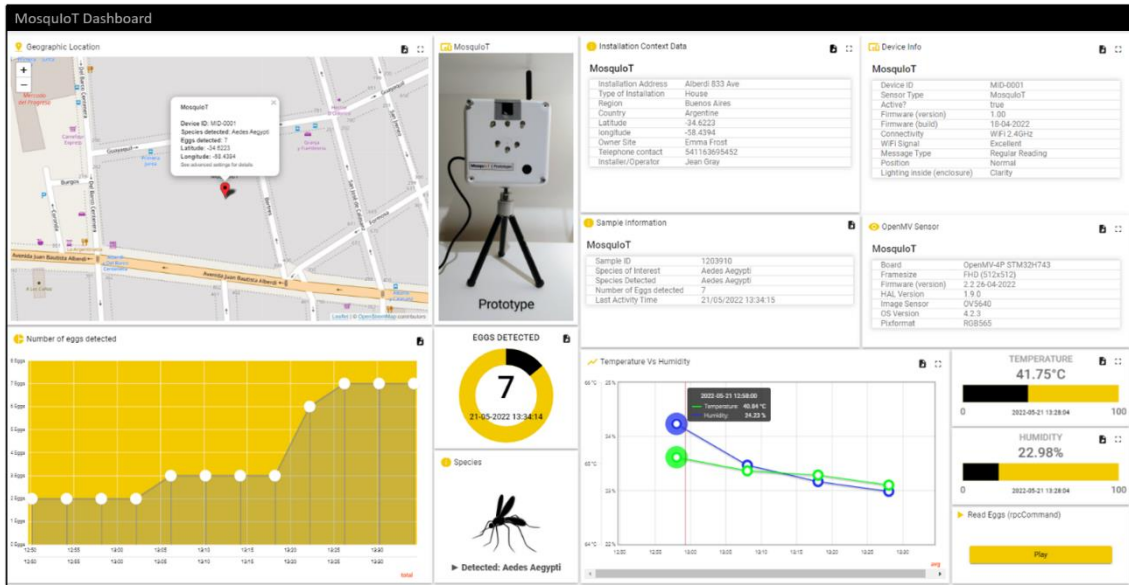


Fig. 23 Dashboard web (frontend) desarrollado para el proyecto MosquitoT

Además, la plataforma también muestra detalles sobre la temperatura y humedad transmitidos por MosquitoT. Se definieron reglas predeterminadas en la plataforma para estas cantidades físicas, estableciendo umbrales máximos y mínimos. Según estos umbrales, se envían notificaciones por correo electrónico o alertas cuando estas cantidades infringen las reglas. Esta funcionalidad busca maximizar el éxito de la lectura de huevos en el sitio y proporcionar a la plataforma datos básicos para entrenar módulos de aprendizaje automático para que los usuarios puedan comprender mejor estos vectores en los sitios de vigilancia específicos. Además, como se explicó en secciones anteriores, MosquitoT cuenta con un acelerómetro para señalar la posición del dispositivo y notificar a la plataforma al detectar la inclinación permanente del dispositivo. La plataforma muestra información sobre la posición de MosquitoT y es capaz de crear una regla para activar y enviar una alerta por correo electrónico a la persona a cargo del sitio al recibir un evento de inclinación. Al recibir un evento de esta naturaleza, se entiende que MosquitoT se inclinó, que el agua dentro de él se derramó y, en consecuencia, que las muestras contenidas en el dispositivo ya no serán útiles para la vigilancia entomológica. En este sentido, la persona a cargo del sitio deberá tomar acciones correctivas in situ. Finalmente, el dashboard web también muestra el estado del nivel de agua dentro de MosquitoT (un dato vital para que *Aedes aegypti* deposite huevos). Toda la información enviada desde MosquitoT persiste en las bases de datos dentro de la plataforma IoT y está disponible para que el usuario realice búsquedas por fecha y hora, asegurando la trazabilidad del sistema respectivo.

Además, con el propósito de optimizar y agilizar el desarrollo de MosquitoT, se optó por seguir la exitosa estrategia utilizada en los proyectos anteriores (SpectroGLY y DriftGLY), en emplear nuevamente el Middleware LoRaWAN TTN junto con el Gateway Dragino LG02 para establecer una red LoRaWAN en la banda australiana

(AU915). La conexión entre el Gateway y TTN se llevó a cabo mediante el protocolo HTTPS. Asimismo, TTN se enlazó a ThingsBoard a través del motor de integraciones de esta plataforma IoT para integrarse con sistemas de terceros, reutilizando las configuraciones previamente realizadas en los proyectos anteriores.

Para completar la arquitectura del sistema MosquitoT, se desarrolló una aplicación móvil, llamada “MosquitoTNet” para dispositivos Android que permite realizar pruebas y configuraciones con MosquitoT antes de su instalación (Fig. 24). MosquitoTNet se desarrolló utilizando la herramienta MIT App Inventor. Con el propósito de validar la funcionalidad de los componentes integrados en la arquitectura, se llevaron a cabo pruebas sinérgicas que abarcaron todos los elementos, incluyendo el dispositivo MosquitoT. Estas pruebas también evaluaron las opciones de conectividad WiFi y LoRaWAN, lo que permite a MosquitoT operar en diversos contextos y llevar a cabo con éxito la captura de la actividad de oviposición de las hembras del mosquito *Aedes aegypti*, sin importar si el entorno de medición es rural, periurbano o urbano.

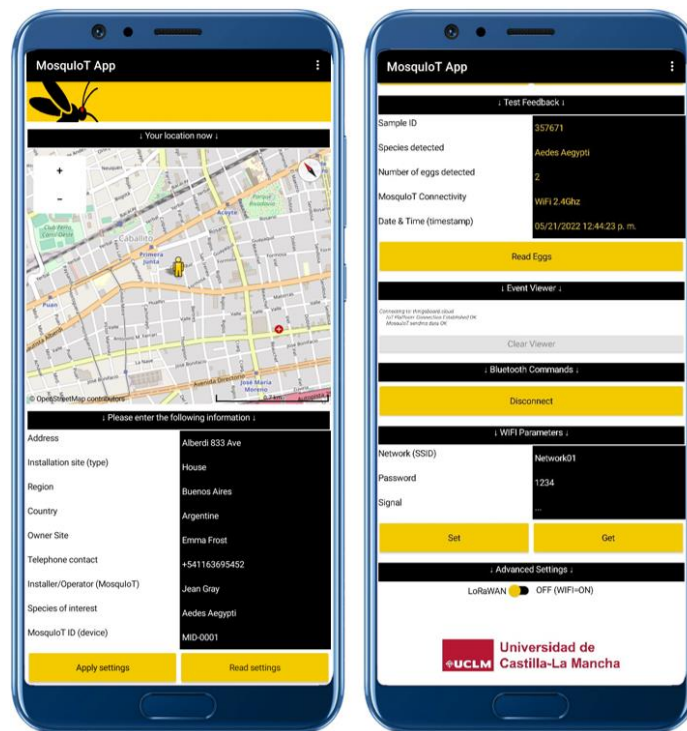


Fig. 24 MosquitoTNet, aplicación móvil desarrollada para MosquitoT

En términos generales, esta arquitectura garantiza que los resultados obtenidos sean susceptibles de un procesamiento eficiente, de fácil accesibilidad y de rápida visualización. Se tuvieron en cuenta todos los servicios digitales esenciales que podrían ser necesarios para las autoridades de control, con el objetivo de ofrecer una experiencia de usuario excepcional, profesional y amigable al interactuar con el sistema propuesto. Además, la arquitectura posibilita a los usuarios del sistema acceder a los resultados de los sitios de monitoreo prácticamente en tiempo real, eliminando la necesidad de trasladar las muestras al laboratorio para su análisis, lo que conlleva a una optimización de tiempos

y costes. En resumen, esta arquitectura facilita la emisión de alertas tempranas a las autoridades pertinentes y la creación de mapas de riesgo dinámicos. Esto proporciona a dichas autoridades una herramienta de vigilancia correctiva y preventiva que les permite abordar con eficiencia los problemas de salud pública ocasionados por este insecto de manera más efectiva y proactiva.

Finalmente, desde una perspectiva metodológica relacionada con el entrenamiento y validación de MosquIoT, se inició adquiriendo una cantidad sustancial de depresores linguales con huevos de *Aedes aegypti* obtenidos a través de ovitrampas reales, recopilados durante una campaña entomológica dirigida por especialistas en campo. En este sentido, y para que esto fuera posible, se contó con la importante colaboración del Dr. Darío Vezzani, un reconocido investigador, Ph.D. (Doctor of Philosophy) en Ciencias Biológicas, con especialización en ecología y control de mosquitos [175]. En concordancia con el diseño, desarrollo y calibración de MosquIoT, se ejecutó un plan de entrenamiento que involucró la aplicación de modelos de TinyML y CNN con el propósito de asegurar la funcionalidad precisa del dispositivo mediante la utilización de un conjunto de muestras reales recolectadas durante la mencionada campaña entomológica. Este conjunto de muestras consistió en 90 depresores linguales, cada uno contenía 715 huevos reales de *Aedes aegypti* (Fig. 25).

