

Caracterización del Proceso de Secado de Café en Patio utilizando tecnologías IoT

Andrés Felipe Eraso Daza

Santiago Rojas Perez

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2026

Caracterización del Proceso de Secado de Café en Patio utilizando tecnologías IoT

Andrés Felipe Eraso Daza

Santiago Rojas Perez

Proyecto de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería
Electrónica en la Modalidad Estancia en Línea

Asesor

Camilo Arturo Lagos Mora

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2026

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG para optar por el título de Ingeniero Electrónico.

Mg. Camilo Arturo Lagos Mora

Mg. Mario Andrés Benavides Mutis

Ing. Javier Alejandro Villota Ceballos

San Juan de Pasto, 28 de abril de 2026

Nota de exclusión

El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusiva responsabilidad del autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mis padres, quienes han sido mi mayor apoyo y ejemplo, por estar siempre a mi lado, por su amor incondicional, sus enseñanzas y por impulsarme a seguir adelante en cada momento. Este logro también es de ustedes, porque en cada paso han sido mi guía y mi motivación.

A mi abuelita materna, por su cariño, sus consejos y su constante apoyo, siendo una figura fundamental en este proceso; así como a mi abuela paterna y a toda mi familia, tíos, tías y demás familiares, tanto del lado materno como paterno, por su respaldo, confianza y por creer siempre en mí.

A mi novia, por su compañía, paciencia y apoyo durante este camino, por estar presente en los momentos importantes y ser un apoyo constante.

A mis amigos de carrera, con quienes compartí este proceso, por su apoyo, compañerismo y por hacer de este camino una experiencia más llevadera.

Este logro es el reflejo del apoyo y cariño de todos ustedes.

Andrés Felipe Eraso Daza

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y en mi formación. Gracias por estar siempre presentes, por depositar su confianza en mí, por sus consejos, su apoyo incondicional y por inculcarme el valor de la educación como herramienta para salir adelante. Este logro no es solo mío, también es de ustedes, porque cada esfuerzo realizado ha sido impulsado por su amor, sacrificio y motivación constante.

A mis hermanos, por acompañarme en este proceso y brindarme su apoyo en cada etapa; a mis tíos, en especial, por su apoyo constante a lo largo de este proceso, por estar siempre presentes y por aportar desde su parte con motivación, consejos y ayuda para seguir adelante, abuelos y demás familiares, especialmente a aquellos que, aunque ya no están físicamente, siguen siendo una inspiración en mi camino. A todos ellos, gracias por creer en mí, por sus palabras de aliento y por ser parte fundamental de este logro.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que confiaron en mis capacidades y me motivaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este logro también es de ustedes.

Santiago Rojas Perez

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad CESMAG por brindarnos la formación académica, los recursos y los espacios necesarios para el desarrollo de este proyecto. A nuestros profesores, quienes con su conocimiento, experiencia y orientación constante fueron una guía fundamental a lo largo de todo el proceso formativo y en la construcción de este trabajo; a nuestro asesor y jurados, por su acompañamiento, observaciones y valiosos aportes que contribuyeron significativamente al fortalecimiento y calidad del proyecto.

Agradecemos también a nuestros compañeros, por el apoyo, la colaboración y el intercambio de ideas que enriquecieron cada etapa del desarrollo, así como al grupo SECCAF por su disposición, apoyo técnico y aporte al proyecto. Finalmente, reconocemos a todas las personas que, de manera directa o indirecta, hicieron parte de este proceso y aportaron al logro de este resultado.

Contenido

Introducción	18
1. El problema de investigación.....	20
1.1 Objeto o tema de investigación.....	20
1.2 Línea Investigación.....	20
1.3 Sub-línea de investigación	20
1.4 Planteamiento o Descripción del Problema	20
1.5 Formulación del Problema.....	21
1.6 Objetivos.....	21
1.6.1 Objetivo general	21
1.6.2 Objetivos específicos.....	21
1.7 Justificación	22
1.8 Delimitación.....	22
2. Tópicos del Marco Teórico	24
2.1 Antecedentes	24
2.1.1 Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador.	24
2.1.2 Caracterización De Algunas Propiedades Físicas Y Factores De Conversión Del Café Durante El Proceso De Beneficio Húmedo Tradicional	25
2.1.3 Caracterización de un sensor de humedad capacitivo con salida análoga e implementación en el diseño de un control on/off de secado de café.	26
2.1.4 Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café. 27	
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos	28
2.2.1 Humedad en el secado de café.....	28
2.2.2 Secado de café en patio	28
2.2.3 Base de datos	29

2.2.4	Regresión lineal simple	29
2.2.5	Modelo regresión polinómica multivariable.....	30
2.2.6	Temperatura.....	32
2.3	Definición de variables	32
2.3.1	Variables Nominales.....	32
2.3.2	Variables Operativas.....	32
3.	Metodología	34
3.1	Secuencia Metodológica	34
3.1.1	Desarrollar un prototipo que permita replicar el proceso de secado en patio.....	34
3.1.2	Implementar el sistema de control de movimiento para el prototipo de secado de café en patio.	35
3.1.3	Desarrollar un sistema IOT para la recolección de información del prototipo de secado de café en patio.....	36
3.1.4	Analizar datos del proceso de secado para evaluar su eficiencia y calidad.....	36
3.1.5	Universo	37
3.1.6	Muestra.....	38
3.2	Técnicas de recolección de información.....	38
3.2.1	Validez de la técnica	39
3.2.2	Confiabilidad de la técnica	39
3.3	Instrumentos de recolección de información	40
4.	Resultados	42
4.1	Diseño del sistema	42
4.1.1	Diseño mecánico	42
4.1.2	Planos diseño mecánico del rastrillo Solid Works.....	43
4.1.3	Construcción mecánica.....	44
4.1.4	Diseño ensamblado del prototipo	52
4.2	Diseño hardware electrónico.....	53

4.2.2	Diseño firmware de la parte electrónica.....	54
4.2.3	Control de movimiento.....	55
4.2.4	Funcionamiento movimiento de control.....	56
4.2.5	Movimiento de control con intervalo de tiempos.....	58
4.3	Construcción del dispositivo IoT versión 1	59
4.3.1	Diseño y construcción de placa PCB.....	60
4.3.2	Componentes utilizados para el dispositivo IoT.....	62
4.3.3	Funcionamiento del dispositivo IoT.....	64
4.3.4	Integración y Ensamblaje de Componentes en la PCB	66
4.3.5	Diseño de la carcasa del dispositivo IoT	68
4.3.6	Impresión 3D de carcasas para dispositivo IoT.....	71
4.3.7	Ensamblaje completo dispositivo IoT	71
4.4	Pruebas de funcionamiento del dispositivo IoT.....	73
4.4.1	Café pergamino seco	74
4.4.2	Café pergamino ligeramente mojado.....	75
4.4.3	Tabla de datos.....	76
4.5	Toma de datos reales en campo	78
4.5.1	Medición en campo del secado de café	78
4.5.2	Dispositivos y sensores utilizados en la validación.....	79
4.5.3	Metodología de toma de datos.....	79
4.5.4	Distribución de los sensores BME280 en el rastrillo mecánico	80
4.6	Construcción del dispositivo IoT versión 2	81
4.6.1	Proceso constructivo de la PCB.....	82
4.6.2	Integración de componentes en la PCB.....	83
4.6.3	Funcionamiento del código del dispositivo IoT versión 2.....	84
4.6.4	Diseño, impresión 3D y ensamblaje de la carcasa del dispositivo IoT.....	86
4.6.5	Funcionamiento del dispositivo v2.....	87

4.6.6	Diseño y construcción de la interfaz en la plataforma Firebase	87
5.	Análisis de Resultados	89
5.1	Análisis de los datos.....	89
5.1.1	Herramienta de procesamiento y visualización de datos.....	90
5.1.2	Análisis de la toma de datos en el municipio de Génova	91
5.1.3	Análisis de la toma de datos en el municipio de Albán	104
5.1.4	Análisis de la toma de datos en el municipio de Sandoná.....	115
5.1.5	Comportamiento por variación del clima	125
5.1.6	Relación entre la temperatura y la humedad en el proceso de secado.....	126
5.1.7	Comparación del comportamiento del secado de café en patio entre municipios ..	127
5.1.8	Relación entre superficie del grano de café y su núcleo interno	130
5.2	Herramienta de modelamiento matemático para la estimación del contenido de humedad.	132
5.2.1	Preprocesamiento de datos para el modelamiento.....	133
5.2.2	Regresión polinómica multivariable para la estimación del contenido de humedad 136	
5.2.3	Construcción de la regresión polinómica a partir de los datos experimentales	138
5.2.4	Implementación computacional del modelo.....	145
5.2.5	Sensor virtual de humedad del café basado en Machine Learning.....	146
5.3	Análisis comparativo del modelo en Génova, Albán y Sandoná.....	147
5.4	Análisis de costo beneficio del sistema de rastrillo IoT para el proceso de secado de café en patio	149
5.4.1	Relación costo beneficio del prototipo rastrillo.....	149
5.4.2	Relación costo beneficio del sistema IoT para estimación de humedad del café ...	151
	Conclusiones	154
	Recomendaciones	157
	Referencias.....	159

Lista de Figuras

Figura 1. Prototipo	24
Figura 2. sensor capacitivo con salida análoga.....	26
Figura 3. Prototipo base primer boceto.....	35
Figura 4. sensor digital BME280.....	40
Figura 5. Medidor de humedad DH200X A mis tíos, en especial, por su apoyo constante a lo largo de este proceso, por estar siempre presentes y por aportar desde su parte con motivación, consejos y ayuda para seguir adelante	41
Figura 6. Esp 32 S3 utilizado para recolección y vista de datos.....	41
Figura 7. Esquema prototipo.....	42
Figura 8. Prototipo inicial	43
Figura 9. Prototipo final completo	43
Figura 10. Planos rastrillo base.....	44
Figura 11. Planos rastrillo	44
Figura 12. Estructura base aluminio	45
Figura 13. Guía	45
Figura 14. Guía en la estructura.....	46
Figura 15. Eje con balineras y piñones	46
Figura 16. Eje en la estructura	46
Figura 17. Rastrillo	47
Figura 18. soportes laterales para el rastrillo	47
Figura 19 Carcaza protector para los finales de carrera.....	48
Figura 20. Motor DC en la estructura	48
Figura 21. Motor paso a paso acoplado al rastrillo.....	50
Figura 22. Driver controlador del motor paso a paso 28BYJ-48.....	51
Figura 23. Final de carrera	51
Figura 24. Carrete	52
Figura 25. Diseño prototipo ensamblaje.....	52
Figura 26. Diseño prototipo	52
Figura 27. Esquema de conexión	53

Figura 28. Circuito electrónico	54
Figura 29. Diagrama de flujo control de movimiento.....	56
Figura 30. Diagrama de flujo control de movimiento por tiempo	58
Figura 31. Circuito para dispositivo IoT.....	61
Figura 32. Circuito Pistas en 3D.....	62
Figura 33. Vista 3D componentes.....	62
Figura 34. Integración Sensores BME280.....	63
Figura 35. Diagrama de flujo funcionamiento dispositivo IoT.....	66
Figura 36. Placa PCB terminada.....	67
Figura 37. Placa PCB Ensamblada	67
Figura 38. Ensamblaje del dispositivo IoT	68
Figura 39. Toma de medidas para la carcasa	69
Figura 40. Dimensiones de la carcasa.....	69
Figura 41. Dimensiones carcasa sensor DTH22.....	70
Figura 42. Dimensiones carcasa para sensores BME280	70
Figura 43. Impresión en 3D carcasa	71
Figura 44. Ensamblaje completo dispositivo IoT	71
Figura 45. Dispositivo IoT.....	73
Figura 46. Funcionamiento dispositivo IoT.....	73
Figura 47. Sensores.....	74
Figura 48. Toma de datos en establecimiento cerrado.....	75
Figura 49. Toma de datos en campo	75
Figura 50. Rastrillo en funcionamiento	81
Figura 51. Vista de capas (Print Layout) IoT versión 2.....	83
Figura 52. Vista de capas (Layer View) Placa PCB sensores BME280	83
Figura 53. Integración de PCB a los sensores BME280.....	84
Figura 54. Integración de PCB a los componentes.....	84
Figura 55. Diagrama de flujo de datos del Sistema IoT v2 para el monitoreo del proceso de secado del café.	85
Figura 56. Dimensiones de carcasa dispositivo	86
Figura 57. Acoplamiento de componentes en carcasa	86

Figura 58. Funcionamiento del dispositivo IOT	87
Figura 59. Diseño interfaz.....	88
Figura 60. Interfaz Visualización de gráficas.....	91
Figura 61. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 7 de septiembre.....	94
Figura 62. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 8 de septiembre.....	95
Figura 63. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 9 de septiembre.....	96
Figura 64. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 10 de septiembre.....	96
Figura 65. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 11 de septiembre.....	98
Figura 66. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 12 de septiembre.....	98
Figura 67. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 13 de septiembre.....	99
Figura 68. Toma de datos Génova	100
Figura 69. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 7 de septiembre en el secado de café en Génova	100
Figura 70. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 8 de septiembre en el secado de café en Génova	101
Figura 71. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 9 de septiembre en el secado de café en Génova	101
Figura 72. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 10 de septiembre en el secado de café en Génova	102
Figura 73. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 11 de septiembre en el secado de café en Génova	103
Figura 74. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 12 de septiembre en el secado de café en Génova	103
Figura 75. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 13 de septiembre en el secado de café en Génova	104
Figura 76. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 7 de octubre en el secado de café en Albán	106
Figura 77. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 8 de octubre en el secado de café en Albán	107
Figura 78. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 9 de octubre en el secado de café en Albán	107

Figura 79. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 10 de octubre en el secado de café en Albán	108
Figura 80. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 11 de octubre en el secado de café en Albán	109
Figura 81. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 12 de octubre en el secado de café en Albán	110
Figura 82. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 13 de octubre en el secado de café en Alban	111
Figura 83. Toma de datos Albán	112
Figura 84. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 7 de octubre en el secado de café en Albán	112
Figura 85. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 8 de octubre en el secado de café en Albán	113
Figura 86. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 9 de octubre en el secado de café en Alban	113
Figura 87. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 10 de octubre en el secado de café en Albán	114
Figura 88. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 11 de octubre en el secado de café en Albán	114
Figura 89. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 12 de octubre en el secado de café en Albán	115
Figura 90. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 13 de octubre en el secado de café en Albán	115
Figura 91. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 26 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	118
Figura 92. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 27 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	118
Figura 93. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 28 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	120
Figura 94. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 29 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	120

Figura 95. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 30 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	121
Figura 96. Toma de datos Sandoná.....	122
Figura 97. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 26 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	122
Figura 98. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 27 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	123
Figura 99. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 28 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	124
Figura 100. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 29 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	124
Figura 101. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 30 de octubre en el secado de café en Sandoná.....	125
Figura 102. Relación entre humedad superficial y humedad interna en la etapa final del secado en Genova	130
Figura 103. Relación entre humedad superficial y humedad interna en la etapa final del secado en Alban	131
Figura 104. Relación entre humedad superficial y humedad interna en la etapa final del secado en Sandona	131
Figura 105. Herramienta para modelo matemático.....	133
Figura 106. Visualización de datos modelamiento	135
Figura 107. Gráfica total de muestras realizadas	137
Figura 108. Modelo regresión polinómica.....	146
Figura 109. Modelamiento en Génova.....	147
Figura 110. Modelamiento en Alban.....	148

Lista de tablas

Tabla 1. Primera prueba de Datos	76
Tabla 2. primera muestra de datos IoT.....	77
Tabla 3. Muestra de datos dispositivo IoT. Génova.....	91
Tabla 4. Muestra de datos con el pasar de los días. Génova.....	92
Tabla 5. muestra de datos soleado dispositivo IoT, Alban.....	105
Tabla 6. Muestra de datos Sandoná.....	116
Tabla 7. Datos para modelamiento matemático humedad	134
Tabla 8. Datos para modelamiento matemático temperatura.....	134
Tabla 9. Datos de Génova para realizar regresión.	139
Tabla 10. Costo Equipo de rastrillo.....	150
Tabla 11. Costo dispositivo IoT	152

Introducción

El proyecto se centra en recolectar la información necesaria para modelar el proceso de secado del café en patio, con el objetivo de identificar y cuantificar los factores que influyen en este proceso. El secado de café en patios es uno de los métodos tradicionales más utilizados por los caficultores, especialmente en Colombia, donde el clima favorece este tipo de procesos al aire libre. Este proceso consiste en extender los granos de café sobre una superficie, generalmente de madera concreto, ladrillo o metal, para que el sol y el viento contribuyan a reducir la humedad del grano hasta un nivel adecuado para su conservación y comercialización este proceso ayuda a preservar las propiedades organolépticas del café, además de ser un método económicamente viable para muchos caficultores.

Sin embargo, este método presenta limitaciones debido a su alta dependencia de las condiciones climáticas. Factores como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar influyen directamente en la velocidad y uniformidad del secado, lo que puede generar diferencias entre la humedad superficial y la humedad interna del grano, afectando su calidad y valor comercial.

Ante estos desafíos, el uso de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) permite monitorear de manera continua las variables ambientales que influyen en el proceso de secado. En este proyecto se implementó un sistema de monitoreo utilizando sensores ambientales BME280 ubicados en diferentes niveles de la masa de café, con el fin de registrar variables de temperatura y humedad durante el proceso de secado en patio.

Las mediciones se realizaron en los municipios de Génova, Albán y Sandoná, lo que permitió analizar el comportamiento del secado bajo distintas condiciones climáticas. El sistema se complementó con un rastrillo mecanizado automatizado que realiza el movimiento periódico del café, mejorando la uniformidad del secado y reduciendo la necesidad de intervención manual constante.

Los datos recolectados fueron procesados mediante herramientas de programación en Python, a partir de las cuales se desarrolló un modelo matemático que permite estimar la humedad interna del grano utilizando únicamente las variables registradas por los sensores ambientales. Esta estimación fue comparada con mediciones obtenidas mediante un medidor comercial de humedad de café, con el fin de evaluar la aproximación del modelo.

