

# Control automatizado de riego de yerba mate mediante lógica difusa y entornos de telemetría

Lucas Gabriel Kucuk, Julio Marcelo Marinelli

Instituto de Investigación, Desarrollo e Innovación en Informática (IIDII) Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones  
lukucuk@gmail.com ,marcelomarinelli@fceqyn.unam.edu.ar

## Resumen

En este trabajo se presentan avances de una investigación realizada en el marco de una tesis doctoral correspondiente al Doctorado en Informática dictada por la Universidad Nacional de Misiones en conjunto con la Universidad Nacional del Nordeste y la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. El artículo desarrolla un marco de trabajo y su posterior implementación para el desarrollo y validación de sistemas de control basado en lógica difusa y telemetría para la optimización de riego de cultivos como la yerba mate. Dicha implementación se despliega mediante un sistema inteligente embebido basado en lógica difusa y telemetría, y que, además, se integra a un prototipo de riego móvil compuesto por un mecanismo de presurización. El trabajo presenta positivos resultados en cuanto a la estabilidad y seguridad del sistema, así como también mejoras en cuanto a la disponibilidad del servicio y optimización de recursos para el riego.

**Palabras claves:** lógica difusa, control automatizado, riego inteligente.

## Contexto

Dentro del INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INFORMÁTICA de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones, se inserta el proyecto de investigación: AUTOMATIZACIÓN DE CULTIVOS HIDROPÓNICOS EN INVERNADEROS DE LA PROVINCIA DE MISIONES UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INTERNET DE LAS COSAS. Código: 16Q1711-PDTS,

que actualmente se desarrolla esta investigación.

## Introducción

Actualmente los productores de yerba mate, en temporada de sequía, utilizan el riego manual como recurso de emergencia, este consiste en la utilización de tractores que cargan tanques de hasta 5000 litros de agua, proceden a regar cada planta de yerba a través de mangueras conectadas al tanque y el tractor traslada dicho tanque por cada uno de los líneas del yerbal. En muchos casos, los productores riegan con recipientes u otros elementos de esta índole, por lo que requiere un esfuerzo excesivo y costoso sabiendo que cada hectárea de yerba mate contiene entre 2000 y 3500 plantines [1].

Uno de los problemas principales es el desconocimiento de la cantidad de riego que necesitan las plantas de yerba mate, esto genera una mala utilización del escaso recurso como lo es el agua. Se obtiene como consecuencia que las plantas de yerba mate no reciben el adecuado riego, produciendo la pérdida de la misma [2].

Los entornos de telemetría y la lógica difusa se presentan como una alternativa para aproximar una solución viable. De esta manera, se pretende determinar la cantidad de agua necesaria para que la planta de yerba mate tenga el riego adecuado [3] [4].

## Marco de trabajo

Existe la necesidad de plantear un marco de trabajo que satisfaga necesidades específicas del cultivo y que permitan el despliegue de tecnología de telemetría. Por lo que se plantea el abordaje de un marco metodológico basado en procesos que permita enfocar el análisis, desarrollo, implementación y pruebas de los

distintos prototipos obtenidos, los procesos se pueden ver en la Figura 1.

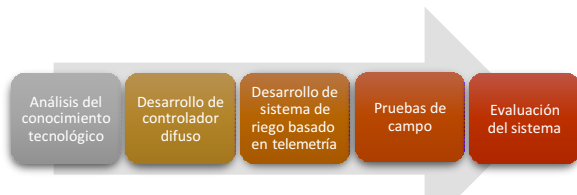


Figura 1 – Marco de trabajo propuesto

El marco de trabajo desarrolla una guía que abarca desde el análisis de los requerimientos de conocimientos y tecnológicos hasta la implementación y validación de un sistema de control basado en lógica difusa y telemetría.

### Análisis del conocimiento tecnológico

En el proceso de "Análisis del conocimiento tecnológico", se realizó un relevamiento y seguimiento de las condiciones de humedad de suelo desde el año 2020. Además, se realizaron entrevistas y reuniones con productores y organismos públicos relacionados con la yerba mate para determinar condiciones óptimas de riego, considerando aspectos tanto del proceso como de las condiciones de las plantas.

Respecto a las condiciones óptimas de riego que debe tener las plantas, teniendo en cuenta los más de 25 entrevistados entre productores pequeños, medianos, grandes e ingenieros agrónomos dedicados al proceso de riego manual, se obtuvo algunas afirmaciones importantes que plantean las futuras configuraciones:

- Cada planta de yerba mate en campo de entre 1 a 2 años de edad necesita entre 2 a 3 litros de agua para llegar a su condición ideal de riego, en temporada de sequía.
- En el contexto del cultivo, la sequía se considera al menos 30 días sin llover lo cual genera el riesgo de pérdida de las plantaciones.
- No hay un conocimiento certero en términos de humedad de suelo cuanto representa 2 a 3 litro de agua.
- Hay una gran coincidencia que el riego disperso es mejor respecto al de planta por planta debido a que la humedad no se dispersa de inmediato.