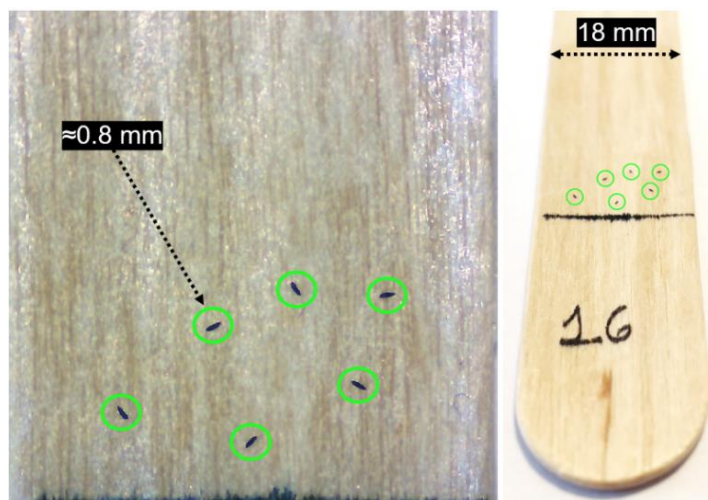


Fig. 25 Depresor lingual N°16 utilizado para el proceso de entrenamiento

Después del proceso de entrenamiento, el modelo se integró en el firmware de MosquIoT y se sometió a una etapa de validación, que incluyó un conjunto de muestras compuesto por 10 depresores linguales, cada uno con 67 huevos. Como parte de este proceso de validación, llevado a cabo en un entorno de laboratorio, se introdujeron deliberadamente objetos de diversos tamaños, colores y texturas, como semillas, tierra, piedras y granos, en los depresores linguales (Fig. 26). Esta estrategia tenía como finalidad evaluar la capacidad de MosquIoT para identificar y contar específicamente los huevos de *Aedes aegypti* en presencia de elementos de distracción, poniendo así a prueba la robustez del modelo. La cantidad de huevos en los depresores linguales se cuantificó

manualmente utilizando la misma metodología empleada por los laboratorios especializados y expertos en la materia, que implica el uso de microscopios de laboratorio (en este caso se utilizó un microscopio Galileo modelo TMPZ-C1200). Los resultados de este proceso de validación demostraron una precisión de clasificación superior al 80%.

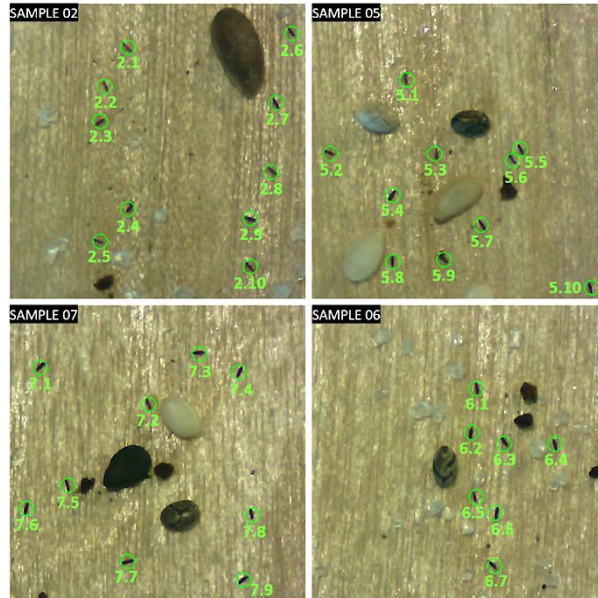


Fig. 26 Muestras utilizadas para validar el modelo entrenado

Para fortalecer aún más la evidencia de su funcionamiento correcto, se realizó una PoC durante 28 días, lo que equivalió a 672 horas de operación continua de MosquitoT. En este escenario, se instaló un depresor lingual diariamente, cada uno con un número variable de huevos de *Aedes aegypti* reales, con el fin de simular diversas situaciones de campo. Los resultados obtenidos de la PoC fueron muy prometedores ya que la precisión de clasificación de MosquitoT fue aproximadamente 97,67%, logrando identificar y contar 126 de los 129 huevos que se contaron manualmente con el microscopio Galileo (Fig. 27).

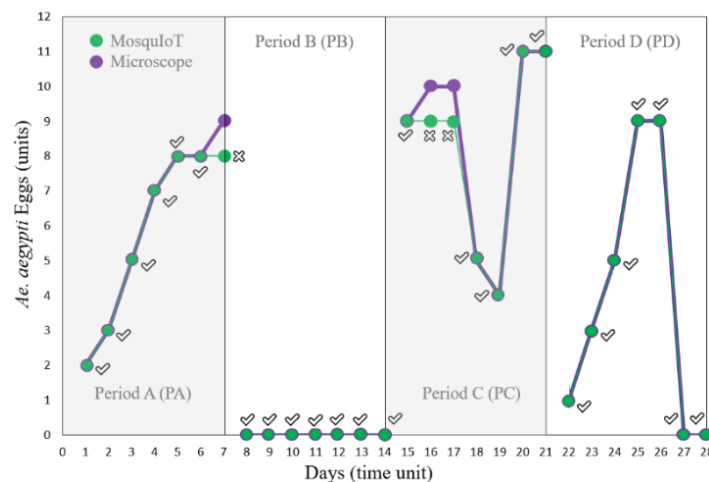


Fig. 27 Resultados de la PoC realizado durante 28 días seguidos





4 Conclusiones y perspectiva futura

En el último capítulo de esta tesis doctoral, se resumen las conclusiones obtenidas y se delimitan las perspectivas para futuras investigaciones. Se efectúa una síntesis de los logros obtenidos en el transcurso de esta investigación, describiendo en detalle las conclusiones derivadas de los desarrollos que condujeron al cumplimiento del objetivo principal, los objetivos parciales o secundarios, y sus sub-objetivos, así como a la resolución de las cuestiones de investigación (CIs) planteadas. Este capítulo no solo concluye con el análisis de los conocimientos obtenidos y sus conclusiones, sino que también establece los fundamentos para futuros avances en el campo de estudio, sirviendo como punto de partida para investigaciones subsiguientes.



4.1 Conclusiones

La presente tesis doctoral se sumergió en el análisis de tres desafíos medioambientales de relevancia, estrechamente entrelazados debido a la influencia de la contaminación causada por agroquímicos en el ámbito agroindustrial, centrándose específicamente en los dominios del agua y el aire, y como resultado de la contaminación en estos ámbitos (y otros factores, tales como la deforestación, eliminación de depredadores, entre otros), la proliferación de mosquitos *Aedes aegypti* [49]-[54], [83]-[85]. En conjunto, estos problemas contribuyen a la propagación de diferentes enfermedades humanas, teniendo consecuencias significativas en la flora, fauna, biodiversidad y el equilibrio ecológico en general. En este contexto, esta tesis doctoral logró su objetivo central al abordar los desafíos planteados con tres desarrollos tecnológicos publicados en revistas científicas. Estos desarrollos han cumplido el propósito fundamental de proporcionar soluciones tecnológicas integrales que pueden mejorar la situación actual de las poblaciones humanas y de los ecosistemas afectados por la contaminación de agroquímicos. Asimismo, se confirma que los sub-objetivos establecidos en la sección 1.2 se han alcanzado, dando respuesta a todas las cuestiones de investigación planteadas. A continuación, se presentarán las conclusiones derivadas de cada proyecto realizado, comenzando con SpectroGLY, seguido de DriftGLY y finalizando con MosquitoIoT.

Como conclusión, se ha concebido, desarrollado, calibrado y verificado el funcionamiento de SpectroGLY, un dispositivo portátil de bajo coste con tecnología IoT (Fig. 28). En un escenario de producción en serie, el coste de SpectroGLY se estima en aproximadamente USD 200 (United States Dollar), lo que representa una opción notablemente más asequible en comparación con un espectrómetro de laboratorio básico, que tiene un precio cercano a los USD 2500, siendo aproximadamente diez veces más costoso que SpectroGLY. Este se basa en la espectrometría VIS-NIR y su diseño compacto, y múltiples opciones de alimentación, permiten su uso tanto en entornos de laboratorio como en el campo. Esta versatilidad se ha logrado gracias a la incorporación de tecnología IoT. Junto con el hardware desarrollado a medida, el dispositivo incorpora conectividad IoT integrada (WiFi y LoRaWAN), una aplicación móvil, un MW LoRaWAN y una plataforma IoT, lo que brinda a los usuarios un completo ecosistema digital. A través de esta última plataforma, los usuarios pueden acceder a los resultados y estadísticas de las mediciones realizadas desde sus dispositivos móviles u ordenadores de escritorio o portátiles. SpectroGLY reduce significativamente el tiempo necesario para obtener los resultados de los análisis de muestras, con la ventaja de evitar la obligación de remitir las muestras a un laboratorio para su evaluación. Esto optimiza la eficiencia del proceso en términos de tiempo y costes, y habilita la emisión de alertas tempranas a las autoridades pertinentes. Estas alertas posibilitan la implementación de medidas correctivas destinadas a prevenir la exposición de las personas al agua contaminada con glifosato, lo que contribuye a la prevención de intoxicaciones y a la preservación del entorno ambiental.