Finalmente, se realizó un análisis de costo beneficio del sistema desarrollado, considerando tanto el rastrillo automatizado como el dispositivo IoT de monitoreo. Este análisis permite evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema, destacando su potencial para mejorar el control del secado del café, optimizar el uso de la mano de obra y contribuir a la obtención de granos de mejor calidad.

1. El problema de investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

El secado de café en patio, caracterizado mediante variables de humedad y temperatura, y condiciones monitoreadas con tecnologías IoT.

1.2 Línea Investigación

sistemas de automatización y control: La línea de sistemas de automatización y control de la Universidad CESMAG desarrolla procesos investigativos orientados al modelamiento, simulación, diseño, desarrollo y evaluación de algoritmos de control, sistemas de control, sistemas inteligentes, control de procesos industriales, sistemas embebidos, acondicionamiento y procesamiento de señales, robótica, domótica e inteligencia artificial. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015)

1.3 Sub-línea de investigación

Control de procesos: Estudia el diseño e implementación de controladores que permitan regular las variables de un sistema o proceso con el fin de lograr un funcionamiento deseado, buscando mejorar la productividad y la eficiencia de los procesos, como también la reducción de costos de implementación y el impacto ambiental del mismo. Entre las temáticas que aborda la línea se encuentran el control en procesos industriales, sistemas inteligentes y control visual. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015).

1.4 Planteamiento o Descripción del Problema

En el departamento de Nariño, la producción de café es crucial para muchos caficultores [1]. Sin embargo, el proceso de secado es esencial para asegurar la calidad del grano, que enfrenta desafíos significativos relacionados con la humedad y la temperatura, factores que afectan las propiedades fisicoquímicas del café y, en consecuencia, su calidad y sabor [2]. Dentro de estas propiedades se encuentra el pH, el cual puede verse influenciado de manera indirecta por las condiciones de secado, aunque no es una variable abordada directamente en este proyecto. Un pH adecuado es fundamental, ya que influye en la acidez del café, característica que los consumidores valoran en el perfil de sabor.

Actualmente, el secado se realiza de forma manual o semi-manual en áreas soleadas, donde se busca reducir la humedad del grano al 10-12%. Aunque este método parece sencillo, requiere controlar varios factores adicionales para evitar problemas como la decoloración, desarrollo de moho o sabores amargos, que comprometen la calidad del grano [3]. La falta de un modelo para guiar el proceso puede llevar a errores como tiempos de secado insuficientes, que generan hongos, o exposiciones prolongadas, que afectan la acidez y el perfil de sabor del café, generando pérdidas económicas para los productores [2].

Además, el conocer cuáles son las características que gobiernan el proceso de secado del café le permite al caficultor, principalmente a las nuevas generaciones a tomar buenas decisiones sobre la manipulación, de esta manera al conocer el modelo que se genera en el proceso del secado se pueden llegar a tomar decisiones de manera oportuna así obteniendo un grano de café de buena calidad. Sin un modelamiento preciso y accesible se incrementa la probabilidad de errores en el proceso.

1.5 Formulación del Problema

¿Cómo caracterizar el proceso de secado de café en patio utilizando tecnologías IOT?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Caracterizar el proceso de secado de café en patio utilizando tecnologías IOT

1.6.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un prototipo que permita replicar el proceso de secado en patio.
- Implementar un sistema de control de movimiento para el prototipo de secado de café en patio.
- Desarrollar un sistema IOT para la recolección de información del prototipo de secado de café en patio.
- Analizar datos del proceso de secado para evaluar su eficiencia y calidad.

1.7 Justificación

El secado de café a través de rayos solares ha sido una práctica sostenible para muchos agricultores, contribuyendo a una estabilidad económica básica. Sin embargo, este método puede ofrecer resultados de mayor calidad si se mejora la recolección de datos sobre variables clave, como la exposición a la radiación ultravioleta y la humedad ambiental. La información obtenida en cada etapa del proceso puede influir en las características finales del café, como el sabor, aroma, acidez e incluso su contenido nutricional y antioxidante, aspectos que son decisivos para la aceptación en el mercado[2].

En este contexto, es importante considerar que el contenido de humedad del café debe reducirse típicamente a valores entre 10% y 12% para garantizar su adecuada conservación, mientras que la temperatura ambiental influye directamente en la velocidad de secado y en la calidad final del grano.

En los últimos años, algunos proyectos en el sector caficultor han comenzado a implementar tecnologías de recolección de datos y análisis predictivo, atrayendo el interés financiero de microempresas que buscan un control más preciso de la calidad. Por ejemplo, iniciativas en Colombia y otros países productores han utilizado sensores de humedad y temperatura para optimizar los procesos, logrando café de mejor sabor y mayor durabilidad. La integración de bases de datos y técnicas de ciencia de datos para modelar estos factores permitiría anticipar ajustes en el secado que respondan a las condiciones del grano, beneficiando la calidad y rentabilidad para los productores[4].

Una caracterización precisa de los procesos de secado facilita la implementación de estrategias avanzadas: desde el desarrollo de prototipos automáticos para regular la temperatura y distribución del calor hasta la adopción de tecnologías que optimicen el uso de energía y minimicen el impacto de factores ambientales. Esta caracterización ayudará a mejorar la calidad del café ya que se tienen en cuenta las variables precisas para un proceso de secado de café.

1.8 Delimitación

Este proyecto se llevará a cabo en el laboratorio de la Universidad Cesmag, donde se desarrollarán experimentos enfocados en la prueba de toma de datos de los sensores de humedad y temperatura, así como en las conexiones necesarias para su implementación en el prototipo. Se

aprovecharán también los instrumentos disponibles en el laboratorio de electrónica para asegurar un funcionamiento óptimo del sistema. Adicionalmente, el proyecto se desarrollará en campo en los municipios de Génova, Albán y Sandoná, donde se realizarán pruebas en condiciones reales del proceso de secado del café. El proyecto dará inicio en el primer semestre de 2025 y tiene como delimitación temporal extenderse hasta el primer semestre de 2026.

La cantidad de café, delimitada (10 kg), se ha establecido para construir un prototipo de menor escala acorde con esta cantidad, y se utilizará en múltiples pruebas experimentales. Durante el proyecto, se capturarán datos relacionados con la humedad, temperatura y otros factores ambientales como la temperatura ambiente y la variación de la humedad relativa del entorno, los cuales influyen en el proceso de secado del café. Estos datos se analizarán para modelar el secado de café en patio.

Finalmente, el proyecto se aplicarán criterios específicos de calidad, como el sabor, aroma y uniformidad del café, para determinar el impacto de la caracterización en el proceso de secado.

2. Tópicos del Marco Teórico

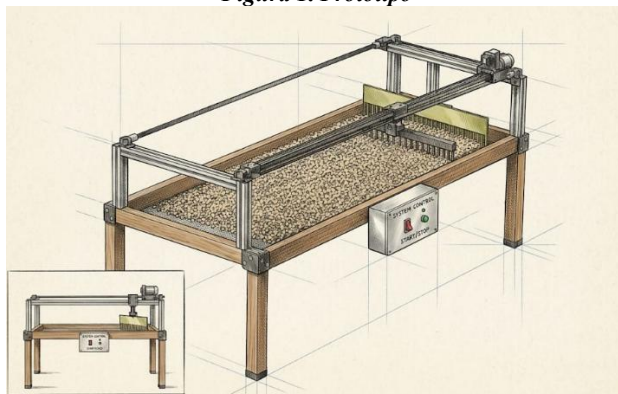
2.1 Antecedentes

2.1.1 *Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador.*

El proyecto tiene como objetivo implementar un rastrillo automatizado para una cama africana dentro de una marquesina. Este sistema será configurable para operar de forma autónoma en franjas horarias específicas y a distintas velocidades de traslación. En resumen, la mecánica del movimiento podrá ser ajustada por el usuario o, alternativamente, se podrán seleccionar modos de operación predefinidos en función del tipo de café que se esté secando[4].

Para el proyecto se propone un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el secado, crucial para alcanzar altos estándares de calidad y reducir pérdidas económicas. Este sistema garantizará una deshidratación uniforme y minimizará la contaminación del producto. Se desarrolló en tres etapas: levantamiento de información, diseño y selección de equipos, adaptando las necesidades del usuario a la programación del sistema.

Figura 1. Prototipo



Como se observa en la figura 1, se ha realizado un prototipo con su respectiva base, rastrillo y se ha implementado un motor para el movimiento del rastrillo que es el que va a distribuir el café por toda la base.

Este antecedente aporta al presente proyecto en el diseño mecánico del sistema de movimiento del café, evidenciando la importancia de la automatización del rastrillo para lograr un secado más uniforme. Sin embargo, a diferencia de este trabajo, el presente proyecto no solo

se enfoca en la automatización del movimiento, sino que incorpora un sistema IoT para la adquisición, monitoreo y análisis de variables ambientales como temperatura y humedad, permitiendo una caracterización más completa del proceso de secado del café.

2.1.2 Caracterización De Algunas Propiedades Físicas Y Factores De Conversión Del Café Durante El Proceso De Beneficio Húmedo Tradicional

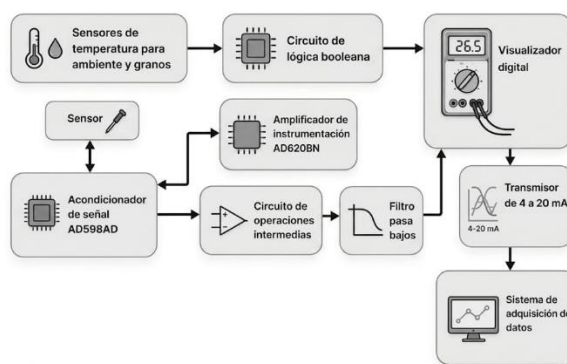
Según [2] se caracterizaron diversas propiedades físicas y factores de conversión del café de Colombia, desde el fruto maduro hasta el grano para distribuir. La recolección se realizó en fincas de los municipios de Chinchiná, Manizales, Villamaría y Palestina durante tres períodos de la cosecha del segundo semestre de 2005. Se tomaron muestras de café maduro sin defectos y otras no seleccionadas; de cada muestra se obtuvieron submuestras que se procesaron mediante el beneficio húmedo y secado mecánico, realizando análisis físicos y mediciones a lo largo del proceso. Se observó que el peso y los diámetros (ancho y grosor) de los frutos y granos fueron mayores durante la época intermedia de cosecha. En cuanto a la densidad aparente y la humedad, no se registraron cambios significativos a lo largo de la cosecha. Las relaciones de conversión, el porcentaje de merma y el rendimiento en trilla fueron óptimos en el período inicial, donde también se notó una menor cantidad de defectos en cereza, pergamino y almendra, mientras que estos defectos tendieron a aumentar conforme avanzaba la cosecha. El café seleccionado mostró las mejores características físicas. Las relaciones de conversión fueron similares entre los diferentes tipos de muestra, pero el porcentaje de merma y el rendimiento fueron superiores en la muestra seleccionada. Se encontraron defectos en la masa, con porcentajes de pasillas del 5,41% para el café seleccionado y del 9,19% para el no seleccionado.

Este antecedente aporta al presente proyecto en la metodología de recolección y análisis de datos del café en diferentes condiciones y etapas del proceso, lo cual sirve como base para la toma de datos en distintas zonas de estudio. Asimismo, permite fundamentar el análisis del café en estado de pergamino, el cual es una etapa clave en el proceso de secado, donde el grano aún conserva una capa protectora que influye en su comportamiento frente a la humedad y las condiciones ambientales. Sin embargo, a diferencia de este estudio, el presente proyecto realiza la adquisición de datos en tiempo real mediante un sistema IoT y en diferentes municipios, permitiendo un análisis aplicado en condiciones reales de secado en patio.

2.1.3 Caracterización de un sensor de humedad capacitivo con salida análoga e implementación en el diseño de un control on/off de secado de café.

La implementación de un sensor de humedad capacitivo con salida analógica, “diseño y construcción de un sistema para la medición de contenido de humedad en granos”[5]. Este sensor, aunque prometedor, aún no ha sido caracterizado, lo que limita la comprensión de su curva de respuesta y su linealidad. La caracterización de este sensor es esencial no solo para su funcionamiento adecuado, sino también para su aplicación en procesos industriales y su viabilidad comercial. Un sensor bien caracterizado facilitaría el registro de datos y el control automático de dispositivos, mejorando así la eficiencia del secado del café.

Figura 2. sensor capacitivo con salida análoga



En la figura 2 describe un sistema donde los sensores de temperatura captan datos de temperatura que son acondicionados, amplificados, procesados y finalmente visualizados y transmitidos a un sistema de adquisición de datos para monitoreo y control.

Además, el principio de funcionamiento del sensor se basa en la medición de la capacitancia, que varía proporcionalmente con el contenido de humedad en la muestra. A medida que la humedad aumenta, también lo hace la capacitancia, lo que permite obtener una respuesta en voltaje que se traduce en mediciones precisas del contenido de humedad.

Para el proyecto, es esencial considerar cómo el sensor capacitivo recolecta los datos. Es recomendable seleccionar un sensor que se ajuste a las necesidades específicas para la medición de humedad en el grano de café. Este tipo de sensor mide la capacitancia, la cual varía proporcionalmente con la humedad: a mayor humedad, mayor capacitancia. Por lo tanto, es importante elegir un dispositivo que permita realizar mediciones precisas y consistentes en

función de esta relación, garantizando así una toma de datos efectiva para el proceso de secado del café.

Este antecedente aporta al presente proyecto en la comprensión del funcionamiento y la importancia de la medición precisa de la humedad en granos de café, destacando la relevancia de la caracterización de sensores para obtener datos confiables. Sin embargo, a diferencia de este estudio, que se centra en el desarrollo y caracterización de un sensor específico, el presente proyecto utiliza sensores comerciales previamente calibrados e integra un sistema IoT que permite la adquisición, almacenamiento y análisis de datos en tiempo real durante el proceso de secado en condiciones reales.

2.1.4 Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café.

Para medir la humedad del grano de café que se seca al sol, [6] propuso un método llamado Gravimet. Este método se basa en comparar el peso del café en dos estados: lavado y seco. Consiste en colocar 200 gramos de café limpio en una canastilla plástica y usar una balanza digital de bajo costo para medir su peso a lo largo del tiempo.

Cuando el peso del café está entre 104 y 106 gramos, se considera que su humedad está entre el 10% y el 12%. Para comprobar cuán preciso es el método Gravimet, se comparó con el método tradicional de secado en estufa, que sigue la norma NTC 2325. En 80 pruebas, que incluían humedades desde el 49% hasta el 10%, se encontró que la precisión del Gravimet variaba entre 1,92% y 0,09%. Este método no sobrestima ni subestima la humedad en comparación con el método de estufa.

Para que el Gravimet funcione correctamente y determine que la humedad está entre 10% y 12%, el peso en la canastilla debe estar entre 104 y 105 gramos, y la balanza debe tener una resolución de 1 gramo. Además, al evaluar el método con 20 caficultores en cinco pruebas, se observó que en el 92% de los casos, el contenido de humedad estaba efectivamente entre el 10% y el 12%, con un peso de 105 gramos.

Este antecedente aporta al presente proyecto en la referencia de valores cuantitativos para la humedad óptima del café pergamino (10%–12%), así como en la validación de métodos de medición que permiten evaluar el estado del grano durante el secado. Estos valores sirven como base para la interpretación de los datos recolectados en el proceso de monitoreo. Sin embargo, a

diferencia de este método, que se basa en mediciones puntuales mediante pesaje, el presente proyecto implementa un sistema IoT que permite la adquisición continua de datos de temperatura y humedad en tiempo real, facilitando un análisis más completo y dinámico del proceso de secado en condiciones reales

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 *Humedad en el secado de café*

El nivel de humedad en el café es crucial para la durabilidad del producto y su almacenamiento. Un alto contenido de humedad puede perjudicar la calidad del grano, ya que provoca el calentamiento de la masa y fomenta el crecimiento de hongos e insectos. Los granos de café con un contenido de humedad inferior al 13% son menos propensos a ser atacados por microorganismos en cualquier entorno.

Es importante la humedad que conlleve el café, donde se demostró que el secado a baja temperatura y baja humedad (LTLH) fue el más efectivo. Este método aumentó los carbohidratos en los granos, mejorando el aroma y calidad del café. El café tostado mostró altos niveles de cafeína y ácido clorogénico, y las infusiones presentaron un perfil químico superior, con mayores carbohidratos, polifenoles y antioxidantes [7].

2.2.2 *Secado de café en patio*

El secado del café en patio es un método tradicional utilizado para reducir la humedad de los granos de café después de la cosecha. Consiste en esparcir los granos en capas delgadas sobre una superficie plana, como cemento o tierra, y dejarlos secar al sol durante varios días. Este proceso requiere una supervisión constante para voltear los granos y asegurar un secado uniforme, lo que contribuye a la calidad del café al permitir un secado lento y controlado.

Entre los beneficios del secado en patio se encuentran su bajo costo, ya que no requiere equipos costosos y utiliza energía solar, así como la mejora en las características organolépticas del café. Además, este método reduce el riesgo de fermentación al controlar adecuadamente la humedad y ayuda a alcanzar el nivel óptimo de humedad (10-12%) [3] necesario para la conservación y almacenamiento. Por último, es una opción más sostenible y amigable con el medio ambiente, ya que no depende de combustibles fósiles ni electricidad.

-Para la buena calidad del café su color uniforme cuando esté totalmente seco y en buen estado debe ser blanco.

-Para una buena calidad y distribución el café en Colombia se a distinguido por todas las características que este debe tener como también la acidez, sabor, aroma, propiedades nutricionales, sensoriales y estimulantes [8].