Respecto a las condiciones deseables del prototipo:

- **Movilidad:** el aspecto de poder transportar el equipo resulta de gran interés ya que esto permitiría implementar el sistema en varios sitios y además en lugares de difícil acceso.
- **Usabilidad:** fácil de comprender su utilización, es decir, que aparte de ajustarse a las necesidades específicas tenga un indicador del progreso del riego de fácil comprensión.

### Desarrollo del controlador difuso

Una vez determinadas las condiciones, el siguiente proceso a desarrollar se denomina "Desarrollo del controlador difuso". Esta etapa consiste en el desarrollo del controlador propiamente dicho, para lo cual se utilizó Matlab, específicamente el FuzzyLogicToolBox, para hacer simulaciones del desarrollo en cuestión.

Las variables de entrada del controlador se obtienen como resultado o salida del proceso anterior, las determinaciones de las necesidades planteadas permiten abordar las actividades de este siguiente proceso. En primer lugar, se armaron los universos de las variables de entrada del controlador [5], para este caso son la humedad de suelo, la edad de la plantación y cantidad de superficie cubierta por el sistema de riego. En segundo lugar, se eligió el método de defuzificación para este caso se eligió el denominado centroide [6].

Respecto a la variable de entrada de edad de la planta se utilizaron 3 conjuntos o funciones de membresía (Figura 2) uno corresponde cuando la planta tiene de 0 a 8 meses de edad, otro de entre 6 y 14 meses y otro entre 12 a 24 meses de edad.

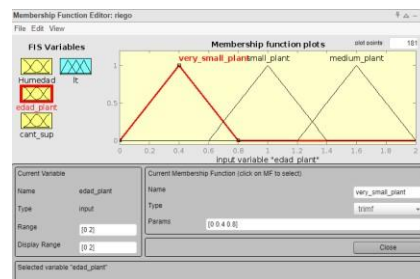


Figura 2 – Configuración de variable Edad de la Plantación

La segunda variable de estudio tiene que ver con la humedad requerida, los parámetros obtenidos aquí fueron hallados a partir del primer proceso, el cual determinó que entre 2 a 3 litros de agua darían el porcentaje de humedad ideal, mientras que 1 litro y medio sería lo mínimo y menos de eso no sería suficiente para la planta. Esta variable es la que cambiará de manera automática mediante el sistema de telemetría, se puede observar en la figura 3.

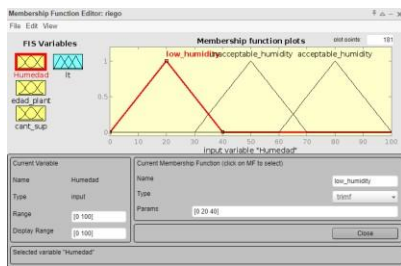


Figura 3 - Configuración de variable Humedad

La tercera variable de entrada del controlador tiene que ver con cuantas plantas abarca el sistema de riego o bien la superficie a regar. Como la implementación del sistema riego es variable en sus formatos, esto puede variar constantemente, este valor queda determinado según la implementación. En un yerbal, por lo general, la distribución de las plantas es por hileras o “líneos” donde cada uno tiene como máximo 100 plantas cubriendo 100m<sup>2</sup>, esto varía según las dimensiones del mismo y la disposición entre una planta y otra. Los conjuntos de esta variable en el controlador se observan en la figura 4.

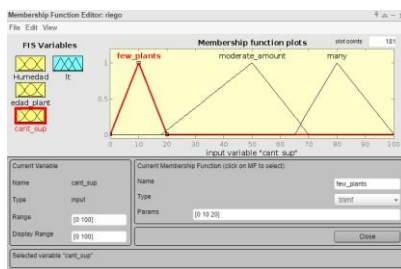


Figura 4 - Configuración de variable Superficie/Cantidad

La variación entre la cantidad de plantas, la humedad requerida y la edad de la plantación permite determinar la cantidad de litros de agua para el riego del mismo.

Se considera como picos máximos de riego lo abastecido por 300 litros de agua

aproximadamente, esto sería el rango máximo de la variable de salida del controlador. En un escenario real, como mínimo debería haber 20 plantas para el riego, mientras que como máximo existirían entre 70 y 100. Por lo que sabiendo que la cantidad de litros de agua óptima es de 3 litros por la superficie de la ubicación de cada planta, se determina para que para estos valores máximos oscilarían entre 250 y 300 litros aproximadamente. La configuración de estos conjuntos se puede observar en la figura 5.