Fig. 28 SpectroGLY con una muestra que contiene residuos de glifosato

En cuanto a DriftGLY, se ha sido diseñado, desarrollado, calibrado y se ha confirmado su funcionamiento adecuado. DriftGLY se destaca como un sistema de alerta temprana de bajo coste que utiliza un semáforo digital para monitorear continua y automáticamente la presencia de agroquímicos en el aire, tanto individualmente como en formato de cóctel. La principal contribución de DriftGLY radica en un espacio donde actualmente faltan dispositivos de alerta temprana para detectar y comunicar la presencia de agroquímicos en el aire. DriftGLY puede detectar agroquímicos en sus formas particuladas y gaseosas. Además, incorpora un sistema original de conversión de fases que permite la recolección de muestras líquidas, para su posterior envío a laboratorios especializados para el análisis de parámetros más complejos. En términos prácticos, y para acotar el importante espectro de productos agroquímicos, este trabajo se enfocó en dos de los herbicidas más utilizados en la agroindustria, el 2,4-D y el glifosato, tanto en su forma individual como en combinación (cóctel). El primer prototipo de laboratorio de DriftGLY, presentado en este estudio (Fig. 29), superó con éxito las pruebas empíricas y comparaciones con los resultados obtenidos en un laboratorio especializado.

El coste de del primer prototipo de DriftGLY (hardware) fue de USD 450, en una producción en serie se estima que será mucho menor, lo que representa una opción considerablemente más asequible en comparación con los sistemas tecnológicos actuales, que a menudo alcanzan cifras de miles de dólares y, en muchos casos, son analógicos, parcialmente digitales, o simplemente no son especializados en detectar este tipo de contaminantes. DriftGLY ha demostrado excelentes resultados proporcionando niveles de riesgo de contaminación mediante un sistema de semáforo digital y transmitiendo esta información a una plataforma IoT destinada al consumo de las autoridades de control. Además, publica estos datos en la red social X para democratizar el acceso a la información y fomentar los cambios necesarios para garantizar entornos saludables y equilibrados para ciudadanos y seres vivos de este planeta.



Fig. 29 Prototipo de DriftGLY en proceso de ensayos de laboratorio

En cuanto a MosquIoT, el primer prototipo de laboratorio ha sido diseñado y desarrollado con éxito, y sometiéndose a rigurosos ensayos que confirman su funcionamiento eficiente. Es esencial destacar que este primer prototipo de laboratorio se creó con el objetivo principal de demostrar de manera empírica la funcionalidad correcta del método de detección y conteo de huevos de *Aedes aegypti* en un entorno controlado, como un laboratorio (Fig. 30). Cabe mencionar que el prototipo del hardware de MosquIoT utilizado en este estudio no incorporó elementos como el recipiente negro y otros componentes adicionales necesarios para operar en ambientes externos, los cuales formarán parte de futuros trabajos que se detallarán en la sección 4.2 (perspectiva futura). Fundamentalmente, MosquIoT se configura como una fusión de tecnologías que abarcan IoT, TinyML y CNN, con la finalidad de automatizar y digitalizar el procedimiento de detección y recuento de huevos depositados por el mosquito *Aedes aegypti*, reconocido como vector de enfermedades. A través de las pruebas de validación, se ha demostrado que MosquIoT es una herramienta valiosa para las autoridades, ya que proporciona información en tiempo real sobre las poblaciones de mosquitos y contribuye a la prevención de enfermedades transmitidas por estos insectos. Una de las ventajas fundamentales de MosquIoT en comparación con las ovitrampas tradicionales es su capacidad para llevar a cabo un monitoreo automatizado y continuo, adaptándose a las

necesidades de las campañas de seguimiento entomológico. En contraste, las ovitrampas tradicionales requieren la lectura manual de huevos a través de un microscopio de laboratorio una semana después de la instalación, lo cual es menos efectivo y más reactivo en comparación con el enfoque proactivo y automatizado de MosquitoIoT.



Fig. 30 Primer prototipo de laboratorio de MosquitoIoT realizando lecturas

En términos de arquitectura, se ha implementado un ecosistema digital multiplataforma que incluye una aplicación móvil, una plataforma IoT y un MW LoRaWAN, diseñados para operar de manera sinérgica con MosquitoIoT. Esto permitiría llevar a cabo campañas de monitoreo entomológico del *Aedes aegypti* en formato digital y la posibilidad de crear mapas de riesgo en tiempo real, superando las limitaciones de las ovitrampas tradicionales, que requieren un proceso manual propenso a errores. El primer prototipo de laboratorio MosquitoIoT ha demostrado su eficacia tanto en la lectura y conteo de huevos como en la transmisión de datos a través de la plataforma IoT. Se han integrado múltiples opciones de conectividad IoT, como WiFi y LoRaWAN. Además, se ha desarrollado la aplicación móvil MosquitoTNet para facilitar la instalación, configuración y diagnóstico funcional en diversos lugares de monitoreo. En conjunto, MosquitoIoT se presenta como una solución innovadora con el propósito de comprender de manera dinámica el comportamiento de las poblaciones de *Aedes aegypti* en entornos urbanos, periurbanos y rurales, marcando un camino hacia un enfoque digital proactivo y predictivo en el seguimiento entomológico, superando así las limitaciones de las ovitrampas tradicionales.

4.2 Perspectiva futura

Como se ha expuesto en esta tesis doctoral, los proyectos SpectroGLY, DriftGLY y MosquIoT representan un enfoque integral destinado a abordar los desafíos ambientales relacionados con la contaminación de agroquímicos en entornos agroindustriales y su impacto en las “Smart Cities”. Estas contribuciones se erigen como una iniciativa unificada para generar mejoras sustanciales para la salud de las poblaciones afectadas y para los ecosistemas en cuestión. Estas iniciativas conjuntas constituyen un avance significativo hacia la gestión proactiva de los riesgos ambientales y la promoción de la salud pública en áreas urbanas, periurbanas y rurales impactadas por la presencia de agroquímicos. En este contexto, las perspectivas futuras de los proyectos SpectroGLY, DriftGLY y MosquIoT son de gran relevancia, ya que reflejan una constante evolución tecnológica con el fin de mejorar su eficiencia y eficacia en diversos contextos de aplicación. A continuación, se detallarán las perspectivas futuras de cada proyecto, incluyendo tanto las que se han presentado en las contribuciones científicas en revistas especializadas como las que se han incorporado posteriormente.

En lo que respecta a la perspectiva futura del proyecto SpectroGLY, se plantean cinco iniciativas. En la primera se proyecta que la tecnología desarrollada pueda evolucionar hacia un dispositivo completamente autónomo capaz de realizar la toma automática de muestras de agua en entornos como ríos, lagos u otros lugares estratégicos, sin requerir intervención humana. Esta versión avanzada de SpectroGLY estará equipada con una bomba de agua de pequeño tamaño que permitirá la extracción de muestras líquidas. Estas muestras se someterán a un preprocesamiento mediante la inyección de alícuotas de los activadores, que incluyen el reactivo cromogénico y el catalizador. Posteriormente, el dispositivo analizará las muestras en el borde para detectar la presencia del herbicida glifosato y, a continuación, transmitirá los resultados a la plataforma IoT a través de la conectividad disponible en el entorno de monitoreo. La segunda iniciativa busca realizar una investigación científica adicional para habilitar a SpectroGLY a integrar la detección del contenido de clorofila en fuentes de agua. La clorofila, indicadora de la presencia de organismos fotosintéticos, puede ser evaluada mediante la absorción en el rango de 600-700 nm, que coincide con el espectro del sensor VIS-NIR integrado en SpectroGLY (410-940 nm). La presencia de clorofila en el agua puede tener varias consecuencias, una de las más importantes es la eutrofización. La eutrofización, indicada por niveles elevados de clorofila, surge debido al exceso de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, en el agua. Este desequilibrio desencadena un crecimiento descontrolado de algas, comprometiendo la calidad del agua y dando lugar a floraciones tóxicas que alteran el equilibrio ecológico. Una de las causas fundamentales de la eutrofización es la escorrentía agrícola, que transporta el exceso de nitrógeno y fósforo provenientes de fertilizantes y agroquímicos. La deforestación también contribuye al fenómeno al provocar la erosión del suelo, liberando más nutrientes hacia los cuerpos de agua. En este contexto, la nueva investigación científica se enfocará en la integración de la detección