2.2.3 Base de datos

La base de datos es una herramienta fundamental para la recopilación, almacenamiento y organización de la información generada durante el proceso de secado de café, ya que permite gestionar de manera estructurada los datos obtenidos a partir de los sensores IoT, facilitando su análisis y procesamiento. En este proyecto, el sistema recolecta variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa mediante sensores distribuidos en la masa de café, cuyos datos son transmitidos y almacenados en una plataforma en la nube, permitiendo contar con un registro continuo, ordenado y disponible para su análisis en diferentes etapas. Asimismo, la base de datos cumple un papel clave en el preprocesamiento de la información, donde se realizan tareas como la eliminación de datos atípicos o nulos, la organización temporal de las mediciones y la preparación de los datos para su análisis, garantizando así la calidad de la información. A partir de estos datos, se aplican técnicas de análisis y modelamiento, como regresiones y métodos computacionales, que permiten identificar patrones en el proceso de secado y estimar variables como la humedad interna del grano, convirtiendo la base de datos en un elemento esencial para la toma de decisiones y la optimización del proceso.[9]

2.2.4 Regresión lineal simple

Modelo de regresión lineal simple es una herramienta que describe cómo una variable dependiente Y está relacionada con una variable predictora X. El modelo se define matemáticamente como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

- Y: Variable dependiente (respuesta que se busca predecir).
- X: Variable predictora (covariable que se utiliza para hacer la predicción).
- β_0 : Intercepto, valor de Y cuando X=0.

- β_1 : Pendiente o coeficiente de regresión que mide el cambio promedio en Y por cada unidad adicional de X.
- ε : Término de error, que refleja las variaciones no explicadas por la relación lineal entre X e Y.

Este error ε considera las fluctuaciones que pueden hacer que la relación entre X e Y no sea perfectamente lineal, lo que da lugar a pequeñas desviaciones en las observaciones reales. El modelo intenta ajustar una línea que minimice estas desviaciones, proporcionando una estimación óptima de la relación entre las dos variables [10].

2.2.5 *Modelo regresión polinómica multivariable*

Por esta razón, en este estudio se empleó un modelo de regresión polinómica multivariable de segundo grado, el cual permite capturar relaciones no lineales entre las variables sin incrementar excesivamente la complejidad del modelo.[26] El modelo se define matemáticamente como:

$$X = [S_1, S_2, S_3, H_{AMB}, G]$$

donde:

S_1 corresponde a la humedad relativa medida por el sensor ubicado en la parte superior de la masa de café.

S_2 corresponde a la humedad medida en la zona media.

S_3 corresponde a la humedad medida en la parte inferior.

H_{amb} corresponde a la humedad relativa del ambiente.

G corresponde al gradiente de humedad

La variable dependiente del modelo corresponde al contenido de humedad del café medido mediante el instrumento de referencia.

$$Y = DH$$

donde DH representa la humedad del grano medida con el sensor DH200X.

En un modelo de regresión polinómica de segundo grado, la variable dependiente puede expresarse como una combinación de términos lineales,[27] términos cuadráticos y términos de interacción entre las variables independientes. De forma general, el modelo puede escribirse como.

$$DH = \beta_0 + \sum_{i=1}^5 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^5 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 \beta_{ij} X_i X_j$$

donde:

β_0 es el término independiente del modelo

β_i representan los coeficientes lineales

β_{ii} representan los coeficientes cuadráticos

β_{ij} representan los coeficientes de interacción entre variables

Sustituyendo las variables del sistema de sensores, la expresión del modelo puede representarse como.[28]

$$\begin{aligned} DH = & \beta_0 + \beta_1 S1 + \beta_2 S2 + \beta_3 S3 + \beta_4 H_{amb} + \beta_5 G + \beta_6 S1^2 + \beta_7 S2^2 + \beta_8 S3^2 + \beta_9 H_{amb}^2 \\ & + \beta_{10} G^2 + \beta_{11} S1S2 + \beta_{12} S1S3 + \beta_{13} S1H_{amb} + \beta_{14} S1G + \beta_{15} S2S3 \\ & + \beta_{16} S2H_{amb} + \beta_{17} S2G + \beta_{18} S3H_{amb} + \beta_{19} S3G + \beta_{20} H_{amb}G \end{aligned}$$

Para evaluar la precisión del modelo, se emplea el error cuadrático medio (RMSE), definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (DH_i - \widehat{DH}_i)^2}$$

donde:

DH_i corresponde al valor real medido por el sensor de referencia.

\widehat{DH}_i corresponde al valor estimado por el modelo.

n representa el número total de observaciones utilizadas en el entrenamiento.

Este indicador permite cuantificar la diferencia promedio entre los valores reales y los valores estimados, proporcionando una medida de la capacidad del modelo para representar el comportamiento del proceso de secado del café.

2.2.6 *Temperatura*

[11] hace un énfasis en la importancia de la temperatura en el cultivo del café y demás cultivos, ya que influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, la maduración de los granos y, por ende, en la calidad del producto final. Destaca que temperaturas óptimas favorecen un mejor sabor y aroma, mientras que las fluctuaciones climáticas pueden alterar los ciclos de los cultivos, exigiendo adaptaciones en las prácticas agrícolas en general. Además, se señala el riesgo de heladas y sus efectos perjudiciales en las cosechas, así como la necesidad de considerar la biodiversidad y la salud del suelo para asegurar la sostenibilidad del cultivo.

2.3 **Definición de variables**

Es esencial definir las variables a medir, ya que serán fundamentales para la recolección de datos y permitirán una adecuada caracterización del proceso de secado del café. Estas variables se dividen en dos categorías: nominales y operativas.

2.3.1 *Variables Nominales*

Estado del clima: Corresponde a la condición ambiental durante el proceso de secado del café, la cual puede clasificarse en categorías como soleado, parcialmente nublado o lluvioso. Esta variable influye en la radiación solar y en la eficiencia del secado del grano[12].

Tipo de café: Se refiere a la clasificación del café utilizado en las pruebas, pudiendo ser café seleccionado o no seleccionado. Esta variable permite analizar diferencias en el comportamiento del secado según la calidad inicial del grano[3].

2.3.2 *Variables Operativas*

Estas variables describen cómo se llevará a cabo la medición de las variables nominales:

Medición de Humedad en el Grano: La humedad del grano se medirá directamente mediante un sensor de humedad, el cual permitirá obtener valores precisos en porcentaje. Estos datos se registrarán y almacenarán en una base de datos para su análisis.

Medición de Temperatura en el Prototipo: La temperatura se monitoreará utilizando una cámara térmica enfocada al prototipo de secado, lo cual facilitará el monitoreo continuo del proceso.

Para asegurar la precisión de las mediciones de humedad y temperatura durante el proceso de secado del café, se realizará una calibración inicial de los instrumentos principales: el sensor de humedad y la cámara térmica. Este monitoreo de la temperatura y la humedad del grano permitirá tomar decisiones cruciales durante el secado, como el tiempo de exposición al sol y el momento adecuado para interrumpir o ajustar el proceso, asegurando así una alta calidad en el grano de café final.

Para la calibración del sensor de humedad se puede optar por varios métodos, pero una forma sencilla es la de la prueba de sal, por ejemplo, se coloca una cucharada de sal humedecida con agua en un recipiente pequeño, y luego se coloca el sensor y la sal en una caja plástica sellada. Después de 8 horas, la caja alcanza una humedad del 75%. Si el sensor no marca este valor, se ajusta según las instrucciones del fabricante o se corrige en el software. Este método proporciona un ambiente controlado y estable para la calibración [13].

La calibración de la cámara térmica se puede hacer comparando las lecturas del sensor infrarrojo con un termómetro de precisión. Se utiliza un objeto de temperatura conocida, como una superficie calentada, para asegurar que las temperaturas medidas por la cámara sean correctas.

3. Metodología

3.1 Secuencia Metodológica

Este proyecto se realizará una caracterización en el proceso de secado de café mediante IOT, con la toma de datos y muestras, de variables como la humedad y temperatura y llevarlas a una base de datos con la ayuda de un prototipo automatizado ya diseñado.

La investigación es de tipo aplicada, experimental y descriptiva:

Aplicada, porque busca resolver un problema real en el proceso de secado del café.

Experimental, porque se implementa y prueba un sistema IoT en condiciones reales.

Descriptiva, porque analiza el comportamiento de las variables durante el proceso de secado.

3.1.1 *Desarrollar un prototipo que permita replicar el proceso de secado en patio.*

El prototipo se diseñará en función de la cantidad de café a analizar, considerando las medidas del área que ocupará. Primero, se creará un modelo en SolidWorks para obtener las dimensiones exactas antes de proceder con la construcción física. La base será una estructura robusta, en la que se colocará el café a secar, utilizando materiales como elvas, heldas o bases de madera. Dos motores a 12v serán instalados en los laterales de la base, como se ilustra en la figura 3, Para lograr este movimiento, se adaptará una cadena con un engranaje acoplado al motor, lo que permitirá que el rastrillo, conectado a la cadena, esparza homogéneamente el café sobre toda el área del prototipo. La cadena, formada por eslabones interconectados, se moverá sobre una guía a lo largo de la base. Al estar conectada al rastrillo, esta cadena lo desplazará de manera sincronizada por toda el área del prototipo, asegurando que el café se distribuya de manera homogénea. La base tendrá unas dimensiones aproximadas de 50x100x5 cm, lo que será suficiente para almacenar 10kg, considerando que el volumen del grano es de aproximadamente 0.575 g/cm³. Lo cual es suficiente estas medidas para almacenar el café.

Teniendo estos datos podemos calcular la capacidad total que podemos almacenar:

Primero calculamos el volumen:

$$Volumen = l * a * h$$

$$Volumen = 50 * 100 * 5$$

$$Volumen = 25.000cm^3$$

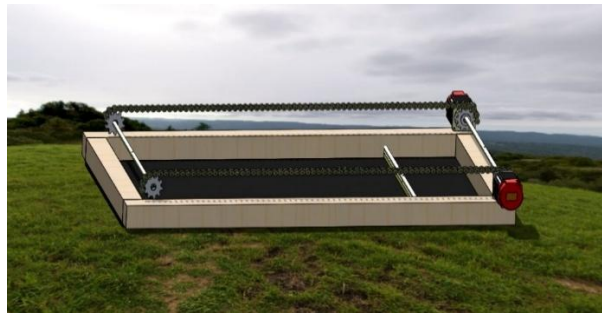
Con esto ya podemos calcular la capacidad que podemos almacenar Considerando una densidad del café de 0.575 g/cm^3 obtenemos

$$\begin{aligned} \text{Capacidad} &= \text{densidad} * \text{volumen} \\ \text{Capacidad} &= 0.575 \text{ g/cm}^3 * 25.000 \text{ cm}^3 \\ \text{Capacidad} &= 14.375 \text{ Kg} \end{aligned}$$

se obtiene una capacidad aproximada de 14.375 kg.

Esto indica que las dimensiones planteadas son suficientes para almacenar los 10 kg de café requeridos, dejando un margen adicional que evita sobrecargas y permite una mejor distribución del grano durante el proceso de secado.

Figura 3. Prototipo base primer boceto



3.1.2 Implementar el sistema de control de movimiento para el prototipo de secado de café en patio.

Después de desarrollar el prototipo se va a implementar el sistema de control del movimiento, donde es esencial considerar las variables de temperatura y humedad, ya que son cruciales en el proceso de caficultura. Estas variables influyen en la calidad del café, y el sistema simulará el trabajo de los caficultores, específicamente el barrido del café con la ayuda del motor que se implementó, este será el encargado de hacer el control con ayuda de algún algoritmo que se podría hacer con el microcontrolador esp32. El funcionamiento del sistema se basa en el movimiento controlado del rastrillo a lo largo del área de secado. Este se desplaza hasta alcanzar los sensores de final de carrera ubicados en cada extremo; al activarse uno de ellos, el motor invierte el sentido de giro y el rastrillo regresa en dirección contraria. Además, el sistema puede configurarse para permanecer en reposo durante intervalos de tiempo determinados, por ejemplo, unos minutos al inicio, en el centro o al final del recorrido, simulando los periodos de trabajo

intermitente que realizan los caficultores durante el secado. Se utilizarán los sensores ya mencionados para medir la temperatura y humedad del grano en tiempo real estas variables y ajustar el movimiento del prototipo en consecuencia, garantizando un secado uniforme y adecuado de los granos.

3.1.3 Desarrollar un sistema IOT para la recolección de información del prototipo de secado de café en patio.

Con aplicación como Firebase Realtime Database, Microsoft Azure Cosmos DB, Google Cloud Firestore o Arduino IoT Cloud, se hará la creación de una base de datos en la nube, donde se almacenará información de las variables para la humedad y temperatura.

El prototipo estará equipado con sensores de humedad ubicados en el rastrillo, que recogerán datos continuamente a medida que este recorre el área de secado. Estos datos serán transmitidos a la nube a través de un ESP32, que servirá como la plataforma de desarrollo para gestionar la conexión Wi-Fi y enviar la información en tiempo real a la base de datos seleccionada. Este proceso garantiza un monitoreo constante y permite ajustar el secado según las condiciones detectadas.

Además, se controlará el tiempo de barrido, considerando las variables climáticas del lugar para asegurar que el café alcance la humedad ideal y, en consecuencia, una alta calidad. Para la temperatura, se utilizará una cámara térmica que monitoreará todo el prototipo, proporcionando un mapeo térmico mediante colores: azul para frío y rojo para calor. La cámara tomará las muestras necesarias para asegurar un secado uniforme y eficiente. Es importante destacar que, para procesar las imágenes térmicas y obtener datos relevantes sobre la temperatura del café, se utilizarán algoritmos específicos que analizan la distribución del calor en el prototipo. Estos algoritmos convierten la información visual en datos cuantificables, permitiendo determinar las zonas más calientes o frías del área de secado. A través de este procesamiento, se puede ajustar el secado de manera precisa, garantizando que el café se seque de manera uniforme, mejorando su calidad final[14].

3.1.4 Analizar datos del proceso de secado para evaluar su eficiencia y calidad.

Como fase final del proyecto, se realizará el análisis de los datos recopilados durante el proceso de secado del café, con el propósito de evaluar su eficiencia y su relación con la calidad

del grano. La información obtenida a partir de los sensores IoT y de los dispositivos de medición permitirá llevar a cabo una caracterización detallada del comportamiento de las variables ambientales, principalmente la humedad relativa y la temperatura relativa, así como identificar patrones y tendencias relevantes a lo largo del proceso de secado.

Para el procesamiento y análisis de los datos se utilizarán herramientas de ciencia de datos, Python, Scikit-learn, junto con otras librerías complementarias para la organización, limpieza y visualización de la información. En una primera etapa, los datos recolectados por los sensores serán preparados y depurados, eliminando valores atípicos y registros incompletos que puedan afectar la calidad del análisis. Posteriormente, se aplicarán modelos de regresión lineal para estudiar la relación entre las variables ambientales (humedad relativa y temperatura relativa) y el comportamiento del proceso de secado.

La aplicación de la regresión lineal y la regresión polinómica multivariable permitió establecer relaciones cuantitativas entre las condiciones ambientales y la evolución del secado del café. Dado que los datos no presentan un comportamiento lineal, se implementó la regresión polinómica multivariable para lograr un ajuste más preciso de la información. A partir de estos modelos se generarán gráficas de ajuste, que servirán como apoyo visual para analizar si el café alcanza los rangos de humedad deseados y para proponer ajustes en los parámetros operativos del prototipo, como el tiempo de exposición, la frecuencia de movimiento del rastrillo mecanizado o las condiciones de ventilación.

Con el fin de garantizar la confiabilidad del análisis, la toma de datos se repetirá bajo condiciones ambientales similares y diferentes escenarios climáticos. Asimismo, se evaluará el comportamiento del modelo al variar las condiciones de entrada, lo que permitirá analizar su robustez y determinar posibles mejoras. De esta manera, los resultados del análisis contribuirán a que los caficultores puedan tomar decisiones informadas orientadas a optimizar el proceso de secado y mejorar la eficiencia del sistema y la calidad final del grano.

3.1.5 *Universo*

Prototipo de secado de café en patio con IoT, que automatiza el uso del rastrillo.

3.1.6 Muestra

La muestra es lo mismo del universo ya que del prototipo se va a realizar la caracterización.

3.2 Técnicas de recolección de información

Observación directa: La observación directa se empleó como técnica principal para el seguimiento del proceso de secado del café en patio, permitiendo analizar de manera continua el comportamiento de las variables ambientales y su relación con el estado del grano. Esta técnica incluyó la inspección visual del café durante el secado, la identificación de cambios en su apariencia física y la correlación de estos cambios con las lecturas obtenidas por los sensores y los instrumentos de medición.

Para la medición de la humedad relativa y la temperatura relativa, se utilizaron sensores digitales BME280, los cuales presentan una adecuada precisión y estabilidad para aplicaciones en exteriores y sistemas IoT. Estos sensores permiten la adquisición simultánea de ambas variables y se integran fácilmente con microcontroladores mediante la interfaz I2C, lo que facilita su implementación en sistemas de monitoreo continuo[15].

Antes de su uso en campo, los sensores fueron verificados y contrastados con instrumentos comerciales, con el fin de asegurar lecturas confiables durante la toma de datos.

Adicionalmente, se empleó un termohigrómetro comercial como instrumento de referencia para validar las mediciones ambientales obtenidas por el sistema IoT. Este dispositivo permitió comparar los valores de humedad y temperatura del ambiente, fortaleciendo la confiabilidad de los datos registrados durante el proceso de secado.

Para complementar la información y evaluar directamente el estado del grano, se utilizó un medidor de humedad de café DH200X, el cual permitió determinar el contenido de humedad del café en diferentes momentos del proceso. Este instrumento es ampliamente utilizado en prácticas agrícolas y resulta fundamental para relacionar las condiciones ambientales con el nivel real de secado del café[14].

3.2.1 Validez de la técnica

La técnica empleada en el presente proyecto corresponde a la medición directa de variables ambientales como la temperatura y la humedad durante el proceso de secado del café. Esta técnica permite obtener datos en tiempo real, lo que facilita la caracterización del comportamiento del secado bajo diferentes condiciones.

La validez de esta técnica se fundamenta en la precisión y confiabilidad de los instrumentos utilizados para la recolección de datos. En este caso, los sensores de humedad presentan una precisión aproximada de $\pm 1.5\%$ en un rango de 0 a 100%, lo que permite un monitoreo adecuado de las condiciones del secado. Asimismo, el uso de instrumentos como cámaras térmicas, con rangos de temperatura que pueden variar entre -10 y 400 °C, complementa la observación del comportamiento térmico del sistema.