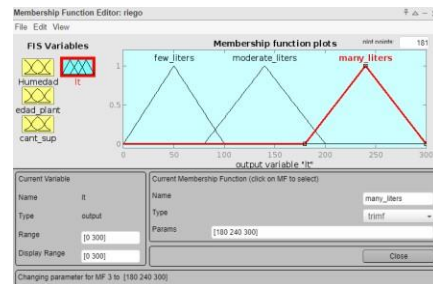


Figura 5 - Configuración de variable cantidad de litros de agua

Una vez definidos las variables de entrada y salida del controlador, se procede a establecer las reglas del mismo. Para ello se ha considerado trabajos similares que desarrollan riego automático [7][8] y las distintas variaciones que se disponen según las variables obtenidas en el primer proceso.

Se han definido 27 reglas, describiendo en líneas generales, que, a menor humedad del suelo, mayor edad de la plantación y cantidad de superficie a regar, mayor será la cantidad de litros de agua que el sistema debe otorgar. Del mismo modo, cuando llega a valores óptimos de humedad en el suelo el sistema debe indicar poco riego o nulo y apaga la bomba de agua.

### Desarrollo del sistema de riego basado en telemetría

El tercer proceso se enfoca en la generación de un sistema embebido utilizando microcontroladores, sensores y tecnología telemétrica.

Este sistema está compuesto por dos partes, por un lado, el hardware que tiene embebido el controlador difuso y que además censa las variables como la humedad del suelo, y determina finalmente si debe parar el sistema de

riego o no. Sobre esta primera parte, los componentes desarrollados se dividen en dos partes, por un lado, lo que se denominó “postas telemétricas” que son dispositivos compuestos de una placa Arduino, un sensor de humedad y un módulo transmisor de radiofrecuencia, estos se encargan de transmitir en qué condiciones se encuentra la humedad del suelo en donde está ubicado dicho dispositivo. En segundo lugar, se desarrolló la controladora que también está basado en Arduino, un receptor de radiofrecuencia y un servomotor, este dispositivo tiene embebido el controlador difuso y que mediante un algoritmo determina si debe parar el riego o no, esta controladora está conectada a un computador en donde es posible ingresarle los valores que tienen que ver con la superficie a regar, la edad de la plantación y que además se puede visualizar que porcentaje de riego se obtiene.

La segunda parte del sistema se compone de un sistema de riego por aspersión compuesto por una motobomba de 6 caballos de fuerza, una manguera con 100 metros de largo con un pico regador ubicado cada metro y medio, y además un tanque de 1000 litros de agua de forma cúbica, este sistema integrado se puede observar en la figura 6.

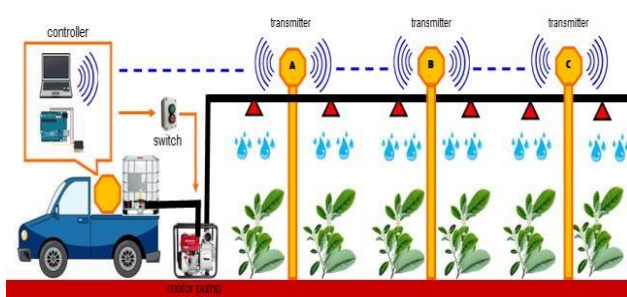


Figura 6 – Esquema integrado de sistema de riego, controlador difuso y telemetría

### Pruebas de campo

El sistema de riego junto con el controlador se pudo probar en un ambiente real, este consta de un campo de cultivo de yerba mate en una superficie de hilera compuesto por 68 plantas y con una edad de 1 año y medio. A efectos comparativos se hicieron dos pruebas una utilizando el riego manual, que es el que actualmente se utilizaba y luego con el sistema de riego desarrollado. Para colocar dicho

sistema hubo una etapa de preparación del mismo que consistió en dejar en óptimas condiciones los equipos en cuanto a carga de baterías, agua en el depósito y combustible para la motobomba.

Una vez ubicado el sistema de telemetría se desplegó la manguera junto con los regaderos sobre dicho línea de la plantación. Al iniciar el sistema este indicó que el suelo tenía un 25% de humedad. Los tres valores descriptos se cargaron a la controladora e inició el riego por aproximadamente 15 minutos y luego se detuvo el riego automáticamente. El sistema de telemetría ubicada en las postas indicaba en tiempo real por tecnología telemétrica la humedad al controlador madre, no se detectaron inconvenientes de conectividad o estabilidad.