de clorofila en SpectroGLY, buscando preservar la salud del ecosistema acuático y salvaguardar la salud humana y los recursos económicos asociados con el agua. La tercera iniciativa proyecta realizar algunas mejoras en el hardware de SpectroGLY. En este sentido, los objetivos serán extender la autonomía de las baterías actuales de SpectroGLY y se prevé incluir un circuito de carga mediante energía solar. Además, se realizará la incorporación de un semáforo físico en el dispositivo (similar al de DriftGLY), lo que permitirá a las personas que transiten por el área de monitoreo visualizar el estado de la contaminación del agua de manera sencilla. En la cuarta iniciativa se visualiza la integración de la plataforma IoT con la red social X, con el fin de establecer un vínculo más estrecho con la ciudadanía en caso de eventos de contaminación del agua causada por agroquímicos. Finalmente, en la quinta iniciativa se implementará un microservicio conectado a la base de datos de la plataforma IoT mediante una REST (Representational State Transfer) API, que permitirá poner a disposición pública el historial de todos los datos obtenidos de las mediciones realizadas.

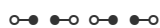
En cuanto a la perspectiva futura del proyecto DriftGLY, también se contemplan cinco iniciativas. La primera se centra en la realización de una PoC que involucrará 10 dispositivos DriftGLY en una localidad de las provincias argentinas de Santa Fe o Entre Ríos. Estas regiones presentan altos niveles de contaminación por agroquímicos y tasas significativas de incidencia de cáncer atribuidas a la exposición a estos productos químicos [176], [177]. El objetivo principal de la PoC es la implementación estratégica del sistema en dichas ciudades, lo que permitirá llevar a cabo una campaña de monitoreo continua durante un período de seis meses en entornos de aplicación real. El propósito de esta prueba es verificar si el sistema propuesto, además de cumplir con su función principal, puede adaptarse exitosamente a diversos estándares de red según la cobertura disponible. En relación con la segunda iniciativa, dado que una de las limitaciones del sistema actual es su necesidad de estar conectado a una red eléctrica convencional, sería muy recomendable modificar el diseño del sistema de energía para permitir la conexión a una fuente de energía renovable, como paneles solares o un pequeño aerogenerador. Además, debería estar equipado con un sistema de baterías de respaldo para evitar cortes de energía durante los periodos en los que estas fuentes renovables no suministran electricidad. La tercera iniciativa implica superar una limitación que requiere la integración de otros tipos de agroquímicos en el ecosistema de DriftGLY. Es importante señalar que este estudio solo homologó dos herbicidas (con el propósito de demostrar su viabilidad). Para incorporar cualquier otro tipo de agroquímico en el futuro, como insecticidas, fungicidas u otros, se requerirá un nuevo proceso de calibración y validación. Además, es importante mencionar que podría ser necesario agregar un nuevo sensor al hardware de DriftGLY si los sensores existentes no pueden detectar el nuevo producto agroquímico que necesita ser homologado. Esto no sería un problema, ya que el hardware de DriftGLY tiene la capacidad de integrar nuevos sensores. La cuarta iniciativa consiste en desarrollar un modelo predictivo de ML dentro de la plataforma de IoT para crear mapas de riesgo. Estos mapas no solo identificarán áreas con presencia de

agroquímicos, sino que también harán predicciones sobre cuándo y dónde podría ocurrir la contaminación por agroquímicos. Estas predicciones se basan en el estado del semáforo digital en los dispositivos de DriftGLY instalados en varios sitios de monitoreo, teniendo en cuenta tanto el historial de los semáforos como las condiciones ambientales, temperatura, humedad y dirección del viento. Para lograr esto, los árboles de decisión podrían ser adecuados para problemas de clasificación y regresión. Una vez que el modelo demuestre su eficacia, se integraría en la plataforma de IoT, permitiendo la provisión de predicciones sobre el estado del semáforo en ubicaciones específicas a través de un mapa de riesgos accesible en el “frontend” de la plataforma. Finalmente, la quinta iniciativa persigue la misma idea y tecnología empleada en el proyecto SpectroGLY, se tiene prevista la incorporación de una REST API. Esta interfaz posibilitará la recuperación de todos los datos y registros provenientes de las mediciones realizadas por los dispositivos, permitiendo su consumo por parte de plataformas externas para análisis posterior.

En cuanto a la perspectiva futura de MosquIoT, y coincidentemente con los otros proyectos, también se contemplan cinco iniciativas. La primera iniciativa se centra en la evolución del hardware de MosquIoT, incorporando un display a color basado en tecnología OLED. Este display no solo ofrecerá información local detallada sobre el estado del sistema, sino que también proporcionará datos acerca de la presencia y recuentos de huevos, así como información relevante sobre la comunicación de datos a la plataforma IoT. Con esta mejora, se busca potenciar la capacidad informativa y operativa del dispositivo, contribuyendo a una gestión más eficiente y detallada del monitoreo de mosquitos. En la segunda iniciativa se contempla la integración de la plataforma IoT con la red social X con el propósito de establecer una comunicación más estrecha con la ciudadanía en caso de detectarse actividad de oviposición de *Aedes aegypti* en las áreas residenciales. En lo que respecta a la tercera iniciativa, se planea implementar la misma idea y tecnología utilizada en los proyectos SpectroGLY y DriftGLY, incorporando una REST API. Esta interfaz posibilitará la recuperación de todos los datos y registros provenientes de las mediciones realizadas por los dispositivos, permitiendo su consumo por parte de plataformas externas para análisis posterior. La cuarta iniciativa tiene como objetivo llevar a cabo una nueva investigación científica con el propósito de incorporar al sistema MosquIoT un nuevo tipo de mosquito, el *Aedes albopictus*. La presencia de *Aedes albopictus*, comúnmente conocido como mosquito tigre asiático, plantea un riesgo significativo para la salud humana, ya que puede fungir como potencial vector de enfermedades como el dengue, el virus del Nilo Occidental y la encefalitis de San Luis, entre otras [180]. A pesar de que en Estados Unidos no se le ha vinculado con la transmisión del dengue, investigaciones llevadas a cabo en Brasil y México han identificado ejemplares de *Aedes albopictus* naturalmente infectados con el virus del dengue. Cabe destacar que *Aedes albopictus* comparte similitudes en la morfología de sus huevos con *Aedes aegypti* y emplea una estrategia similar al depositar sus huevos en ovitrampas. La coexistencia de ambas especies de mosquitos es notable en

diferentes contextos, abarcando desde entornos urbanos y periurbanos hasta rurales, especialmente en regiones tropicales y subtropicales. Se ha observado que, según la región, la abundancia de *Aedes albopictus* tiende a ser inferior en comparación con *Aedes aegypti*, con una proporción estimada de aproximadamente 1 a 10, según informes de algunos autores. Este fenómeno destaca la importancia de su incorporación al sistema MosquIoT, permitiendo así una comprensión más completa de la dinámica y coexistencia de estas especies, y la formulación de estrategias efectivas de control y prevención en el ámbito de la salud pública [180]. Finalmente, la quinta iniciativa implicará la ejecución de una nueva prueba de concepto con una versión mejorada de MosquIoT diseñada para operar en entornos exteriores. Esta versión perfeccionada integrará las cuatro iniciativas previamente presentadas, consolidando así los avances y mejoras en el sistema para garantizar su eficaz desempeño. En este contexto, se llevarán a cabo ensayos de campo mediante la implementación de múltiples unidades en ciudades específicas de interés, con el propósito de visualizar y evaluar el respectivo mapa de riesgo y el modelo predictivo en la plataforma IoT asociada. El objetivo primordial de la PoC radica en demostrar que la digitalización del sistema de ovitrampas actual con MosquIoT puede potenciar y elevar la eficiencia de las actuales campañas de detección de *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. Estas campañas están intrínsecamente vinculadas a la prevención de enfermedades transmitidas por *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. Además de las funcionalidades previamente mencionadas en el trabajo de investigación publicado, se proyecta la incorporación de tres características adicionales en futuras iteraciones de MosquIoT.