De esta manera, la medición directa mediante sensores permite obtener información confiable y continua, lo que garantiza la validez de la técnica aplicada para el análisis del proceso de secado del café.

3.2.2 Confiabilidad de la técnica

La confiabilidad de la técnica empleada se fundamenta en la consistencia del proceso de medición y en la periodicidad de la recolección de los datos. Para el desarrollo del proyecto, los datos fueron recolectados durante un periodo aproximado de seis días por cada municipio, con variaciones mínimas dependiendo de las condiciones de campo.

Las mediciones se realizaron cada dos horas, en un intervalo comprendido entre las 8:00 a.m. y las 6:00 p.m., lo que permitió obtener un conjunto de datos representativo del comportamiento de las variables ambientales a lo largo del día durante el proceso de secado.

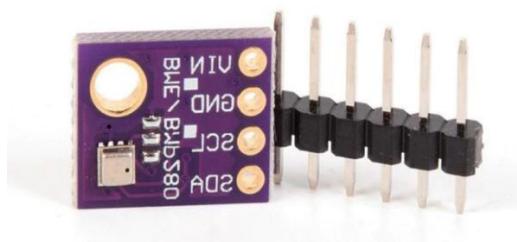
Esta frecuencia de muestreo permitió capturar variaciones en la temperatura y la humedad, asegurando la repetibilidad de las mediciones y reduciendo la posibilidad de errores asociados a la toma de datos. De esta manera, se garantiza la confiabilidad de la técnica aplicada para el análisis del proceso de secado del café.

3.3 Instrumentos de recolección de información

Para el desarrollo del prototipo y la recolección de información se emplearon diversos instrumentos y equipos, tanto en el laboratorio de electrónica de la Universidad CESMAG como en las pruebas realizadas en campo. En primera instancia, se utilizó un multímetro digital para la verificación del sistema electrónico durante las etapas de ensamblaje, validando conexiones, voltajes, corrientes y continuidad, asegurando el correcto funcionamiento de los componentes eléctricos y electrónicos del prototipo. El núcleo del sistema de adquisición de datos estuvo basado en el microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento, versatilidad en la integración con múltiples sensores y conectividad inalámbrica incorporada. Este dispositivo permitió no solo la lectura de las variables ambientales, sino también el procesamiento local de la información y su posterior transmisión hacia plataformas en la nube, facilitando el monitoreo en tiempo real del proceso de secado.

Para la medición de las variables ambientales se emplearon tres sensores digitales BME280 (Bosch Sensortec), dispositivos de bajo costo que integran en un solo encapsulado la medición de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. El sensor presenta un rango de temperatura de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$ con precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ a 25°C , y un rango de humedad relativa de 0% a 100% con precisión de $\pm 3\%$ en el intervalo de 20-80% HR, extendiéndose a $\pm 4\%$ HR fuera de este rango. Esta precisión resulta adecuada para las condiciones del secado en patio en el departamento de Nariño, donde las temperaturas diurnas típicamente oscilan entre 15°C y 35°C y la humedad ambiente varía entre 40% y 90% HR durante el proceso. Los sensores fueron calibrados de fábrica y posteriormente verificados mediante comparación con un termohigrómetro comercial en condiciones controladas de laboratorio, garantizando la confiabilidad de las mediciones antes de su implementación en campo.[16].

Figura 4. sensor digital BME280



Con el fin de validar la confiabilidad de las mediciones obtenidas por el sistema IoT, se utilizaron instrumentos de referencia. Entre ellos, un termohigrómetro comercial, empleado para contrastar las variables ambientales registradas, y un medidor de humedad de café DH200X, utilizado para determinar el contenido real de humedad del grano. Esta comparación permitió establecer una relación entre las condiciones ambientales y el estado interno del café, fortaleciendo la validez de los datos recolectados.

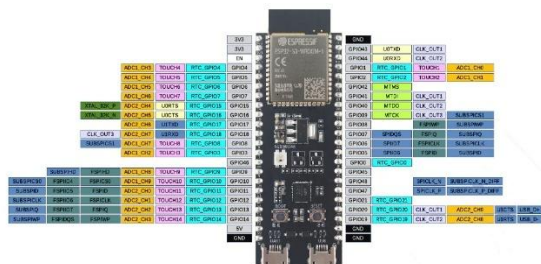
Figura 5. Medidor de humedad DH200X



Adicionalmente, el sistema contempló el uso de plataformas de almacenamiento en la nube para el registro de la información, lo que permitió organizar, almacenar y analizar los datos de manera estructurada. La transmisión de estos datos se realizó a través de la conectividad WiFi del ESP32, garantizando la disponibilidad de la información para su posterior procesamiento.

Finalmente, para asegurar la continuidad en la recolección de datos, se verificó la disponibilidad de conectividad en los entornos de prueba. En aquellos casos donde las condiciones rurales limitaban el acceso a redes inalámbricas estables, las pruebas fueron realizadas en ubicaciones con acceso controlado a WiFi, asegurando la integridad de los datos y la correcta operación del sistema. Esta estrategia permitió obtener información confiable bajo diferentes condiciones, contribuyendo a una adecuada caracterización del proceso de secado del café en patio.

Figura 6. Esp 32 S3 utilizado para recolección y vista de datos

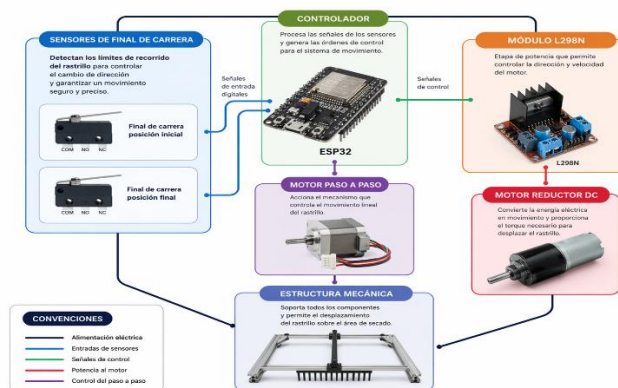


4. Resultados

4.1 Diseño del sistema

El prototipo desarrollado para la caracterización del proceso de secado de café en patio consiste en un sistema mecánico electrónico diseñado para replicar de forma controlada el movimiento de rastrillo que normalmente realizan los caficultores durante el secado. El diseño integra elementos mecánicos, electrónicos y de control, lo que permite recolectar datos de humedad y temperatura en tiempo real y, a su vez, distribuir homogéneamente el café en la superficie de secado.

Figura 7. Esquema prototipo



4.1.1 Diseño mecánico

Como se mencionó previamente, el dispositivo mecánico debe contar con una estructura adecuada para permitir el proceso de secado y la distribución uniforme del café durante el barrido automático. Para ello, antes de construir la versión final en aluminio, se desarrolló un diseño preliminar en SolidWorks que permitió visualizar la geometría general, las dimensiones y la interacción entre los componentes mecánicos. Este modelo inicial fue fundamental para identificar posibles interferencias, validar el espacio disponible para el movimiento del rastrillo y anticipar ajustes necesarios en la transmisión y guías laterales.

Posteriormente, se construyó un primer prototipo físico utilizando madera, con el propósito de evaluar el comportamiento real del sistema, probar el desplazamiento del rastrillo y verificar la estabilidad de la estructura bajo carga. Este prototipo inicial permitió realizar mejoras importantes en la distribución del peso, la alineación de las guías y la selección de materiales. Con base en los resultados obtenidos, se procedió a fabricar la estructura definitiva en aluminio,

la cual ofrece mayor rigidez, menor deformación, mejor durabilidad y una operación más estable durante el proceso de secado automatizado.

Figura 8. Prototipo inicial

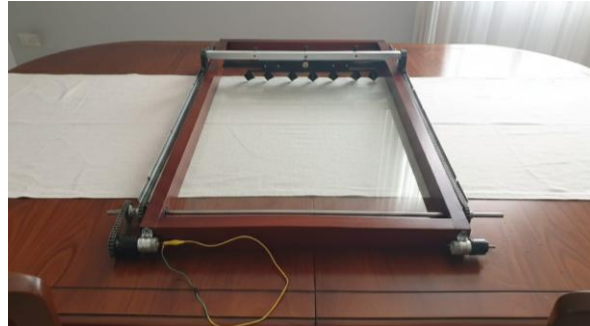


Figura 9. Prototipo final completo



4.1.2 Planos diseño mecánico del rastrillo Solid Works

Después de obtener el prototipo inicial construido en madera y contar con todas las medidas y ajustes necesarios, se realizaron las correcciones pertinentes al diseño preliminar. Con base en estas mejoras, se elaboró el modelo definitivo en SolidWorks, el cual permitió preparar el diseño físico final que posteriormente se fabricó.

Se presentan los planos técnicos del rastrillo mecánico diseñados en SolidWorks, los cuales detallan las dimensiones, materiales y componentes estructurales empleados en la fabricación del prototipo. Este conjunto de planos incluye las vistas frontal, lateral y superior, así como las secciones internas que permiten observar el ensamblaje de los elementos principales como las guías, piñones, cadenas y soportes.

Estos planos fueron fundamentales para garantizar la precisión durante el proceso de manufactura y ensamblaje, asegurando que todas las piezas se ajustaran correctamente al sistema de transmisión y desplazamiento del rastrillo.

estructurales, garantizando un funcionamiento estable y alineado con lo planteado en el diseño original.

4.1.3.1 Estructura base

La estructura base está fabricada en perfiles de aluminio con dimensiones aproximadas de 50 x 100 x 5 cm. Este material fue seleccionado por su buena relación entre rigidez y peso, lo que garantiza estabilidad durante el movimiento y soporta sin deformaciones los aproximadamente 10 kg de café en proceso de secado. Su geometría rectangular facilita la instalación de los demás componentes y asegura que el movimiento lineal se mantenga en un plano uniforme.

Figura 12. Estructura base aluminio



4.1.3.2 Guías laterales

En los laterales de la base se encuentran las guías lineales en aluminio, que dirigen el desplazamiento lineal, de la cadenilla y del rastrillo. Estas guías proporcionan un recorrido estable y evitan que el sistema presente desviaciones durante el movimiento, asegurando que el rastrillo se desplace de forma paralela a la superficie de secado.

Figura 13. Guía

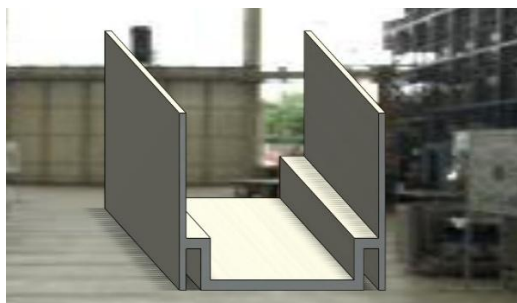
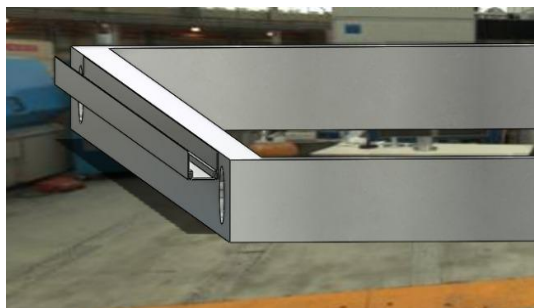


Figura 14. Guía en la estructura



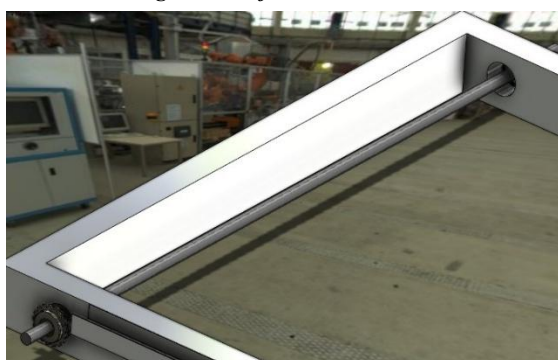
4.1.3.3 Sistema de transmisión

La transmisión está compuesta por una cadena metálica montada en ambos lados y guiada por piñones acoplados a ejes con balineras. Uno de los piñones está conectado al motor DC, transmitiendo el par de manera uniforme a las dos cadenas. Esta configuración garantiza un movimiento sincronizado de ambos extremos del rastrillo y un desplazamiento suave sobre toda la longitud de la estructura.

Figura 15. Eje con balineras y piñones



Figura 16. Eje en la estructura



4.1.3.4 Sistema de rastrillo y soportes

El rastrillo está fabricado en material PETG mediante impresión 3D, con un diseño modular que facilita su reemplazo o modificación. En su parte inferior incorpora puntas tipo

ancla, especialmente diseñadas para penetrar ligeramente en la capa de café y generar un volteo uniforme del grano. Este diseño permite que el café se distribuya de forma homogénea sobre el patio de secado, mejorando la exposición de todos los granos a la radiación solar y reduciendo la formación de acumulaciones que podrían generar fermentación indeseada.

En la parte superior del rastrillo se encuentra la cremallera plástica y el piñón central, que forman el sistema de desplazamiento lateral. Cuando el motor paso a paso es activado, este conjunto mueve el rastrillo en dirección perpendicular a su avance, permitiendo que en cada ciclo el café sea esparcido en una posición ligeramente diferente. Esto asegura que el secado sea uniforme en toda el área de trabajo.

Figura 17. Rastrillo



Por último, el sistema cuenta con soportes y carcazas impresos en 3D, cuya función es fijar los ejes de las cadenas soporte donde va ir todo el rastrillo con una base de aluminio de 2 x2 cm, sostener los finales de carrera y mantener el alineamiento de todo el sistema de guías. Gracias a estos soportes, el rastrillo se mantiene estable durante su desplazamiento, reduciendo vibraciones y evitando desajustes que puedan comprometer la calidad del proceso.

Figura 18. soportes laterales para el rastrillo

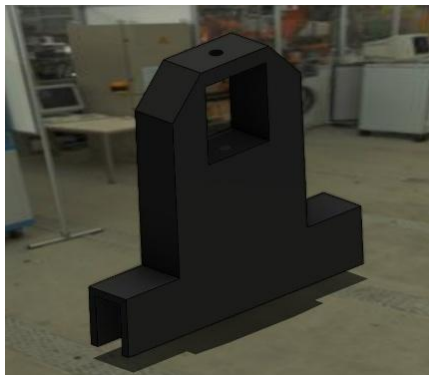
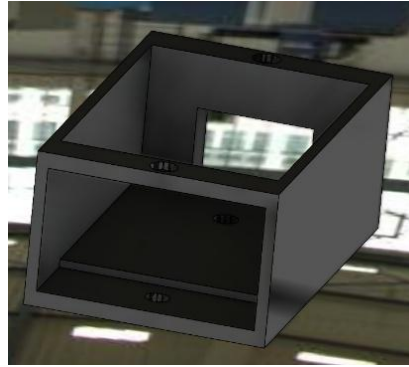


Figura 19 Carcaza protector para los finales de carrera



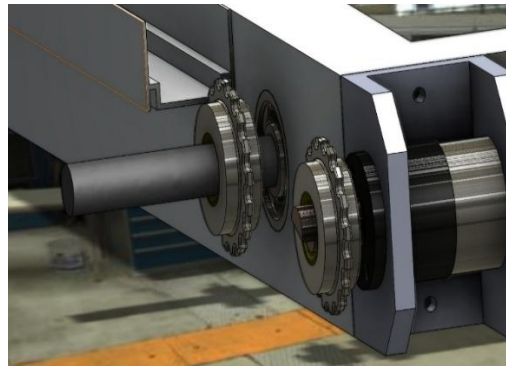
4.1.3.5 Movimiento lineal

El movimiento lineal del sistema es generado por un motor DC de 12 V y 100 RPM con reductor. Considerando los pesos medidos (cadenas: 0,970 kg; rastrillo: 0,500 kg; sujetadores o soportes laterales: 0,230 kg), un coeficiente de fricción del café de 0,30,[17] fricción estructural de 0,05, un radio de piñón de 15 mm y una eficiencia del tren de transmisión del 80 %, el torque requerido para mover el rastrillo con 10 kg de café es aproximadamente 0,2096 N·m.

El motor disponible entrega alrededor de 0,1961 N·m, lo que corresponde a un 93,6 % del torque necesario. En la práctica, esto significa que el motor es capaz de mover el sistema, como se ha comprobado en las pruebas, pero pequeñas variaciones en la fricción o picos de carga podrían generar sobreesfuerzo.

El sentido de giro y la velocidad de este motor son controlados mediante un puente H L298N, el cual recibe las señales de control desde el ESP32 y permite invertir la dirección de avance cuando se detectan los extremos de la trayectoria mediante los finales de carrera.