### Evaluación del sistema

Finalmente, en el proceso de "Evaluación del sistema", se llevó un análisis sobre el desempeño del controlador y del sistema de riego. Comparado al riego manual, se constató que gracias a este prototipo se obtuvo un ahorro de tiempo de riego de 80% y un ahorro de agua de 45%. La humedad deseada se logró a los 15 minutos de encendido del sistema. Una vez que el prototipo dejó de regar de manera automática, se corroboró la humedad manualmente planta por planta dando así que el 93% tenían las condiciones óptimas.

En la siguiente etapa del trabajo se implementará el sistema en extensiones más grandes de cultivo de yerba mate y se considerará aspectos relacionados a la duración de los depósitos.

## Línea de Investigación

Dentro del proyecto se encuentran varias líneas de investigación relacionadas:

- Control automatizado de riego de yerba mate mediante lógica difusa y entornos de telemetría
- Automatización de cultivos hidropónicos
- Telemetría y control mediante IoT utilizando protocolo MQTT

- Estudio Comparativo de Técnicas de Inteligencia Computacional con la Finalidad de Controlar la Germinación y el Crecimiento de Cultivos Hidropónicos.
- Control de crecimiento de plantines de *lactuca sativa* mediante técnicas de análisis de imágenes.
- Analizador de tráfico de paquetes del protocolo MQTT utilizando el bróker Mosquitto aplicado en dispositivos IoT para sistemas de control y telemetría de invernaderos

## Resultados

En este trabajo se hizo una propuesta e implementación de un marco de trabajo para el desarrollo de un controlador difuso y su posterior ejecución a través de un sistema de riego compuesto por tecnología de telemetría y de presurización de agua.

Los resultados demuestran que el marco de trabajo propuesto establece una guía clara de ejecución y el sistema desarrollado ha obtenido resultados significativamente positivos en términos de optimización de recursos como el agua y esfuerzo humano.

## Formación de Recursos Humanos

En el proyecto AUTOMATIZACIÓN DE CULTIVOS HIDROPÓNICOS EN INVERNADEROS DE LA PROVINCIA DE MISIONES UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INTERNET DE LAS COSAS -Código: 16Q1711-PDTS se forman los siguientes recursos humanos:

- Tres tesis doctorales del DI
- Una tesis doctoral del DCA
- Cuatro tesis de MTI
- Cuarto investigadores docentes
- Dos auxiliares de investigación Alumnos

## Bibliografía

[1] Instituto Nacional de la Yerba Mate. (2021). Ante la falta de lluvias, se recomienda monitorear y regar los plantines de yerba mate. Recuperado el 23 de marzo de 2023, de [https://inym.org.ar/noticias/produccion-](https://inym.org.ar/noticias/produccion-sustentable/79597-ante-la-falta-de-lluvias-se-recomienda-monitorear-y-regar-los-plantines-de-yerba-mate.html)

[sustentable/79597-ante-la-falta-de-lluvias-se-recomienda-monitorear-y-regar-los-plantines-de-yerba-mate.html](https://inym.org.ar/noticias/produccion-sustentable/79597-ante-la-falta-de-lluvias-se-recomienda-monitorear-y-regar-los-plantines-de-yerba-mate.html)

- [2] Skromeda, M. (2019). Evaluación de la brotación en yerba mate bajo distintos niveles nutricionales [Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata].
- [3] Jani, J., & Chaubey, N. K. (2022). A Novel Model for Optimization of Resource Utilization in Smart Agriculture System Using IoT (SMAIoT). *IEEE Internet of Things Journal*, 9(13), 11275-11282. doi: 10.1109/JIOT.2021.3128161
- [4] Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8(3), 199-249
- [5] Aldegheishem, A., Alrajeh, N., García L., & Lloret, J. (2022). SWAP: Smart WATER Protocol for the Irrigation of Urban Gardens in Smart Cities. *IEEE Access*, 10, 39239-39247. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165579
- [6] Navarro, H., Martínez, J., Domingo, R., Soto, F., & Torres, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121-131. doi: 10.1109/JSEN.2020.3033526
- [7] Roy, K. S., Misra, S., Raghuvanshi, N. R., & Das, S. (2021). AgriSens: IoT-Based Dynamic Irrigation Scheduling System for Water Management of Irrigated Crops. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), 5023-5030. doi: 10.1109/JIOT.2020.3036126.
- [8] Bai, K., Zhu, X., Wen, S., Zhang, R., & Zhang, W. (2022). Broad Learning Based Dynamic Fuzzy Inference System With Adaptive Structure and Interpretable Fuzzy Rules. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30(8), 3270-3283. doi: 10.1109/TFUZZ.2021.3112222
- [9] Urbietta, R., Zagaceta, M., Aguilar, K., Palma, R., & Fernández, J. (2021). Implementation of a fuzzy logic controller for the irrigation of rose cultivation in Mexico. *Agriculture*, 11(7), 576. doi: 10.3390/agriculture11070576.