Finalmente, como perspectiva futura final se plantea una colaboración conjunta con el grupo de Redes y Arquitecturas de Altas Prestaciones (RAAP) [181] para cada uno de los proyectos presentados en esta tesis doctoral. El grupo RAAP es una entidad de investigación destacada, que cuenta con el apoyo del Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I3A) y el Departamento de Sistemas Informáticos de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), ubicada en el Campus de Albacete. Con un enfoque multidisciplinario, el grupo RAAP se ha consolidado como referente en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs). Su participación en proyectos regionales, europeos y colaboraciones con entidades privadas se centra en áreas clave como IoT, Multimedia, Seguridad informática, y Clúster y Nube, demostrando un compromiso destacado con la innovación, la adaptabilidad a desafíos tecnológicos emergentes, y en generar producción científica de calidad. En el ámbito del IoT, el grupo RAAP se destaca como un actor clave, contribuyendo significativamente al avance de esta tecnología. Dentro del contexto de esta tesis doctoral y considerando la destacada competencia tecnológica del grupo RAAP en el IoT, se propone una colaboración con estudiantes de doctorado de dicho grupo. El objetivo será potenciar y evolucionar las comunicaciones LoRaWAN en los proyectos SpectroGLY, DriftGLY y MosquIoT.-





Referencias bibliográficas

- [1] MarketsandMarkets. (2023). Smart Cities market analysis, industry size and forecast. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-cities-market-542.html>
- [2] United Nations. (2019). UN predicts that cities will be home to 70% of the world's population by 2050. [Online]. Available: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>
- [3] World Bank. (2022). Urban Development. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
- [4] Revista Critica por Ricardo Serruya (2021). Los peces más contaminados y depredados del mundo (Argentina). [Online]. Available: <https://revistacitrica.com/santa-fe-los-peces-mas-contaminados-y-depredados-del-mundo.html>
- [5] ITU (International Telecommunication Union). (2014). Smart sustainable cities: An analysis of definitions (Group Technical Report). [Online]. Available: https://www.itu.int/en/itu/focusgroups/ssc/documents/approved_deliverables/tr-definitions.docx
- [6] G. Ceballos et al., “A model to promote citizen driven government in a smart city: Use case at GDL smart city”, IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), pp. 1-6, 2016.
- [7] L. Sánchez et al. “SmartSantander: IoT Experimentation over a Smart City Testbed”, Computer Networks, 2013.
- [8] Todo Noticias (TN). (2018) .The secrets of Copenhagen and its transit network: why it is one of the smartest cities in the world. [Online]. Available: https://tn.com.ar/sociedad/los-secretos-de-copenhague-y-su-red-de-transito-porque-es-una-de-las-ciudades-mas-inteligentes-del_882550/
- [9] Library of the National Congress of Chile, Parliamentary Technical Advisory. (2020). Policies to promote the use of bicycles in Denmark, Holland and Mexico City. [Online]. Available: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29063/1/BCN_Políticas_de_promoción_del_uso_de_la_bicicleta_en_Dinamarca_Holandia_y_Ciudad_de_Mexico.pdf
- [10] United Nations. (2018). World Urbanization Prospects 2018 Highlights. [Online]. Available: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>
- [11] The Swedish Environmental Protection Agency. (2023). Sweden’s Climate Act and Climate Policy Framework. [Online]. Available: <https://www.naturvardsverket.se/en/topics/climate-transition/sveriges-klimatarbete/swedens-climate-act-and-climate-policy-framework/#:~:text=The%20framework%20consists%20of%20a,the%20market%20and%20other%20actors.>

- [12] Balkan Green Energy News. (2020). Estfeed – safe use of smart meter data in order to lower energy costs. [Online]. Available: <https://balkangreenenergynews.com/estfeed-safe-use-of-smart-meter-data-in-order-to-lower-energy-costs/>
- [13] Economic and Commercial Office of the Spanish Embassy in Singapore. (2020). Green Plan 2030. Singapore's green and sustainable economy. [Online]. Available: <https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/113/documentos/2021/06/documentos-anexos/DOC2021884717.pdf>
- [14] A. Lele, “Disruptive Technologies for the Militaries and Security”, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 132, 2019.
- [15] McKinsey. (2015). By 2025, Internet of things applications could have \$11 trillion impact. [Online]. Available: <https://www.consultancy.uk/news/2783/iot-to-add-up-to-111-trillion-to-global-economy-by-2025>
- [16] A. Syed et al., “IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges”, *Smart Cities*, vol. 4(2), pp. 429-475, 2021.
- [17] P. Suresh et al., “A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment”, *International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, pp. 1-8, 2014.
- [18] M. Bauer et al., “IoT-Enabled Smart Cities: Evolution and Outlook”, *Sensors*, vol. 21, pp. 4511, 2021.
- [19] A. Laya et al. in *24th European Regional ITS Conference*. (2013). Who is investing in machine-to-machine communications?. [Online]. Available: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/88475/1/774034017.pdf>
- [20] A. Zanella et al., “Internet of Things for Smart Cities”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1(1), pp. 22-32, 2014.
- [21] WHO (World Health Organization). (2023). World Health Day 2022. Our planet, our health. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/campaigns/world-health-day/2022>
- [22] United Nations. (2022). 99% of the world's population breathes polluted air. [Online]. Available: <https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592#:~:text=Casi%20toda%20la%20poblaci%C3%B3n%20mundial,sobre%20la%20calidad%20del%20aire>.
- [23] P. Kumar et al., “The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities”, *Environment International*, vol. 75, pp. 199-205, 2015.
- [24] UNESCO. (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017*. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247553>
- [25] United Nations. (2008). Water quality. [Online]. Available: <https://www.un.org/waterforlifedecade/quality.shtml>
- [26] Live Science (Future US Inc). (2010). [Online]. Available: How Much Water Is on Earth?. Available: <https://www.livescience.com/29673-how-much-water-on-earth.html>

- [27] D. Alazard et al., “Development of an underwater monitoring wireless sensor network for water quality measurement”, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 3(2), pp. 253-263, 2014.
- [28] FAO (Food and Agriculture Organization). (2023). *Perspectivas para el medio ambiente. Agricultura y medio ambiente*. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/y3557s/y3557s11.htm#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20agropecuaria%20tiene%20unos,por%20nitratos%2C%20fosfatos%20y%20plaguicidas>.
- [29] Friends of the Earth. (2022). *Pesticides and Human Health*. [Online]. Available: <https://friendsoftheearth.eu/publication/pesticideatlas/>
- [30] Pesticide Action Network. (2022). *Pesticide Atlas*. [Online]. Available: https://www.pan-europe.info/sites/pan-europe.info/files/public/resources/reports/PesticideAtlas2022_Web_20221010.pdf
- [31] United Press International. (2017). U.N. report estimates pesticides kill 200,000 people per year by Eric DuVall. [Online]. Available: https://www.upi.com/Top_News/World-News/2017/03/09/UN-report-estimates-pesticides-kill-200000-people-per-year/1161489037649/
- [32] FAO. (2020). *Pesticide Use*. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- [33] FAO. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite*. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/cb7654es/cb7654es.pdf>
- [34] EFEAGRO. (2017). *Inappropriate use of pesticides threatens the health of millions of people*. [Online]. Available: <https://efeagro.com/uso-inadecuado-pesticidas-amenaza-la-salud-miles-millones-personas/>
- [35] M. Hladik et al., “First National-Scale Reconnaissance of Neonicotinoid Insecticides in Streams across the USA”, *Environmental Chemistry*, vol. 13(1), pp. 12-20, 2016.
- [36] M. Ginevan et al., “Pesticide contamination of rural drinking water sources in the Eastern Coachella Valley, California”, *Environmental Health Journal*, vol. 19(1), pp. 1-13, 2020.
- [37] WHO (World Health Organization). (2022). *Ambient (outdoor) air quality and health*. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [38] F. Chang et al., “Ambient air pollution from agriculture: A review”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 70(12), pp. 1246-1263, 2020.
- [39] X. Wang et al., “Pesticide contamination in agricultural soils and waters in China: A critical review”, *Environmental Pollution Journal*, vol. 252, pp. 846-857, 2019.
- [40] B. Gu et al. “The Critical Zone: A Conceptual Framework to Support Sustainable Land Use and Improve Ecosystem Services”, *Applied and Environmental Soil Science Journal*, 2015.