Figura 20. Motor DC en la estructura



4.1.3.6 Cálculo de torque para el movimiento del rastrillo.

El siguiente cálculo determina el torque necesario para que el motor DC reductor de 12 V pueda mover el sistema mecánico del rastrillo y la carga de café en el prototipo. Se consideran las masas de los componentes principales, el coeficiente de fricción del café, las pérdidas mecánicas y la eficiencia del sistema de transmisión.[18]

Masa del café: 10 kg

Masa de las cadenas: 0,970 kg

Masa del rastrillo: 0,500 kg

Masa de los sujetadores: 0,230 kg

Coeficiente de fricción del café: 0,30

Coeficiente de fricción estructural: 0,05

Radio del piñón: 15 mm (0,015 m)

Eficiencia del sistema de transmisión: 80 %

Torque del motor: $2 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 0,1961 \text{ N} \cdot \text{m}$

El peso total a mover incluye la masa del café y la masa de los elementos móviles:

$$\text{Peso total} = (10 + 0,970 + 0,500 + 0,230) \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 11,7 \text{ kg} \times 9,81 = 114,78 \text{ N}$$

La fricción total equivalente se considera como la suma de la fricción del café y la fricción estructural:

$$\mu_{\text{total}} = 0,30 + 0,05 = 0,35$$

$$F_{\text{fric}} = \mu_{\text{total}} \times \text{Peso total} = 0,35 \times 114,78 = 40,17 \text{ N}$$

El torque requerido para vencer esta fuerza en el piñón de 15 mm de radio es:

$$T_{\text{req}} = F_{\text{fric}} \times r = 40,17 \times 0,015 = 0,6026 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Considerando la eficiencia del 80 %:

$$T_{\text{req_ef}} = T_{\text{req}} / 0,80 = 0,6026 / 0,80 = 0,7533 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Eficiencia y pérdidas:

$$E_{f_T_req} = T_{\text{req}} / T_{\text{motor}} = 0,6026 / 0,1961 = 3,07$$

$$E_{f_T_req_ef} = T_{\text{req_ef}} / T_{\text{motor}} = 0,7533 / 0,1961 = 3,84$$

El motor entrega un torque de $0,1961 \text{ N} \cdot \text{m}$, lo que representa aproximadamente el 32,5 % del torque mínimo requerido sin pérdidas y el 26,0 % considerando la eficiencia del sistema. Esto indica que el motor se encuentra subdimensionado para las condiciones teóricas de operación. Sin embargo, en la práctica, el motor logra desplazar el rastrillo debido a condiciones

dinámicas favorables, menores coeficientes de fricción reales y la naturaleza no rígida del café, lo que reduce la resistencia efectiva del sistema. No obstante, el funcionamiento se da con un margen limitado, por lo que pueden presentarse dificultades ante incrementos de carga o variaciones en las condiciones de operación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda la selección de un motor con mayor capacidad de torque en futuras implementaciones, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema, garantizar un funcionamiento más robusto y aumentar la confiabilidad del proceso ante diferentes condiciones de operación. Ver anexo 4

4.1.3.7 Movimiento lateral

Para el desplazamiento lateral del rastrillo se utiliza un motor paso a paso 28BYJ-48 controlado mediante un driver ULN2003. Este motor mueve la cremallera y el piñón ubicados en el rastrillo, cambiando la posición de las puntas en cada ciclo de ida y vuelta. Su uso garantiza precisión en el posicionamiento, ya que los motores paso a paso se caracterizan por avanzar en pasos discretos que permiten controlar la rotación sin necesidad de sensores adicionales.[19]

La alimentación del sistema está dada por una fuente de 12 V, que entrega la energía necesaria para los motores y el circuito de control. Para adaptar esta tensión a los niveles requeridos por el ESP32 y demás componentes lógicos, se emplea un regulador LM2596, que convierte de manera eficiente los 12 V a 5 V, evitando daños en los circuitos sensibles.

Figura 21. Motor paso a paso acoplado al rastrillo

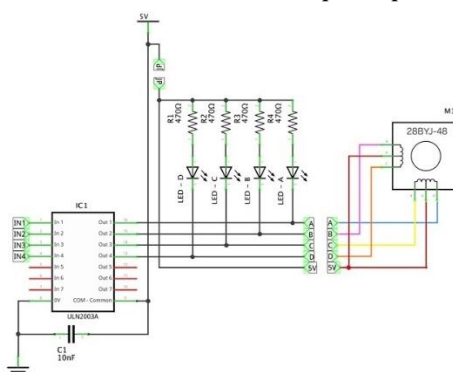


4.1.3.8 Motor paso a paso 28BYJ-48

El motor paso a paso 28BYJ-48 es ideal para mover las puntas tipo rastrillo en tu sistema de café porque ofrece control preciso, torque suficiente y bajo consumo. Gracias a su caja reductora interna de 1:64, puede generar buena fuerza a bajas velocidades, lo que permite desplazar el rastrillo suavemente sin mecanismos adicionales.[19] Su funcionamiento por pasos garantiza que cada posición sea exacta y repetible, evitando desalineaciones durante el proceso.

Además, al mantener su posición cuando se detiene, no necesita frenos ni sensores de realimentación. Su alimentación de 5 V y consumo reducido lo hacen eficiente y compatible con sistemas pequeños o alimentados por energía solar. En conjunto con el driver ULN2003A, se obtiene una interfaz robusta, simple de controlar desde un microcontrolador y con protección contra picos inductivos. En resumen, este motor es una solución compacta, precisa y económica para automatizar el movimiento lateral del rastrillo en el manejo del café.

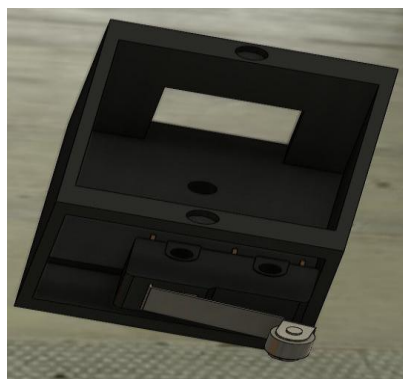
Figura 22. Driver controlador del motor paso a paso 28BYJ-48



4.1.3.9 Sensores

Para garantizar un funcionamiento seguro, el sistema cuenta con dos sensores de final de carrera, instalados en los extremos de la estructura. Estos interruptores envían señales al microcontrolador cuando el rastrillo alcanza los límites de su recorrido, provocando la detención inmediata del motor DC y la activación de los tiempos de espera programados.

Figura 23. Final de carrera



4.1.3.10 Carrete transportador

Finalmente, se incluye un carrete transportador de cable, encargado de enrollar y desenrollar el cableado que conecta el motor paso a paso al ESP32 y también los sensores de humedad que van hacer el monitoreo IoT hacia otro esp32. Esto evita enredos y tensiones en los cables durante el movimiento continuo del rastrillo, prolongando la vida útil del sistema eléctrico.

Figura 24. Carrete



4.1.4 Diseño ensamblado del prototipo

Figura 25. Diseño prototipo ensamblaje

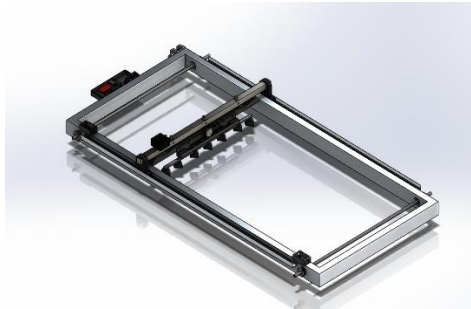


Figura 26. Diseño prototipo

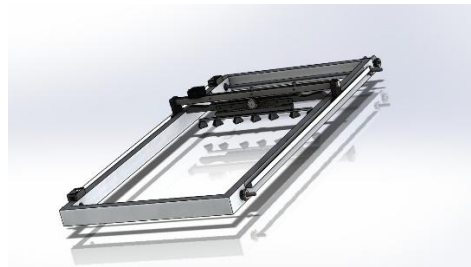
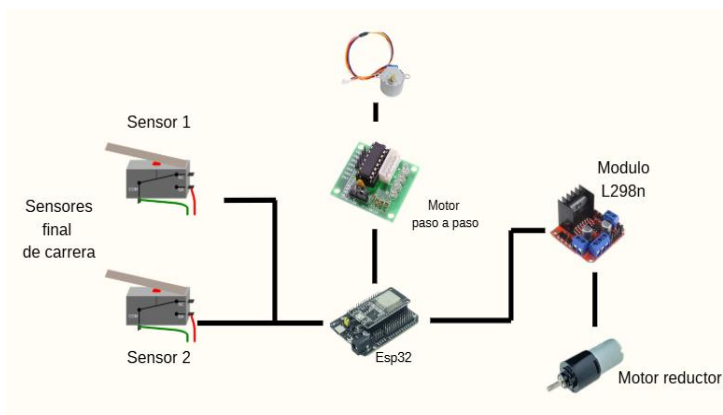


Figura 28. Circuito electrónico



4.2.2 Diseño firmware de la parte electrónica

El software desarrollado para el prototipo tiene como objetivo coordinar el movimiento del rastrillo, gestionar los tiempos de espera y controlar el desplazamiento lateral de las puntas. Fue programado en lenguaje Arduino IDE, utilizando la plataforma de desarrollo del ESP32.

4.2.2.1 Funcionamiento del sistema

El bucle principal controla el motor DC para mover el rastrillo hacia adelante o hacia atrás según la variable de dirección. Cuando uno de los sensores de final de carrera detecta que el rastrillo ha llegado a un extremo, el sistema detiene el motor y activa un tiempo de espera programado. Esto permite que el café repose antes de realizar un nuevo barrido, favoreciendo la eficiencia del secado.

Una vez transcurrido el tiempo de espera, el programa acciona el motor paso a paso 28BYJ-48, moviendo el rastrillo lateralmente mediante la cremallera y el piñón central. De esta manera, en cada ciclo se cambia ligeramente la trayectoria del barrido, asegurando que todo el café reciba exposición uniforme a la radiación solar. Posteriormente, el software invierte la dirección de avance y reinicia el ciclo.

El sistema está diseñado para funcionar de forma continua y autónoma, manteniendo un patrón de movimiento repetitivo con pausas controladas. La implementación de variables de tiempo configurables permite ajustar el intervalo de espera de acuerdo con las condiciones de secado y el tipo de café, ofreciendo flexibilidad al usuario.

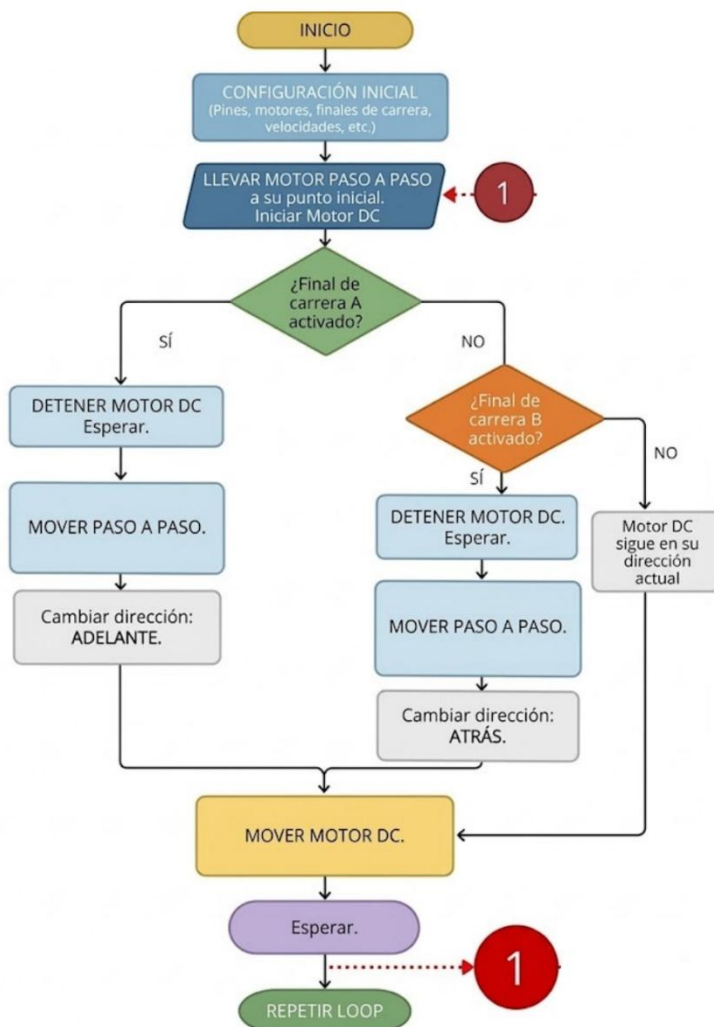
Para garantizar la seguridad, el código detiene de inmediato el motor DC al detectar un final de carrera, evitando sobreesfuerzos mecánicos o posibles desajustes. El uso de funciones específicas para mover, detener y cambiar de dirección simplifica la lógica de control y facilita futuras modificaciones o integraciones con sensores adicionales.

4.2.3 Control de movimiento

El diagrama muestra la lógica de control del sistema: el rastrillo avanza o retrocede según la dirección, se detiene al llegar a un final de carrera, espera un tiempo programado, luego el motor paso a paso lo desplaza lateralmente y se invierte la dirección para repetir el ciclo.

4.2.4 Funcionamiento movimiento de control

Figura 29. Diagrama de flujo control de movimiento



4.2.4.1 Control de movimiento del rastrillo

Este código controla un sistema que utiliza un motor DC y un motor paso a paso para mover un mecanismo, como un rastrillo, de un extremo a otro de forma automática. El motor DC es el encargado de realizar el movimiento lineal hacia adelante y hacia atrás, mientras que el motor paso a paso cambia la orientación de las paletas o puntas del mecanismo cuando se llega a los límites del recorrido, definidos por dos sensores de fin de carrera.

Este esquema corresponde a un diseño inicial de control, planteado principalmente para probar el funcionamiento mecánico del rastrillo, la coordinación entre motores y la correcta detección de los finales de carrera. A partir de este diseño base, el sistema puede ser ajustado y optimizado posteriormente según los requerimientos del proceso de secado y el comportamiento observado en campo.

Primero, el código define las conexiones eléctricas de los componentes: las salidas del puente H para controlar el motor DC, los pines de los sensores de fin de carrera (FC_A y FC_B) y las entradas del motor paso a paso 28BYJ-48 conectado a través del controlador ULN2003. También se crean variables para ajustar la velocidad del motor DC, el número de pasos que debe dar el motor paso a paso para girar media vuelta y una variable booleana que indica la dirección del movimiento.

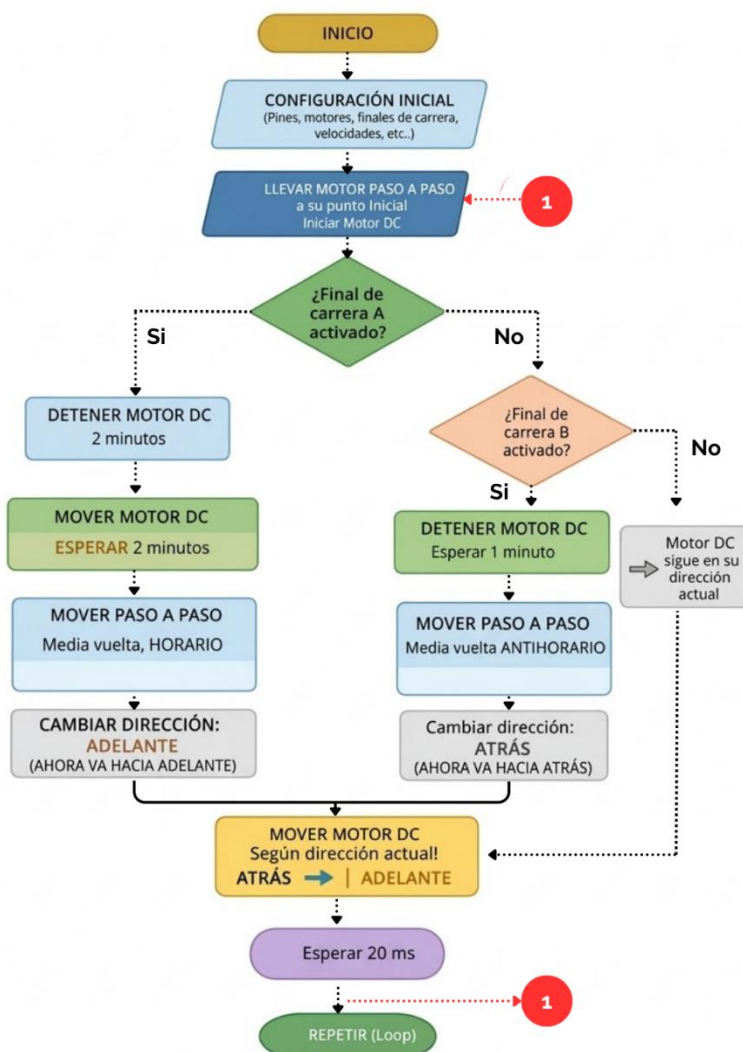
En la función setup(), se configuran los pines de entrada y salida, se establece la velocidad del motor paso a paso y se inicializa la comunicación serial. El sistema comienza detenido y realiza un pequeño ajuste inicial, moviendo el motor paso a paso hacia su posición de partida antes de iniciar el movimiento principal.

Durante la ejecución del loop(), el programa lee constantemente los sensores de fin de carrera. Si el sensor FC_A detecta que el rastrillo llegó al extremo izquierdo, el motor DC se detiene, el motor paso a paso realiza media vuelta en sentido horario para cambiar la posición de las paletas y la dirección del movimiento se invierte. Si el sensor FC_B se activa, ocurre el mismo proceso, pero con el motor paso a paso girando en sentido antihorario.

Luego de realizar el giro correspondiente, el motor DC se reactiva y el sistema continúa su desplazamiento en la nueva dirección. Este ciclo se repite de forma continua, permitiendo que el mecanismo se mueva de un extremo al otro sin intervención manual. Un pequeño retardo evita lecturas erróneas en los sensores por rebotes eléctricos, garantizando una detección estable. Ver anexo 3 y 4.

4.2.5 Movimiento de control con intervalo de tiempos

Figura 30. Diagrama de flujo control de movimiento por tiempo



4.2.5.1 Control de movimiento de desplazamiento con intervalo de tiempos

Este código controla el movimiento del sistema de rastrillo automatizado incorporando intervalos de tiempo entre cada ciclo de desplazamiento, con el fin de adaptar el rastrillado a las condiciones reales del proceso de secado. A diferencia de un movimiento continuo, este enfoque permite ajustar la frecuencia de rastrillado según variables ambientales como la humedad y la temperatura, evitando un volteo excesivo del café cuando aún se encuentra muy húmedo.

El sistema coordina un motor DC, encargado del desplazamiento lineal del rastrillo, y un motor paso a paso, que modifica la orientación de las puntas al llegar a los extremos del recorrido, detectados por sensores de fin de carrera. En el código se definen las conexiones de estos componentes, junto con parámetros como la velocidad del motor DC, el número de pasos del motor paso a paso y los tiempos de espera programados en cada extremo.