- [41] R. Sapbamrer et al., “Pesticide residues in vegetables from organic and conventional farming in Thailand”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26(34), pp. 34654-34667, 2019.
- [42] D. Goulson, “An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid pesticides”, *Journal of Applied Ecology*, vol. 50(4), pp. 977-987, 2013.
- [43] American Bird Conservancy. (2013). The Impact of the Nation's Most Widely Used Insecticides on Birds. [Online]. Available: http://abcbirds.org/wp-content/uploads/2015/05/Neonic_FINAL.pdf
- [44] A. Lavayén, El Entramado. (2020). The relationship between the increase in dengue, the use of agrochemicals and climate change. [Online]. Available: <https://entramado.fundeps.org/dengue-agroquimicos-cambio-climatico/>
- [45] Perfil. (2009). What factors influence the spread of dengue?. [Online]. Available: <https://www.perfil.com/noticias/sociedad/que-factores-influyen-en-la-propagacion-del-dengue-20090327-0033.phtml>
- [46] Doctors of the World. (2016). Dengue Epidemic Evaluation (Argentina): Technical Document (2016). [Online]. Available: <http://www.mdm.org.ar/informes/37/Documento-Tecnico-Evaluacion-Epidemia-de-Dengue-20161.pdf>
- [47] National University of the Litoral. (2010). Report on the degree of toxicity of glyphosate (Argentina). [Online]. Available: http://www.mamacoca.org/docs_de_base/Fumigas/Informe_Glifosato_UNL_sept_10_2010_ar.pdf
- [48] Ecologists in Action. (2017). From silent spring to silent night: agrochemicals and the Anthropocene. [Online]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/35035/de-la-primavera-silenciosa-a-la-noche-silenciosa-agroquimicos-y-el-antropoceno/>
- [49] M. A. Sabatier. (2020). Environmental imbalances: About various problems that threaten quality of life and human health. [Online]. Available: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/198396/CONICET_Digital_Nro_ad840a06-4ad4-4a42-818d-ed03c0e40200_L.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [50] A. Van Bruggen et al. “Environmental and health effects of the herbicide glyphosate”, *The Science of the total environment*, vol. 616-617, pp. 255-268, 2018.
- [51] C. Achiorno et al., “Susceptibility of *Chordodes nobilii* (Gordiida, Nematomorpha) to three pesticides: Influence of the water used for dilution on endpoints in an ecotoxicity bioassay”, *Environmental Pollution Journal*, vol. 242, pp. 1427-1435, 2018.
- [52] M. Agostini et al. “Pesticides in the real world: The consequences of GMO-based intensive agriculture on native amphibians”, *Biological Conservation Journal*, vol. 241, pp. 1-8, 2019.

- [53] R. Lajmanovich et al., “Agrochemicals and their impact on amphibians: a dilemma that is difficult to solve”, *Química Viva Journal*, vol. 3, pp. 184-198, 2012.
- [54] Abrasco Dossier. (2016). An alert about the impacts of agrotoxics on Health. [Online]. Available: http://www.rets.epsjv.fiocruz.br/sites/default/files/arquivos/biblioteca/dossier_web_es-1.pdf
- [55] Medical College of the province of Buenos Aires (District VII, Pehuajó). (2011). Agrochemicals: Their effects on the population (prevention measures). [Online]. Available: <http://www.colmed7.org.ar/files/Trabajos/AGROQUIMICOS.pdf>
- [56] L. Guillette et. al . “Developmental Abnormalities of the Gonad and Abnormal Sex Hormone Concentrations in Juvenile Alligators from Contaminated and Control Lakes in Florida”, *Environmental health perspectives*, vol. 102, pp. 680-8, 1994.
- [57] G. Séralini et al. “Genetically modified crops safety assessments: Present limits and possible improvements”, *Environmental Sciences Europe*, vol. 23, pp. 10, 2011.
- [58] Smithsonian’s National Zoo & Conservation Biology Institute. (1999). When it comes to pesticides, birds are easy prey. [Online]. Available: <https://nationalzoo.si.edu/migratory-birds/news/cuando-se-trata-de-pesticidas-las-aves-son-presa-facil>
- [59] P. Mercurio et al., “Glyphosate persistence in seawater,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 85, no. 2, pp. 385–390, Aug. 2014.
- [60] J. D. Byer et al., “Low cost monitoring of glyphosate in surface waters using the ELISA method: An evaluation,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 16, pp. 6052–6057, 2008.
- [61] E. Çetin, et al., “DLLME-spectrophotometric determination of glyphosate residue in legumes,” *Food Chem.*, vol. 230, pp. 567–571, Sep. 2017.
- [62] C. R. Worthing et al., “The pesticide manual,” in Surrey, 9th ed. Great Britain, U.K.: British Crop Protection Council, 1991, pp. 459–460.
- [63] A. Guevara, “Effects of glyphosate on weight gain and growth in Yamú fingerlings,” *Brycon Amazonicus*, 2009. [Online]. Available: <https://ciencia.lasalle.edu.co/zootecnia/72>
- [64] A. Burgos et al., “Glyphosate toxicity in fish as biological indicators, and analysis of its effects on the environment and human health,” *Univ. Health Mag.*, vol. 1, no. 8, Nov. 2007.
- [65] Z. Vilca et al., “Glyphosate in water bodies: Environmental problem,” *High Andean Res. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 325–332, 2018.
- [66] M. Varona et al., “Evaluation of the effects of glyphosate and other pesticides on human health in areas targeted by the program to eradicate illicit crops,” *Biomédica*, vol. 29, no. 3, pp. 456–475, 2009.

- [67] V. Lepori et al., “Current situation of pesticide contamination in Argentina,” *Int. J. Environ. Pollut.*, vol. 29, pp. 25–43, Mar. 2013.
- [68] WHO/IPCS, *Environmental Health Criteria No. 159, Glyphosate*, International Programme on Chemical Safety, Geneva, Switzerland, 1994, ch. 7.
- [69] D. A. Maggioni et al., “National short-term dietary exposure assessment of a selected group of pesticides in Argentina,” *J. Environ. Sci. Health, B*, vol. 53, no. 10, pp. 639–651, 2018.
- [70] D. A. Maggioni et al., “Comprehensive estimate of the theoretical maximum daily intake of pesticide residues for chronic dietary risk assessment in Argentina,” *J. Environ. Sci. Health, B*, vol. 52, no. 4, pp. 256–266, Apr. 2017.
- [71] L. C. Folmar et al., “Toxicity of the herbicide glyphosate and several of its formulations to fish and aquatic invertebrates,” *Arch. Environ. Contamination Toxicology*, vol. 8, pp. 269–278, May 1979.
- [72] R. Osten et al., “Glyphosate residues in groundwater, drinking water and urine of subsistence farmers from intensive agriculture localities: A survey in Hopelchén, Campeche, Mexico,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, no. 6, p. 596, 2017.
- [73] V. C. Aparicio et al., “Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins,” *Chemosphere*, vol. 93, no. 9, pp. 1866–1873, Nov. 2013.
- [74] M. Mörtl et al., “Determination of glyphosate residues in Hungarian water samples by immunoassay,” *Microchem. J.*, vol. 107, pp. 143–151, Mar. 2013.
- [75] Y. S. Hu et al., “Removal of glyphosate from aqueous environment by adsorption using water industrial residual,” *Desalination*, vol. 271, nos. 1–3, pp. 150–156, Apr. 2011.
- [76] A. Özkara et al., “Pesticides, environmental pollution, and health,” in *Environmental Health Risk-Hazardous Factors to Living Species*. IntechOpen, 2016.
- [77] P. Nicolopoulou-Stamati et al., “Chemical pesticides and human health: The urgent need for a new concept in agriculture,” *Frontiers Public Health*, vol. 4, p. 148, Jul. 2016.
- [78] S. Mostafalou et al., “Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives,” *Toxicology Appl. Pharmacol.*, vol. 268, no. 2, pp. 157–177, 2013.
- [79] Method 547 Determination of Glyphosate in Drinking Water by Direct Aqueous- Injection HPLC, Post-Column Derivatization, and Fluorescence Detection, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 1990, vol. 1.
- [80] United Nations Environment Programme. (2023). Persistent organic pollutants (POPs). [Online]. Available: <https://www.unep.org/exploretopics/chemicals-waste/what-we-do/persistent-organic-pollutants-POPS>
- [81] Enough is enough. There is an Alternative: Agroecology. We do not want to be Fumigated Towns. (2021). Criticism of the reports of INTA and the Ministry of

- Agriculture on agrochemical drifts by Marcos Tomasoni. [Online]. Available: <https://bastaesbasta.blogspot.com/2020/03/critica-los-informes-del-inta-y-el.html>
- [82] Portal of the publication's office of the European Commission. (2022). Persistent organic pollutants and amending (directive 79/117/EEC). [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02004R0850-20160322&qid=1469699107172>
- [83] T. Hayes et al. "Hermaphroditic, demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 99(8), pp. 5476-80, 2002.
- [84] T. Hayes et al. "The cause of global amphibian declines: a developmental endocrinologist's perspective", *The Journal of Experimental Biology*, vol. 213(6), pp. 921-33, 2010.
- [85] M. Matzrafi et al., "Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification", *Planta*, vol. 244, pp. 1217–1227, 2016.
- [86] G. M. Dill et al., "Glyphosate: Discovery, development, applications, and properties," In *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds: History, Development, and Management*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010, pp. 1–34.
- [87] A. Grube et al., "Pesticides industry sales, & usage: 2006–2007 market estimates," USA Environ. Protection Agency, 2011. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/market_estimates2007.pdf
- [88] ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). (2023). Published Standards. [Online]. Available: <https://asabe.org/Publications-Standards/StandardsDevelopment/National-Standards/Published-Standards>
- [89] A. Etiennot et al., "Good practices of application on extensive flat crops. Distances to urban areas. Criteria and solutions," *Argentine Toxicological Act*, vol. 18(2), pp. 40-53, 2010.
- [90] A. Chaim, "Spray deposition efficiency on vine, comparing nozzles and sprayers", *Pesticides: Journal of Ecotoxicology and the Environment*, vol. 1, pp. 39-46, 2004
- [91] Ecuadorian Scientific Commission. (2007). The aerial spraying system of Plan Colombia and its impacts on the ecosystem and health on the Ecuadorian border. [Online]. Available: https://www.accionecologica.org/wpcontent/uploads/comision_cientifica_ecuatoriana.pdf
- [92] L. Galon et al., "Mobility and environmental monitoring of pesticides in the atmosphere — a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 32236–32255, 2021.

- [93] Digitel Elektronik AG. (2023). High Volume Sampler DHA-80 (product description). [Online]. Available: <https://digitel-ag.com/product/digitelaerosol-sampler-dha-80/>
- [94] P. Das et al., "A Low-Cost Outdoor Air Pollution Monitoring Device with Power Controlled Built-In PM Sensor", *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, pp. 13682-13695, 2022
- [95] M. Fekih et al., "Participatory Air Quality and Urban Heat Islands Monitoring System", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-14, 2021
- [96] Envea Global. (2023). Particulate monitor (product description). [Online]. Available: <https://www.envea.global/s/ambient/particulatemonitors/mp101m-opm/>
- [97] S. Ali et al., "Low-Cost Sensor with IoT LoRaWAN Connectivity and Machine Learning-Based Calibration for Air Pollution Monitoring", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-11, 2021.
- [98] Thermofisher. (2023). TEOM Particle Monitor (product description). [Online]. Available: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/ar/es/TEOM1405D>
- [99] A. Radogna et al., "A Monitoring Framework with Integrated Sensing Technologies for Enhanced Food Safety and Traceability", *Sensors*, vol. 22(17), pp. 6509, 2022.
- [100] C. Wu et al., "Design and Analysis of a Data-Driven Intelligent Model for Persistent Organic Pollutants in the Internet of Things Environments", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 13451-13463, 2021.
- [101] S. Ghosh et al., "Local Reference-Free In-Field Calibration of Low-Cost Air Pollution Monitoring Sensors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-13, 2022.
- [102] W. Hernandez et al., "Analysis of the Information Obtained From PM2.5 Concentration Measurements in an Urban Park," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69(9), pp. 6296-6311, 2020.
- [103] G. D'Elia et al., "Influence of Concept Drift on Metrological Performance of Low-Cost NO₂ Sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-11, 2022.
- [104] M. Njaime et al., "Data Cleaning to fine-tune a Transfer Learning approach for Air Quality Prediction," *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pp. 1-5, 2022.
- [105] S. Dhingra et al., "Internet of Things Mobile - Air Pollution Monitoring System (IoT-Mobair)," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6(3), pp. 1-1, 2019.
- [106] Farmchem. (2023). 2,4-D (product description). [Online]. Available: <http://farmchemsa.com.ar/productos/allgram-24-d-amina-60>
- [107] Gleba. (2022). Glifoglex (product description). [Online]. Available: <https://gleba.com.ar/producto/glifoglex/>

- [108] C. Palma-Bautista et al., “Comparison of premix glyphosate and 2,4-D formulation and direct tank mixture for control of *Conyza canadensis* and *Epilobium ciliatum*”, *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987), vol. 281, pp. 117013, 2021.
- [109] V. Lozano et al., “Freshwater dissolved oxygen dynamics: changes due to glyphosate, 2,4-D and their mixture, both under clear and turbidorganic conditions”, *Cold Spring Harbor Laboratory*, vol. 239, pp. 105957, 2021
- [110] V. Lozano et al., “Hidden impacts of environmental stressors on freshwater communities could be revealed at lower concentrations by correlation of abundances network analyses: An example with herbicides glyphosate, 2,4-D, and their mixtures”, *Austral Ecology*, vol. 47, pp. 1144-1153, 2022
- [111] Twitter (X Corp.). (2023). Twitter Social Network Company (home page). [Online]. <https://twitter.com/home>
- [112] C. Potter, “Stop the biting: Targeting a mosquito’s sense of smell,” *Cell*, vol. 156, pp. 878–881, Feb. 2014.
- [113] A. Murugesan et al., “Dengue virus,” in *Emerging and Reemerging Viral Pathogens*, M. M. Ennaji, Ed. Cambridge, MA, USA: Academic, 2020, ch. 16, pp. 281–359.
- [114] European Centre for Disease Prevention and Control. (2020). *Aedes aegypti*. [Online]. Available: <https://www.ecdc.europa.eu/en/diseasevectors/facts/mosquito-factsheets/Ae.-aegypti>
- [115] J. Ramos. (2020). *The Yellow Fever Mosquito Aedes aegypti* (Linnaeus): The Breeding Sites. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/69709>
- [116] S. Soro, “TinyML for ubiquitous edge AI,” 2021, arXiv:2102.01255.
- [117] H. Han et al., “TinyML: A systematic review and synthesis of existing research,” in *Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun. (ICAIIIC)*, Feb. 2022, pp. 269–274.
- [118] B. Sudharsan et al., “TinyML benchmark: Executing fully connected neural networks on commodity microcontrollers,” in *Proc. IEEE 7th World Forum Internet Things (WF-IoT)*, Jun./Jul. 2021, pp. 883–884.
- [119] R. Partha, “A review on TinyML: State-of-the-art and prospects,” *J. King Saud Univ.-Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, pp. 1595–1623, Apr. 2022.
- [120] M. Mörtl et al., “Determination of glyphosate residues in Hungarian water samples by immunoassay,” *Microchem. J.*, vol. 107, pp. 143–151, Mar. 2013.
- [121] M. Kim et al., “A simplified approach to the determination of N-nitroso glyphosate in technical glyphosate using HPLC with post-derivatization and colorimetric detection,” *Talanta*, vol. 72, no. 3, pp. 1054–1058, May 2007.
- [122] Z. X. Guo et al., “Determination of glyphosate and phosphate in water by ion chromatography—Inductively coupled plasma mass spectrometry detection,” *J. Chromatography A*, vol. 1100, no. 2, pp. 160–167, 2005.

- [123] M. Ibáñez et al., “Re-evaluation of glyphosate determination in water by liquid chromatography coupled to electrospray tandem mass spectrometry,” *J. Chromatography A*, vol. 1134, nos. 1–2, pp. 51–55, Nov. 2006.
- [124] E. A. Lee et al., “Methods of analysis by the U.S. geological survey organic geochemistry research group-determination of glyphosate, aminomethylphosphonic acid, and glufosinate in water using online solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography/mass spectrometry,” Dept. Interior, Washington, DC, USA, Tech. Rep. 01-454, 2002, p. 13.
- [125] M. Ibáñez et al., “Residue determination of glyphosate, glufosinate and aminomethylphosphonic acid in water and soil samples by liquid chromatography coupled to electrospray tandem mass spectrometry,” *J. Chromatography A*, vol. 1081, no. 2, pp. 145–155, Jul. 2005.
- [126] D. J. Padilla-Alonso et al., “New temperature-assisted ionic liquid-based dispersive liquid–liquid microextraction method for the determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in water samples,” *J. Liquid Chromatography Related Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 147–155, 2017.
- [127] M. P. Moraes et al., “Determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid by capillary electrophoresis with indirect detection using pyridine-2,6-dicarboxylic acid or 3,5-dinitrobenzoic acid,” *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 98, no. 3, pp. 258–270, 2018.
- [128] Y. Chang et al., “A simple label free colorimetric method for glyphosate detection based on the inhibition of peroxidase-like activity of Cu(II),” *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 228, pp. 410–415, Jun. 2016.
- [129] L. K. S. De Almeida et al., “A novel colorimetric sensor strip for the detection of glyphosate in water,” *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 206, pp. 357–363, Jan. 2015.
- [130] K. A. Rawat et al., “Mg²⁺ ion as a tuner for colorimetric sensing of glyphosate with improved sensitivity via the aggregation of 2-mercapto-5-nitrobenzimidazole capped silver nanoparticles,” *RSC Adv.*, vol. 6, no. 53, pp. 47741–47752, 2016.
- [131] C. V. Waiman et al., “A simple and rapid spectrophotometric method to quantify the herbicide glyphosate in aqueous media. Application to adsorption isotherms on soils and goethite,” *Geoderma*, vol. 170, pp. 154–158, Jan. 2012.
- [132] F. Bettazzi et al., “Glyphosate determination by coupling an immuno-magnetic assay with electrochemical sensors,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2965, Sep. 2018.
- [133] F. Sánchez-Bayo et al., “An amperometric method for the detection of amitrole, glyphosate and its aminomethyl-phosphonic acid metabolite in environmental waters using passive samplers,” *Analytica Chim. Acta*, vol. 675, no. 2, pp. 125–131, Aug. 2010.
- [134] E. A. Songa et al., “Electrochemical detection of glyphosate herbicide using horseradish peroxidase immobilized on sulfonated polymer matrix,” *Bioelectrochemistry*, vol. 75, pp. 117–123, Jun. 2009.