Durante la ejecución, el rastrillo inicia su movimiento en un sentido (por ejemplo, de izquierda a derecha) hasta activar el sensor de fin de carrera. En este punto, el motor DC se detiene y se ejecuta un tiempo de espera previamente definido, por ejemplo, entre 5 y 10 minutos, dependiendo de las condiciones del secado. Este intervalo permite que el café permanezca en reposo para favorecer la evaporación de la humedad.

Finalizado el tiempo de espera, el motor paso a paso gira para cambiar la orientación del rastrillo, y posteriormente el motor DC invierte su sentido de giro (de derecha a izquierda), iniciando un nuevo ciclo de desplazamiento hasta el otro extremo, donde el proceso se repite.

Este esquema de control permite regular claramente los ciclos de movimiento (avance–pausa–retorno), asegurando un desplazamiento bidireccional controlado y ajustando los tiempos de espera según el estado del café y las condiciones climáticas, lo que mejora la eficiencia del proceso de secado.

4.3 Construcción del dispositivo IoT versión 1

El dispositivo IoT fue construido con una arquitectura basada en el microcontrolador ESP32-S3, elegido por su capacidad de procesamiento, estabilidad de conexión y buen desempeño en entornos con señal Wi-Fi limitada, como las zonas rurales donde se realiza el secado del café.[20]

La selección de este microcontrolador permitió garantizar la transmisión continua de los datos durante las pruebas en campo, lo que resulta fundamental para evitar pérdidas de información y asegurar la confiabilidad en el análisis del proceso de secado.

Para la medición de las variables ambientales se emplearon tres sensores BME280, distribuidos estratégicamente: dos ubicados en los extremos y uno en el centro de una muestra de 10 kg de café, con el fin de registrar datos representativos de temperatura, humedad y presión atmosférica directamente sobre el producto en secado. Adicionalmente, se integró un sensor DHT22, encargado de monitorear las condiciones ambientales generales del entorno de secado,

permitiendo comparar las variaciones entre el ambiente y el grano.

Esta distribución de sensores permitió identificar diferencias de humedad y temperatura dentro de la masa de café, evidenciando que el proceso de secado no es uniforme en toda la muestra. Asimismo, la comparación entre el ambiente y el interior del grano facilitó analizar la influencia directa de las condiciones externas en la velocidad de secado.

El sistema cuenta con una placa PCB personalizada, diseñada para integrar de forma ordenada y eficiente los sensores, la fuente de alimentación y el microcontrolador, optimizando el cableado y la estabilidad eléctrica del conjunto.

Esto contribuyó a reducir interferencias y errores en la lectura de los sensores, mejorando la calidad de los datos recolectados, lo cual es clave para un análisis confiable del comportamiento del secado.

Esta versión del dispositivo IoT permite una lectura rápida y estable de las condiciones del ambiente, con una frecuencia configurable de hasta una lectura por segundo, posibilitando el registro continuo de datos que posteriormente se emplean para la caracterización del proceso de secado del café.

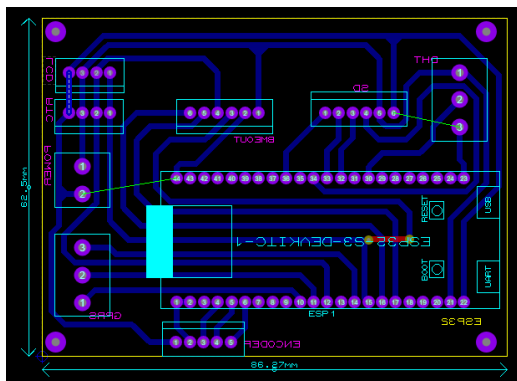
La alta frecuencia de muestreo permitió capturar variaciones rápidas en las condiciones ambientales, lo que facilita un análisis más detallado del proceso y una mejor comprensión de cómo factores como la radiación solar o cambios climáticos afectan la dinámica del secado.

4.3.1 *Diseño y construcción de placa PCB*

Como parte del proceso de desarrollo del dispositivo, se diseñó una placa de circuito impreso destinada a integrar los sensores BME280, el microcontrolador ESP32-S3 y los módulos de alimentación en una sola tarjeta compacta. Este diseño se realizó utilizando el software Proteus, el cual permitió la elaboración del esquema electrónico y el diseño de las pistas de la PCB de manera precisa. Este diseño permite reducir el cableado, mejorar la estabilidad eléctrica y facilitar el montaje del sistema en campo.

La integración de todos los componentes en una sola placa permitió disminuir pérdidas de señal y posibles fallas por conexiones externas, lo que contribuye directamente a obtener datos más estables y confiables durante el proceso de secado.

Figura 31. Circuito para dispositivo IoT



En las figuras 33 y 34 se muestran la vista de capas y la distribución tridimensional del diseño, donde se aprecian las conexiones internas, las zonas de alimentación y las líneas de comunicación entre los sensores y el microcontrolador.

Estas representaciones permiten verificar la correcta distribución de los componentes y evidencian una organización adecuada del sistema electrónico, lo que favorece un funcionamiento eficiente y reduce la probabilidad de errores en la transmisión de datos.

Durante el proceso constructivo se consideraron factores como la separación entre pistas, la ubicación de los conectores, el espesor del cobre y la disipación térmica, con el fin de garantizar una operación confiable y segura. Una vez completado el diseño, la placa se fabricó mediante técnicas de fotograbado y perforado, y posteriormente se procedió al montaje de los componentes electrónicos.

La consideración de estos parámetros permitió minimizar interferencias eléctricas y problemas de sobrecalentamiento, asegurando la estabilidad del sistema durante largas jornadas de adquisición de datos en condiciones reales de operación.

Este diseño modular de PCB facilita el reemplazo o actualización de los sensores, asegurando la escalabilidad del sistema y permitiendo su uso en futuros ensayos o integraciones con nuevos dispositivos IoT.

Esto representa una ventaja importante, ya que el sistema puede adaptarse a nuevas necesidades de medición o mejoras tecnológicas, ampliando su aplicabilidad en estudios posteriores del proceso de secado del café.

Figura 32. Circuito Pistas en 3D

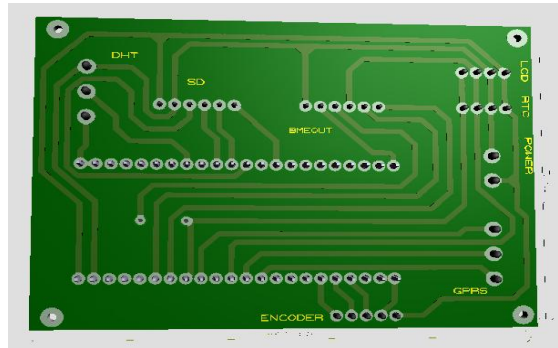
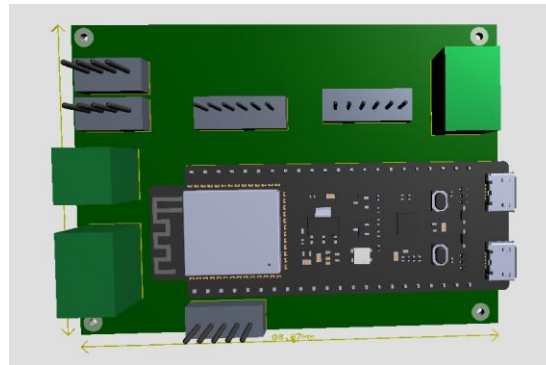


Figura 33. Vista 3D componentes



4.3.2 Componentes utilizados para el dispositivo IoT

El prototipo IoT emplea una serie de componentes seleccionados por su eficiencia, precisión y compatibilidad con el entorno de trabajo. A continuación, se describen brevemente los principales elementos del sistema:

4.3.2.1 Microcontrolador Esp32 – S3

Actúa como el núcleo de procesamiento y control del sistema. Gestiona la comunicación con los sensores, el almacenamiento de datos y la transmisión inalámbrica mediante conexión Wi-Fi. Su arquitectura de doble núcleo y bajo consumo lo hace ideal para aplicaciones IoT rurales. [20]

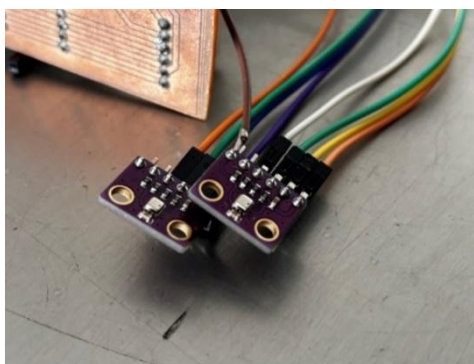
4.3.2.2 Sensores BME280

Actúa como el núcleo de procesamiento y control del sistema. Gestiona la comunicación con los sensores, el almacenamiento de datos y la transmisión inalámbrica mediante conexión Wi-Fi. Su arquitectura de doble núcleo y bajo consumo lo hace ideal para aplicaciones IoT rurales.

El microcontrolador ESP32-S3 inicia el ciclo estableciendo la comunicación con los sensores BME280 distribuidos en el área de secado. Una vez obtenidas las lecturas de temperatura, humedad y presión atmosférica, los datos son procesados y almacenados en una tarjeta de memoria micro SD.

El sistema realiza este proceso de forma cíclica, permitiendo un monitoreo continuo de las condiciones del ambiente. Estas mediciones sirven como base para la caracterización del proceso de secado y, en etapas posteriores, podrán emplearse para implementar estrategias de control automatizado basadas en variaciones de temperatura y humedad.

Figura 34. Integración Sensores BME280



4.3.2.3 Fuente de Alimentación 12 V / 2 A

Proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del microcontrolador y los sensores. El sistema incluye una etapa reguladora que convierte la tensión a 5 V y 3,3 V según las necesidades de los componentes.

4.3.2.4 Regulador LM2596

Módulo reductor de voltaje tipo buck converter encargado de estabilizar la alimentación a 5 V para el ESP32-S3 y demás circuitos de control. Permite mantener la eficiencia energética del sistema y proteger los componentes contra sobrecargas.

4.3.2.5 Cables, conectores y pines tipo Dupont

Empleados para realizar las conexiones eléctricas entre la PCB, los sensores y el módulo de control. Su uso facilita el mantenimiento y la sustitución de componentes.

4.3.2.6 Rotary Encoder

Dispositivo de entrada rotativo utilizado para la selección y navegación dentro del menú de configuración del sistema. Permite al usuario ajustar parámetros como intervalos de muestreo o calibración de sensores de manera práctica y precisa, sin necesidad de una interfaz compleja.

4.3.2.7 *Sensor DHT22*

Sensor digital de alta precisión empleado para la medición adicional de temperatura y humedad. Se utiliza como referencia para comparar y verificar la exactitud de las lecturas obtenidas por los sensores BME280, reforzando la confiabilidad del sistema de monitoreo.

4.3.2.8 *RTC DS1307 (Reloj de Tiempo Real)*

Módulo encargado de mantener el registro de fecha y hora. Permite asociar cada lectura de los sensores a una marca temporal exacta, facilitando la organización de los datos y el análisis del comportamiento del secado a lo largo del tiempo.

4.3.3 *Funcionamiento del dispositivo IoT*

El sistema fue programado en el entorno Arduino IDE, para el control del microcontrolador ESP32-S3. El código desarrollado permite la lectura secuencial de los sensores BME280 distribuidos en el área de secado, el procesamiento de las variables medidas de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y la visualización de los datos en una pantalla LCD 16x2, donde se muestran las condiciones registradas en tiempo real.

Este funcionamiento permite un monitoreo inmediato del estado del proceso de secado, facilitando la identificación de cambios en las variables ambientales que pueden afectar la calidad del grano.

El funcionamiento del programa inicia con la configuración de los pines y la inicialización de los sensores mediante la comunicación I2C. Una vez establecida la comunicación, el microcontrolador ejecuta un bucle continuo (loop) en el que se adquieren los datos de los tres sensores instalados en el sistema. Estos valores se almacenan temporalmente y se actualizan de forma periódica en la pantalla, mostrando las lecturas promedio y las variaciones entre los puntos de medición.

La obtención de promedios y variaciones entre sensores permitió evidenciar diferencias en la distribución de temperatura y humedad dentro de la masa de café, lo que confirma que el secado no ocurre de manera uniforme y depende de la ubicación del grano dentro del sistema.

El código también incorpora la lectura de un Rotary Encoder, el cual permite al usuario interactuar con el sistema a través de un menú sencillo. Este menú facilita la selección de diferentes modos de visualización o la calibración de los sensores, sin necesidad de una interfaz externa.

Esta interacción directa mejora la usabilidad del sistema en campo, permitiendo realizar ajustes rápidos durante las pruebas, lo que contribuye a una mejor adaptación del sistema a las condiciones reales del proceso de secado.

Además, el programa está estructurado para permitir la expansión del sistema, pudiendo integrarse en el futuro módulos adicionales para la transmisión de datos o el control automático del movimiento del prototipo. Este diseño modular garantiza la flexibilidad del software y su adaptación a nuevas pruebas o configuraciones del proceso de secado.

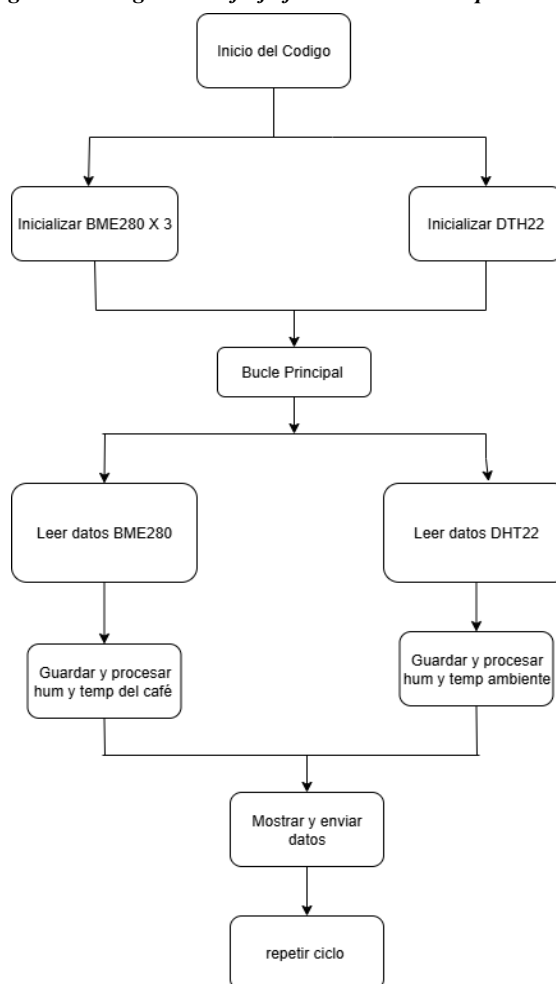
Esta característica resulta clave para la evolución del sistema, ya que permite incorporar mejoras sin rediseñar completamente el software, facilitando futuras investigaciones orientadas a optimizar el control y monitoreo del secado del café.

4.3.3.1 Diagrama de funcionamiento

El microcontrolador ESP32-S3 inicia el ciclo estableciendo la comunicación con los sensores BME280 distribuidos en el área de secado. Una vez obtenidas las lecturas de temperatura, humedad y presión atmosférica, los datos son procesados y almacenados temporalmente en la memoria interna del microcontrolador.

El sistema realiza este proceso de forma cíclica, permitiendo un monitoreo continuo de las condiciones del ambiente. Estas mediciones sirven como base para la caracterización del proceso de secado y, en etapas posteriores, podrán emplearse para implementar estrategias de control automatizado basadas en variaciones de temperatura y humedad.

Figura 35. Diagrama de flujo funcionamiento dispositivo IoT



4.3.4 Integración y Ensamblaje de Componentes en la PCB

Una vez diseñada y fabricada la placa PCB, se procedió al montaje de los diferentes componentes electrónicos que conforman el dispositivo IoT. En este proceso se integraron el microcontrolador ESP32-S3, los sensores BME280 y DHT22, el módulo RTC DS1307, el Rotary encoder, el regulador LM2596, así como los conectores y terminales necesarios para la alimentación y comunicación entre módulos. Adicionalmente, se incorporó una antena externa conectada al ESP32-S3, destinada a mejorar la calidad de la comunicación inalámbrica del sistema.

El ensamblaje se realizó de manera manual, asegurando una correcta orientación de los componentes, la calidad de las soldaduras y la continuidad de las pistas. Se verificaron las

conexiones críticas de alimentación y comunicación I2C mediante pruebas de continuidad y revisión visual.

Figura 36. Placa PCB terminada

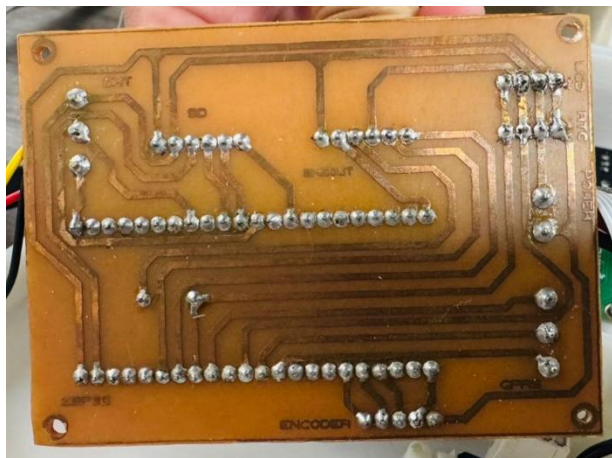
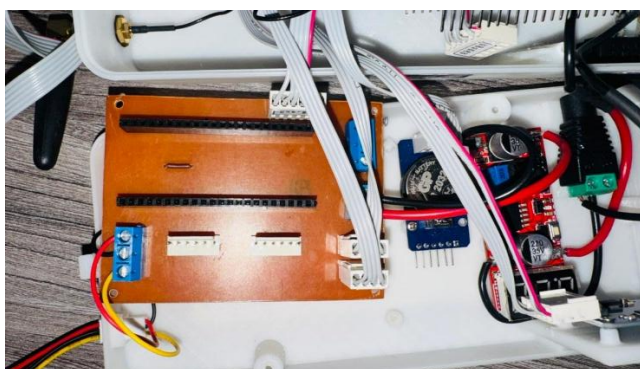


Figura 37. Placa PCB Ensamblada



Durante la etapa de integración se priorizó la organización del cableado y la disposición ergonómica de los componentes sobre la placa, con el objetivo de facilitar su acceso para futuras calibraciones o mantenimientos. Además, se realizaron pruebas eléctricas iniciales para comprobar el correcto funcionamiento del regulador de voltaje y la detección de los sensores por parte del microcontrolador.