- [135] J. Sanchís et al., “Determination of glyphosate in groundwater samples using an ultrasensitive immunoassay and confirmation by on-line solid phase extraction followed by liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry,” *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 402, pp. 2335–2345, Mar. 2012.
- [136] B. L. Bhaskara et al., “Direct sensitive spectrophotometric determination of glyphosate by using ninhydrin as a chromogenic reagent in formulations and environmental water samples,” *Helvetica Chim. Acta*, vol. 89, no. 11, pp. 2686–2693, Nov. 2006.
- [137] AMS AG. (2018). AS7265x. Version 01-04. [Online]. Available: https://ams.com/documents/20143/36005/AS7265x_DS000612_1-00.pdf
- [138] Q. M. Quadir et al., “Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77454–77473, 2018
- [139] M. Rizzi et al., “Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 12, pp. 3340–3349, Dec. 2017.
- [140] P. Ferrari et al., “On the use of LoRaWAN and cloud platforms for diversification of mobility-as-a-service infrastructure in smart city scenarios,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–9, 2022
- [141] ThingsBoard. (2022). What is ThingsBoard. [Online]. Available: <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>
- [142] The Things Network. (2022). The Things Fundamentals on LoRaWAN. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- [143] Dragino. (2023). Gateway LG02 (datasheet). [Online]. Available: https://www.dragino.com/downloads/downloads/datasheet/EN/Datasheet_LG02_OLG02.pdf
- [144] Massachusetts Institute of Technology (MIT) App Inventor. (2021). With MIT App Inventor, Anyone Can Build Apps With Global Impact. [Online]. Available: <https://appinventor.mit.edu/>
- [145] Addinsoft XLSTAT. (2021). A Complete statistical Add-in For Microsoft Excel. XLSTAT. [Online]. Available: <https://www.xlstat.com>
- [146] Optoprint. (2020). AvaSpec-ULS3648 Starline High-Resolution FiberOptic Spectrometer. Optoprint Contents. [Online]. Available: <https://www.optoprim.it/wp-content/uploads/2020/03/AvaSpec-ULS3648.pdf>
- [147] SENASA National Registry of Plant Therapeutics. (2023). Consult formulated agrochemical products. [Online]. Available: <https://aps2.senasa.gov.ar/vademecum/app/publico/formulados>
- [148] IFTTT. (2023). IFTTT Services. [Online]. Available: <https://ifttt.com/explore>
- [149] APK Mirror. (2023). Serial Bluetooth Terminal 1.40. [Online]. Available: <https://www.apkmirror.com/apk/kai-morich/serial-bluetoothterminal/serial-bluetooth-terminal-1-40-release/serial-bluetoothterminal-1-40-android-apk-download/>

- [150] Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). Chapter 10. Herbicides by J.C. Caseley. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/t1147s/t1147s0e.htm>
- [151] Melacrom Laboratory. (2023). Melacrom certifications. [Online]. Available: <https://www.melacrom.com.ar/Empresa/Certificaciones.aspx>
- [152] DriftGLY Repository. (2023). Melacrom Laboratory: DriftGLY reports list. [Online]. Available: <https://t.ly/FbRT>
- [153] Y. Chen et al., “Flying insect classification with inexpensive sensors,” *J. Insect Behav.*, vol. 27, no. 5, pp. 657–677, Sep. 2014.
- [154] B. J. Johnson et al., “A low-cost, battery-powered acoustic trap for surveilling male *Aedes aegypti* during rear-and-release operations,” *PLoS ONE*, vol. 13, no. 8, Aug. 2018, Art. no. e0201709.
- [155] Y. Zhong et al., “A vision-based counting and recognition system for flying insects in intelligent agriculture,” *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1489, May 2018.
- [156] M. Preti et al., “Insect pest monitoring with camera-equipped traps: Strengths and limitations,” *J. Pest Sci.*, vol. 94, no. 2, pp. 203–217, Mar. 2021.
- [157] I. Potamitis et al., “Affordable bimodal optical sensors to spread the use of automated insect monitoring,” *J. Sensors*, vol. 2018, pp. 1–25, 2018.
- [158] J. Wang et al., “Mosquito counting system based on optical sensing,” *Appl. Phys. B*, vol. 126, no. 2, Feb. 2020.
- [159] European Transnational and Automated Vector Surveillance System. (2021). Vectrack Description. [Online]. Available: <https://higieneambiental.com/control-de-plagas/sistema-europeo-de-vigilancia-vectorialtransnacional-y-automatizado>
- [160] Israel21. (2021). Mosquito Laser Detector. (Bzigo Product Description).[Online]. Available: <https://es.israel21c.org/detector-laser-de-mosquitosadios-a-las-picaduras/>
- [161] BG-Sentinel. (2020). The BG-Sentinel: Bioagents’ Mosquito Trap for Researchers. [Online]. Available: <https://www.bg-sentinel.com/>
- [162] OpenMV. (2021). OpenMV Cam H7 Plus. [Online]. Available: <https://openmv.io/collections/cams/products/openmv-cam-h7-plus>
- [163] Edge Impulse. (2021). General Description Services. [Online]. Available: <https://www.edgeimpulse.com/>
- [164] A. Rana et al., “Cough detection system using TinyML,” in *Proc. Int. Conf. Comput., Commun. Power Technol. (IC3P)*, Jan. 2022, pp. 119–122.
- [165] S. Hong et al., “Edge impulse machine learning for embedded system design,” *J. Korea Soc. Digit. Ind. Inf. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 9–15, 2021.
- [166] Z. Wang et al., “DeepEdge: A novel appliance identification edge platform for data gathering, capturing and labeling,” *Sensors*, vol. 22, no. 7, p. 2432, Mar. 2022.
- [167] A. Gkogkidis et al., “A TinyML-based system for gas leakage detection,” in *Proc. 11th Int. Conf. Modern Circuits Syst. Technol. (MOCASST)*, Jun. 2022, pp. 1–5
- [168] Google AI Blog. (2018). MobileNetV2. [Online]. Available: <https://ai.googleblog.com/2018/04/mobilenetv2-next-generation-of-on.html>

- [169] D. Robert et al., “Tensorflow lite micro: Embedded machine learning for tinyml systems,” in *Proc. Mach. Learn. Syst.*, vol. 3, 2021, pp. 800–811.
- [170] Edge Impulse. (2022). TensorFlow Lite Reference Models (Edge Impulse Docs). [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/pre-builtdatasets/tensorflow-lite-reference-models>
- [171] L. Moreau. (2022). Announcing FOMO, TinyML, Computer Vision. [Online]. Available: <https://www.edgeimpulse.com/blog/announcingfomo-faster-objects-more-objects>
- [172] Edge Impulse. (2022). FOMO. [Online]. Available: <https://docs.edgeimpulse.com/docs/edge-impulse-studio/learning-blocks/objectdetection/fomo-object-detection-for-constrained-devices>
- [173] The Next Web. (2022). FOMO is a TinyML Neural Network. [Online]. Available: <https://thenextweb.com/news/fomo-tinymml-neuralnetwork-object-detection>
- [174] A. Howard et al., “MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications,” 2017, arXiv:1704.04861.
- [175] CONICET. (2023). Investigador Dr. Darío Vezzani (ficha). [Online]. Available: https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?id=22905&datos_academicos=yes
- [176] D. Verzeñassi et al., “Cancer incidence and death rates in Argentine rural towns surrounded by pesticide-treated agricultural land,” *Clinical Epidemiology and Global Health*, vol. 20, pp. 101239, 2023.
- [177] E. Lorenzatti et al., “Pesticides in Air. Preliminary Study in the City of Santa Fe,” *National University of the Litoral*, vol. 12(1), pp. 129–135, 2008.
- [178] Pixabay. (2023). Fumigaciones terrestres y aéreas en el contexto agroindustrial (repositorio de imágenes gratuitas). [Online]. Available: <https://pixabay.com/>
- [179] Pixabay. (2023). Mosquito Aedes aegypti (repositorio de imágenes gratuitas). [Online]. Available: <https://pixabay.com/>
- [180] D. Vezzani et al. “Aedes aegypti, Aedes albopictus, and dengue in Argentina: Current knowledge and future directions”. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, vol. 103(1), pp. 66-74, 2008.
- [181] Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I3A). (2024). Grupo de Redes y Arquitecturas de Altas Prestaciones (RAAP). [Online]. Available: <https://www.i3a.uclm.es/raap/>