El módulo RTC DS1307 fue incorporado con el propósito de proporcionar un registro preciso de fecha y hora en cada medición realizada por el sistema. Este componente permite mantener la información temporal incluso cuando el dispositivo se encuentra apagado, gracias a su batería interna, lo que resulta fundamental para la trazabilidad de los datos y el análisis del comportamiento del secado del café a lo largo del tiempo.

En el desarrollo del proyecto, las mediciones fueron registradas con una periodicidad de cada dos horas, en un intervalo comprendido entre las 8:00 a.m. y las 6:00 p.m., lo que permitió

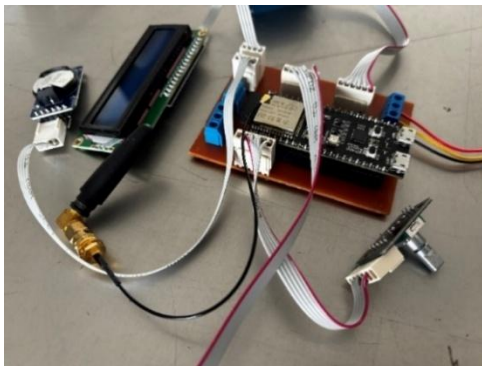
asociar cada dato con su respectiva marca temporal. Esta información facilita el análisis de la variación de las condiciones ambientales a lo largo del día.

El módulo RTC DS1307 opera mediante comunicación I2C y cuenta con una precisión adecuada para aplicaciones de monitoreo, permitiendo llevar un control continuo del tiempo con bajo consumo energético.

La antena utilizada opera en la banda de 2.4 GHz, correspondiente a la conectividad WiFi del ESP32-S3, y permite una distancia de transmisión aproximada de 10 a 30 metros en entornos con obstáculos, y hasta 50 metros en condiciones abiertas, lo cual resulta adecuado para las pruebas realizadas tanto en laboratorio como en campo.

El resultado de esta etapa fue una placa funcional, compacta y estable, que centraliza todos los elementos del sistema IoT en una estructura electrónica eficiente, optimizando tanto el espacio como la confiabilidad del dispositivo. Esto permitió garantizar un funcionamiento estable del sistema durante la recolección de datos, asegurando mediciones confiables que son fundamentales para el análisis del proceso de secado del café.

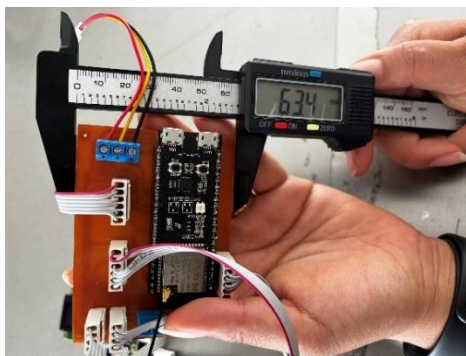
Figura 38. Ensamblaje del dispositivo IoT



4.3.5 Diseño de la carcasa del dispositivo IoT

Para proteger los componentes electrónicos y facilitar la instalación del sistema en campo, se diseñó una carcasa personalizada que permite alojar el microcontrolador, los sensores, el regulador de voltaje y la pantalla de visualización. El diseño priorizó la seguridad del sistema frente a las condiciones ambientales presentes durante el proceso de secado del café, garantizando estabilidad y accesibilidad a los módulos internos.

Figura 39. Toma de medidas para la carcasa



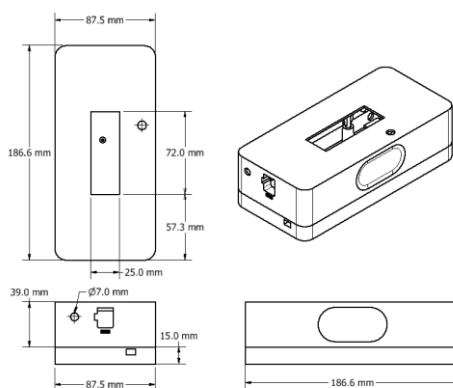
La carcasa fue fabricada mediante impresión 3D en material PLA, lo que permitió obtener una estructura ligera, resistente y ajustada a las dimensiones del dispositivo. En la parte frontal se dispuso una pantalla LCD 16x2 para la visualización de las variables medidas (temperatura, humedad y presión), junto con un espacio destinado al Rotary encoder, que permite la navegación dentro del menú del sistema.

Asimismo, se añadieron orificios de ventilación y zonas de acceso que facilitan el mantenimiento o la sustitución de componentes cuando sea necesario. El resultado fue un modelo compacto, funcional y portátil, adecuado tanto para pruebas de laboratorio como para su instalación en entornos agrícolas.

4.3.5.1 Características Físicas y Dimensiones de la Carcasa

La carcasa del dispositivo IoT presenta un diseño compacto y funcional que facilita el montaje y la protección de los componentes electrónicos. Su estructura tiene dimensiones aproximadas de 12 cm de largo, 8 cm de ancho y 6 cm de altura, medidas que se ajustan al tamaño de la PCB y a la disposición interna de los módulos.

Figura 40. Dimensiones de la carcasa



Estas características hacen de la carcasa un elemento clave para garantizar la durabilidad, portabilidad y funcionalidad del dispositivo IoT, adaptándose tanto a condiciones de laboratorio como a pruebas en campo.

4.3.5.2 *Diseño de Carcasa para Sensores*

Además de la carcasa principal del dispositivo IoT, se diseñaron carcasas individuales para los sensores ambientales tanto como el sensor DTH22 y los sensores BME280, con el objetivo de proteger los módulos de medición y garantizar lecturas precisas en condiciones de campo. Estas estructuras fueron elaboradas mediante impresión 3D en material PLA, lo que permite un diseño liviano, resistente y adaptable a diferentes ubicaciones dentro del área de secado.

Cada carcasa está conformada por una base de soporte y una tapa superior desmontable, que facilita el mantenimiento o reemplazo de los sensores sin comprometer la integridad del sistema. Se añadieron aberturas laterales que permiten la correcta circulación del aire alrededor del sensor, asegurando una respuesta más rápida a los cambios de temperatura y humedad ambiental.

Figura 41. Dimensiones carcasa sensor DTH22

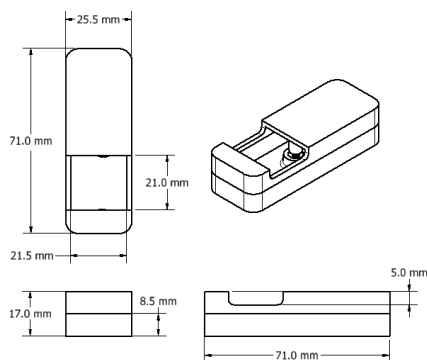
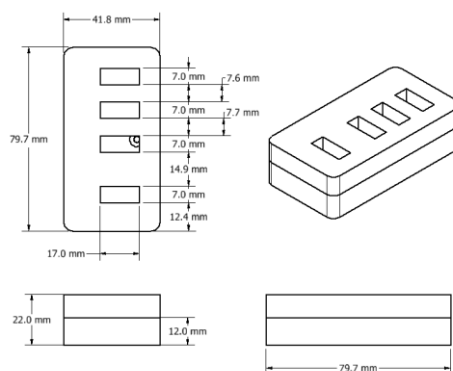


Figura 42. Dimensiones carcasa para sensores BME280



4.3.6 Impresión 3D de carcasas para dispositivo IoT

Una vez finalizado el diseño de las carcasas, se procedió a su fabricación mediante impresión 3D utilizando material PLA. Este filamento fue seleccionado por su facilidad de impresión, buena resistencia y acabado superficial, características que lo hacen ideal para prototipos y carcasas de dispositivos electrónicos. La impresión 3D permitió obtener una carcasa precisa y adaptada a las dimensiones de los componentes, facilitando así su ensamblaje y verificación funcional.

Figura 43. Impresión en 3D carcasa



4.3.7 Ensamblaje completo dispositivo IoT

Una vez obtenida la carcasa impresa en 3D, se procedió a realizar el acoplamiento de todos los componentes electrónicos en su interior. Durante este proceso, se verificó que cada elemento encajara correctamente en su respectivo espacio, sin presentar interferencias ni holguras. El ensamblaje se realizó de manera sencilla y eficiente, confirmando que el diseño de la carcasa se ajustaba perfectamente a las dimensiones y requerimientos de los componentes.

Figura 44. Ensamblaje completo dispositivo IoT



4.3.7.1 Ensamblaje final y prueba de funcionamiento

Una vez ensamblado el dispositivo IoT, que integra la placa PCB, los sensores y la carcasa protectora, el sistema opera de manera autónoma realizando la adquisición y visualización de las variables ambientales relacionadas con el proceso de secado del café.

El funcionamiento inicia con la alimentación del sistema mediante una fuente de 12 V, la cual es regulada a 5 V y 3.3 V a través del módulo LM2596, proporcionando energía estable al microcontrolador ESP32-S3 y a los demás componentes electrónicos.

El ESP32-S3 controla el ciclo de lectura de los sensores: los tres BME280, encargados de medir temperatura, humedad relativa, y el DHT22, que registra las condiciones del ambiente general. Las lecturas se realizan de forma continua mediante comunicación I2C, garantizando la sincronización entre los diferentes puntos de medición[21]

Cada lectura se procesa en el microcontrolador y se muestra en la pantalla LCD 16x2, que actualiza los valores en tiempo real. A través del rotary encoder, el usuario puede navegar dentro del menú del sistema, seleccionar parámetros de visualización o ejecutar funciones de calibración.

El dispositivo cuenta además con un módulo RTC DS1307, que mantiene el registro de fecha y hora, permitiendo que cada dato medido se asocie a una marca temporal. Esto facilita el análisis posterior del comportamiento térmico e higrométrico durante el proceso de secado.

Toda la electrónica se encuentra contenida dentro de una carcasa impresa en 3D, diseñada para proteger el circuito y permitir un acceso sencillo a los puertos, la pantalla y el control de menú. En paralelo, los sensores se instalan en carcasas individuales que favorecen la circulación del aire, asegurando mediciones precisas sin interferencia externa.

Este funcionamiento integral permitió obtener un sistema estable y autónomo para la recolección de datos en tiempo real, lo que facilita el seguimiento continuo del proceso de secado y permite analizar de manera más precisa la relación entre las condiciones ambientales y la variación de la humedad en el café.

Figura 45. Dispositivo IoT



En conjunto, el sistema IoT ofrece un funcionamiento estable, compacto y práctico para el monitoreo continuo de las condiciones ambientales y del café durante el secado, permitiendo registrar información confiable para su posterior análisis y modelado.

Se llevaron a cabo diversas pruebas de funcionamiento para asegurar el correcto desempeño del dispositivo. Estas pruebas permitieron verificar que todos los sistemas operaban de acuerdo con lo esperado y que la carcasa proporcionaba la protección y estabilidad necesarias para el conjunto. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, validando tanto el diseño como la fabricación de la carcasa y el ensamblaje de los componentes.

Figura 46. Funcionamiento dispositivo IoT



4.4 Pruebas de funcionamiento del dispositivo IoT

Con el fin de validar el funcionamiento del prototipo y obtener una primera aproximación del comportamiento del secado, se realizaron pruebas comparativas bajo dos escenarios: dentro de un establecimiento oficina y al aire libre con exposición al sol. Asimismo, se evaluaron dos tipos de muestras: café pergamino seco y café pergamino ligeramente mojado.

Para ello se usaron dos sensores: S1: sensor ubicado en el ambiente (condiciones externas). S2: sensor ubicado directamente en el café (condiciones internas del grano).

Los resultados permiten observar cómo la humedad y la temperatura del grano se comportan de forma distinta frente al ambiente, dependiendo del lugar y de la condición inicial del café.

4.4.1 *Café pergamino seco*

En la primera fase, los sensores se instalaron en un ambiente controlado bajo techo, simulando las condiciones de almacenamiento o secado en espacios semicerrados.

El sensor S2, inmerso en la muestra de café, registró la temperatura y humedad interna de los granos. El sensor S1, expuesto al ambiente, registró las condiciones del aire del establecimiento.

Esta comparación permitió observar las diferencias entre el microclima que se genera en el interior del café y las condiciones generales del entorno cerrado.

Figura 47. Sensores



4.4.1.1 *Toma de datos establecimiento cerrado*

Los valores de humedad en el café (S2) oscilaron entre 75,5 % y 79,3 % en promedio, mientras que la humedad ambiente registrada por S1 fue menor (51,9 % a 55,6 %). La temperatura interna del café permaneció estable alrededor de 20,7 – 20,8 °C, frente a una temperatura ambiente de 22,3 °C. Estos datos se evidencian en la figura 47.

Esto evidencia que, en un ambiente cerrado, el café mantiene una mayor humedad relativa en su interior respecto al aire circundante, con temperaturas muy cercanas.

Figura 48. Toma de datos en establecimiento cerrado



4.4.1.2 Toma de datos al aire libre

La humedad interna del café descendió hasta valores entre 50,7 % y 60 % en promedio, en comparación con una humedad ambiente registrada por S1 de 42,9 % a 44,6 %. La temperatura del grano se estabilizó en torno a 23,3 – 23,6 °C, ligeramente inferior a la temperatura ambiente de 24,6 °C.

Estos resultados indican que en campo el café libera humedad de manera más rápida debido a la radiación solar y circulación del aire, presentando diferencias más marcadas respecto al ambiente.

Figura 49. Toma de datos en campo



4.4.2 Café pergamino ligeramente mojado.

Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al exterior, en condiciones de exposición directa al sol.

El sensor S1 captó cómo los granos respondieron a la radiación solar, evidenciando variaciones en la temperatura interna y pérdida progresiva de humedad.

El sensor S2 registró los cambios ambientales, como el aumento de la temperatura y la disminución relativa de la humedad.

La comparación entre ambos sensores permitió identificar la influencia directa de la radiación solar en el café frente al ambiente circundante.

4.4.2.1 Toma de datos establecimiento cerrado

El café presentó una humedad interna (S2) entre 80,4 % y 84,5%, mayor que la humedad ambiente (S1), que osciló entre 49,7 % y 52,7 %. La temperatura del grano estuvo entre 20,5 – 21,6 °C, frente a una temperatura ambiente de 22,1 °C.

Se confirma que el café con mayor humedad inicial tiende a conservar un microclima interno más húmedo que el aire circundante.

4.4.2.2 Toma de datos al aire libre

La humedad del café varió entre 62,5 % y 77,4 %, mientras que la humedad ambiente se registró entre 40,9 % y 42 %. La temperatura interna del café se mantuvo en torno a 23,1 – 24,4 °C, frente a una temperatura ambiente de 25,8 °C.

El contraste evidencia que, al aire libre, la pérdida de humedad del café mojado es más acelerada que en el establecimiento cerrado, aunque se conserva una diferencia notable respecto al ambiente.

4.4.3 Tabla de datos

La tabla presenta los datos obtenidos con los sensores S1 (ambiente) y S2 (café), tanto en laboratorio como en campo abierto, para muestras de café pergamino seco y ligeramente mojado, con el fin de comparar la variación de humedad y temperatura en diferentes condiciones de exposición.

Tabla 1. Primera prueba de Datos

DATOS DE CAFE PERGAMINIO SECO				
DATOS REGISTRADOS DENTRO DE LABORATORIO	S2 Humedad Dentro del cafe	S1 Humedad Ambiente Del cafe	S2 Temperatura Dentro del cafe	SENSOR AMBIENTE
	79,3 %	55,6 %	20,7 %	TEMPERATURA 22,3 %
	75,5 %	53 %	20,8 %	
	78,3 %	52,7 %	20,8 %	HUMEDAD 48,5 %

	77,6 %	51,9 %	20,7 %	
DATOS REGISTRADOS EN CAMPO	S2 Humedad Dentro del cafe	S1 Humedad Ambiente Del cafe	S2 Temperatura Dentro del cafe	SENSOR AMBIENTE
	52,9 %	42,9 %	23,3 %	TEMPERATURA 24,6 %
	60 %	43,2 %	23,6 %	
	53,5 %	44 %	24 %	HUMEDAD 39,3 %
	50,7 %	44,6 %	23,4 %	

Tabla 2. primera muestra de datos IoT

DATOS DE CAFE PERGAMINIO LIGERAMENTE MOJADO				
DATOS REGISTRADOS DENTRO DE LABORATORIO	S2 Humedad Dentro del café	S1 Humedad Ambiente Del café	S2 Temperatura Dentro del cafe	SENSOR AMBIENTE
	80,4 %	49,7 %	21,6 %	TEMPERATURA 22,1 %
	84 %	50,8 %	20,8 %	
	84,5 %	51,8 %	20,5 %	HUMEDAD 52,3 %
	82 %	52,7 %	20,7 %	
DATOS REGISTRADOS EN CAMPO	S2 Humedad Dentro del café	S1 Humedad Ambiente Del café	S2 Temperatura Dentro del cafe	SENSOR AMBIENTE
	72,1 %	41,7 %	24,4 %	TEMPERATURA 25,8 %
	77,4 %	40,9 %	23,6 %	
	64,2 %	42 %	23,2 %	HUMEDAD 36,2 %
	62,5 %	42 %	23,1 %	

4.5 Toma de datos reales en campo

Después de validar el funcionamiento del prototipo IoT y del sistema mecánico de rastrillo en las pruebas iniciales realizadas en laboratorio, se procedió a efectuar una serie de mediciones reales en campo para evaluar el desempeño del sistema en condiciones naturales de secado. Estas pruebas incluyeron no solo el análisis del comportamiento térmico e higrométrico del café, sino también la observación directa de cómo el movimiento del rastrillo, a medida que barría la superficie del café, influía en la distribución del calor, la homogenización de la humedad y la toma de datos en diferentes puntos del recorrido. El dispositivo IoT fue instalado directamente sobre la estructura del rastrillo mecánico, de modo que los sensores tomaban datos en tres momentos del barrido: al inicio del movimiento, en la zona central del patio y al final del recorrido. Esto permitió obtener información dinámica y realista del proceso de secado, mostrando cómo varían las condiciones internas del café a medida que la masa es desplazada y redistribuida.

Las mediciones se realizaron entre el 7 y el 13 de octubre, en muestras de 10 kg de café pergamino, bajo diferentes condiciones ambientales sol directo, cielo nublado y bajo techo. El objetivo principal fue caracterizar la respuesta del café ante variaciones climáticas y, al mismo tiempo, validar la precisión del sistema IoT frente a instrumentos comerciales y de referencia utilizados durante estas jornadas de toma de datos.

4.5.1 *Medición en campo del secado de café*

La toma de datos en campo constituye una etapa esencial para evaluar la efectividad del proceso de secado natural y validar el desempeño del dispositivo IoT acoplado al sistema mecanizado de rastrillo. Mientras que en las pruebas de laboratorio se trabaja en un entorno controlado, las mediciones en campo están expuestas a variaciones climáticas que influyen directamente en la temperatura interna del grano, la humedad relativa, la velocidad de evaporación y la formación de microclimas dentro de la masa de café. Durante esta fase se utilizaron muestras de 10 kg, una cantidad suficiente para reproducir condiciones reales de secado en patio y generar gradientes naturales de humedad entre la superficie, el centro y el fondo del grano.

Un aspecto fundamental de estas mediciones fue que el dispositivo IoT se mantuvo montado sobre el rastrillo mecánico, de manera que sus sensores se desplazaban junto con el barrido del café. Esto permitió obtener datos dinámicos en tiempo real, registrando variaciones internas a medida que el café era redistribuido. Gracias a este enfoque, se logró observar cómo el movimiento contribuye a homogenizar la temperatura, a acelerar la pérdida de humedad superficial y a reducir diferencias entre las distintas capas del grano.

4.5.2 Dispositivos y sensores utilizados en la validación

La toma de datos se realizó utilizando tres instrumentos principales. El primero fue el dispositivo IoT, equipado con tres sensores BME280, encargados de medir temperatura, humedad y presión interna[22]. Este dispositivo se fijó en la estructura del rastrillo mecánico, por lo que los sensores se desplazaban durante cada ciclo de barrido, capturando datos en zonas diferentes del patio. Como referencia externa, se empleó también un termohigrómetro comercial, utilizado para validar la temperatura y humedad ambiente, y un medidor de humedad DH200X, instrumento especializado para medir humedad interna del café pergamino. El uso simultáneo de estos tres sistemas permitió comparar lecturas, calibrar sensores internos y verificar la precisión del prototipo IoT en situaciones reales.

4.5.3 Metodología de toma de datos

El proceso de obtención de datos consistió en preparar una muestra de 10 kg de café pergamino, la cual fue distribuida uniformemente sobre el patio para simular el secado real. El rastrillo mecánico, con el dispositivo IoT incorporado, realizaba barridos a lo largo de la superficie, moviendo y redistribuyendo el café. Durante este movimiento, los sensores tomaban lecturas en tres momentos específicos: al inicio del recorrido, donde el café aún no había sido perturbado; en la zona central del patio, donde el grano ya mostraba un grado de redistribución; y al final del barrido, cuando la capa superficial se encontraba completamente mezclada. De esta manera fue posible observar cómo el movimiento contribuía a la homogenización de la temperatura y la humedad. Simultáneamente, en cada punto se tomaban datos con el termohigrómetro y el medidor DH200X para validar las mediciones del sistema IoT. Las jornadas incluyeron tomas en sol, nublado y bajo techo, lo que permitió contrastar el comportamiento del café en distintos entornos.

4.5.4 Distribución de los sensores BME280 en el rastrillo mecánico

Los sensores del sistema IoT se ubicaron en tres niveles dentro de la masa de café con el fin de estudiar la variación vertical de humedad y temperatura. El sensor S1 se colocó en la parte superior, en contacto directo con el ambiente; el sensor S2 se ubicó en la mitad de la capa de café, representando el comportamiento promedio del lote; y el sensor S3 se ubicó en el fondo, donde la masa del café genera un microclima con menor ventilación y mayor retención de humedad. Esto permitió detectar diferencias entre las capas y evaluar la efectividad del movimiento del rastrillo para homogenizar estas variaciones durante el secado en campo.

4.5.4.1 Influencia del movimiento del rastrillo en la toma de datos

Durante las pruebas se evidenció que el movimiento continuo del rastrillo mecánico juega un papel determinante en la forma en que evolucionan la temperatura y la humedad dentro de la masa de café. Al iniciar el barrido, los sensores registran condiciones estables y poco variadas, ya que el café se encuentra sin mover y conserva microclimas internos. Sin embargo, al avanzar hacia la zona central del recorrido, los datos muestran fluctuaciones más marcadas debido a la redistribución del grano. Esta mezcla permite que el café de la parte inferior ascienda, liberando humedad acumulada y exponiéndose al ambiente esto hace que el sensor que está en la parte superior tome datos altos de humedad hasta saturarse, mientras que el café superficial desciende hacia zonas más compactas.

Finalmente, al llegar al extremo final del movimiento, los sensores registran lecturas más homogenizadas, lo que demuestra que el efecto mecánico del rastrillo ayuda a reducir diferencias verticales entre las capas del café. En condiciones de sol, este barrido acelera la pérdida de humedad en el fondo de la capa, mientras que en condiciones nubladas o en sombra ayuda a equilibrar la temperatura interna. Este comportamiento confirma que el uso del rastrillo mecánico no solo facilita el proceso de secado, sino que permite obtener datos más representativos del estado real del café, evitando mediciones sesgadas por microclimas localizados.

Figura 50. Rastrillo en funcionamiento



4.6 Construcción del dispositivo IoT versión 2

Durante el desarrollo del proyecto se realizó una mejora en el diseño inicial del dispositivo IoT utilizado para el monitoreo del proceso de secado del café en patio. La primera versión del sistema permitió realizar la adquisición de datos ambientales mediante sensores conectados a un microcontrolador, lo que facilitó las pruebas iniciales de registro y análisis de información.

Sin embargo, con el objetivo de mejorar la precisión en la adquisición de datos, optimizar la integración del hardware y facilitar la interacción del usuario con el sistema, se desarrolló una segunda versión del dispositivo. Esta nueva versión incorpora un módulo ESP32-8048S070C, el cual integra un microcontrolador basado en ESP32 y una pantalla táctil, permitiendo visualizar directamente las variables medidas y mejorar la gestión de los datos recolectados.

La implementación de este módulo permitió simplificar la arquitectura del sistema, reducir la cantidad de componentes externos y mejorar la estabilidad del dispositivo durante la toma de datos en campo. Asimismo, esta mejora facilitó el almacenamiento y la transmisión de la información hacia plataformas de análisis, lo que permite una gestión más eficiente de los datos recolectados durante el proceso de secado.

Además, la incorporación de una interfaz gráfica en la pantalla del dispositivo permite visualizar en tiempo real las variables de temperatura y humedad registradas por los sensores, facilitando la supervisión del proceso por parte del usuario. De esta manera, el sistema adquiere una mayor facilidad de uso y portabilidad, permitiendo su utilización directa en campo sin necesidad de equipos adicionales para la visualización de la información.

Esta evolución del dispositivo evidencia una mejora en la calidad y accesibilidad de los datos,

permitiendo un monitoreo más preciso y una toma de decisiones más eficiente durante el proceso de secado del café.

4.6.1 *Proceso constructivo de la PCB*

El dispositivo IoT se desarrolló un nuevo diseño de la placa PCB, optimizado para integrar de manera eficiente el módulo ESP32-S3, garantizando una arquitectura más compacta, organizada y robusta. Este nuevo diseño fue realizado utilizando el software Proteus, el cual permitió el desarrollo del esquema electrónico y la distribución de las pistas de conexión de forma precisa. Este nuevo diseño permitió mejorar la distribución de los componentes electrónicos, la organización de las pistas de conexión y la estabilidad general del sistema.

El resultado de este desarrollo se presenta en la Figura 51, donde se muestra el esquema de distribución de los componentes y las conexiones implementadas en el dispositivo.

Adicionalmente, para esta versión del dispositivo IoT se diseñó y construyó una placa PCB independiente destinada exclusivamente a la integración de los tres sensores BME280. Esta decisión se tomó con el objetivo de optimizar la comunicación entre los sensores, facilitar las conexiones eléctricas y mejorar la estabilidad en la adquisición de los datos ambientales.

La implementación de esta placa independiente permite reducir posibles interferencias eléctricas, simplificar la arquitectura general del sistema y facilitar el montaje de los sensores dentro de la masa de café durante el proceso de secado.

En la Figura 51 se observa la placa desarrollada para la integración de los sensores BME280, la cual se comunica con el ESP32-S3 encargado de procesar y transmitir los datos hacia el módulo principal del sistema IoT.

Estas mejoras en el diseño evidencian una optimización en la calidad de la señal y en la organización del sistema, lo que contribuye a obtener mediciones más estables y confiables durante el monitoreo del proceso de secado del café.

Figura 51. Vista de capas (Print Layout) IoT versión 2

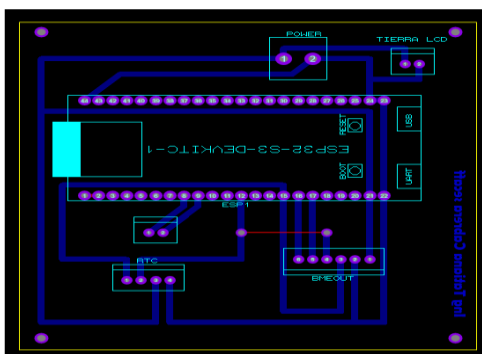
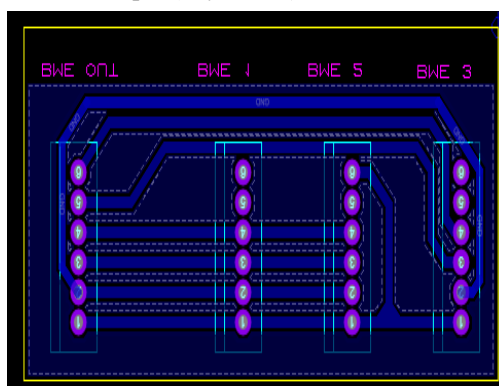


Figura 52. Vista de capas (Layer View) Placa PCB sensores BME280



4.6.2 Integración de componentes en la PCB

En la versión 2 del dispositivo IoT se optimizó el diseño de la placa de circuito impreso (PCB) mediante la integración de los componentes electrónicos previamente validados. El sistema incorpora un microcontrolador ESP32-S3, seleccionado por su capacidad de procesamiento y estabilidad en la conectividad inalámbrica, encargado de gestionar y transmitir los datos obtenidos durante el monitoreo.

Asimismo, se integraron tres sensores BME280, destinados a la medición distribuida de temperatura y humedad relativa dentro de la masa de café durante el proceso de secado, lo que permite mejorar la representatividad de las mediciones. Adicionalmente, se incluyó una antena externa conectada al ESP32-S3 con el fin de ampliar el alcance y mejorar la calidad de la comunicación inalámbrica.

En las Figuras 53 y 54 se presentan los componentes integrados en la PCB correspondiente a la versión 3 del dispositivo IoT, los cuales conforman el diseño final del sistema para su implementación en condiciones reales de operación.

Esta integración permitió mejorar la cobertura de comunicación y la representatividad de los

datos recolectados, lo que contribuye a un monitoreo más preciso y confiable del proceso de secado del café en condiciones reales.

Figura 53. Integración de PCB a los sensores BME280

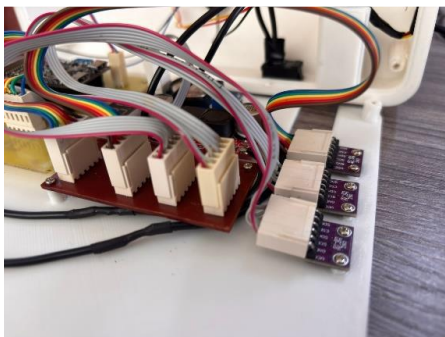
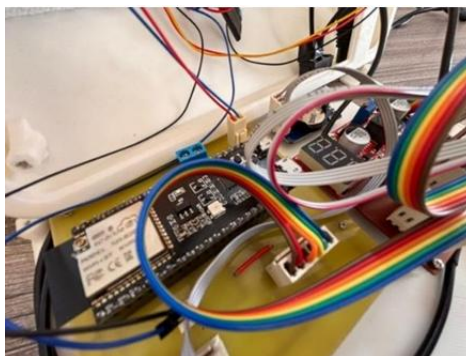


Figura 54. Integración de PCB a los componentes



4.6.3 Funcionamiento del código del dispositivo IoT versión 2

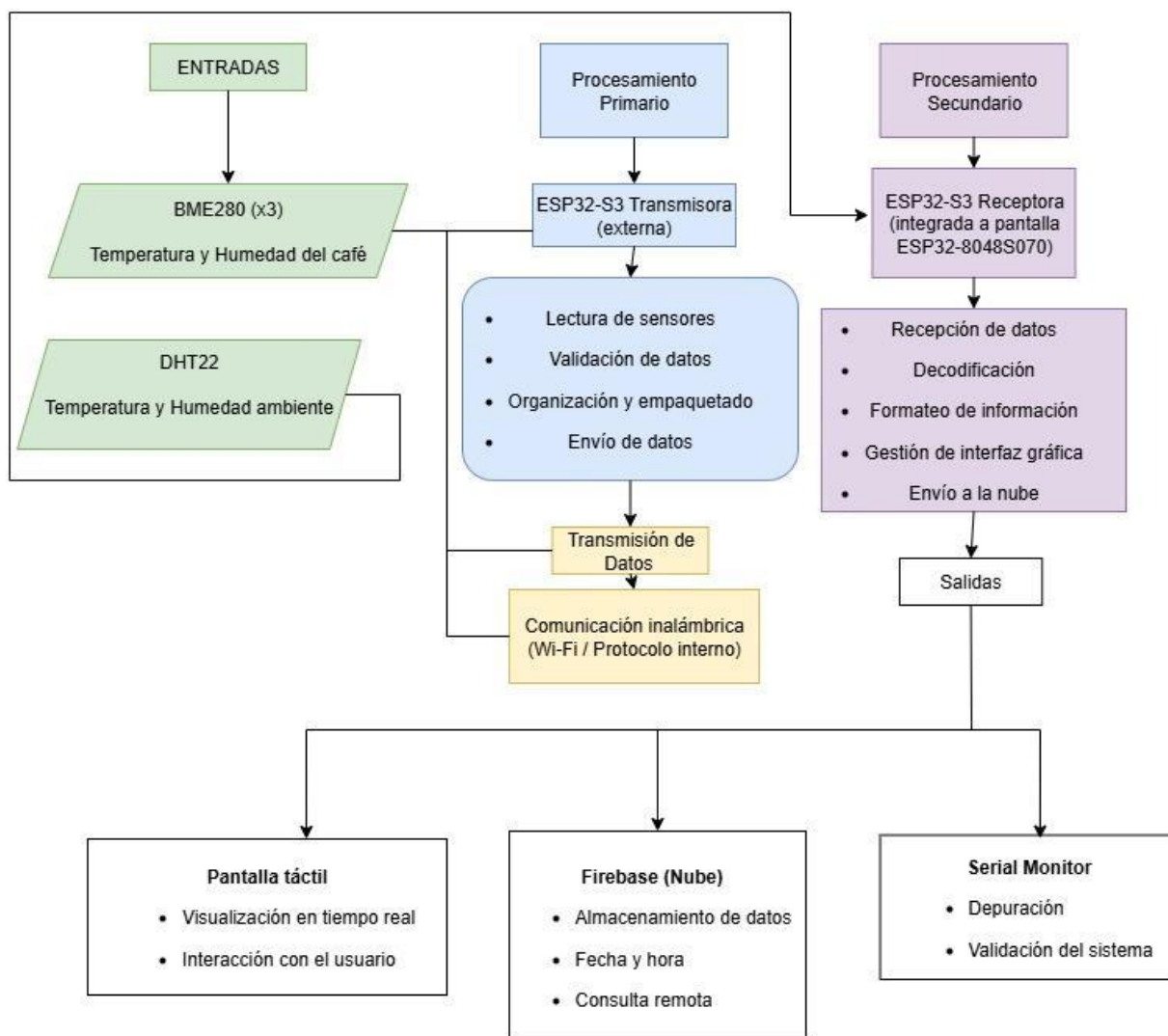
El funcionamiento del dispositivo IoT versión 2 se basa en una arquitectura distribuida compuesta por una etapa de adquisición de datos, procesamiento primario, transmisión y procesamiento secundario, como se muestra en el diagrama de flujo. Inicialmente, los sensores BME280 registran la temperatura y humedad en diferentes puntos del café en proceso de secado, mientras que el sensor DHT22 mide las condiciones ambientales del entorno.

En la etapa de procesamiento primario, una ESP32-S3 transmisora se encarga de inicializar los buses de comunicación I2C, verificar la conexión de los sensores y configurar el reloj en tiempo real (RTC). Posteriormente, el sistema realiza lecturas periódicas de los sensores, validando que los valores obtenidos se encuentren dentro de rangos aceptables para garantizar la confiabilidad de los datos. Una vez obtenidas las mediciones, el microcontrolador organiza la información junto con la fecha y hora del sistema.

Los datos procesados son mostrados de forma local en una pantalla LCD para permitir una visualización inmediata del estado del sistema. Al mismo tiempo, la información se empaqueta en un mensaje estructurado y se envía mediante comunicación serial (UART) hacia la unidad receptora del sistema.

Finalmente, en la etapa de procesamiento secundario, una ESP32-S3 receptora integrada a la pantalla táctil ESP32-8048S070C recibe los datos transmitidos, los decodifica y gestiona su visualización en la interfaz gráfica del dispositivo. Además, la información es enviada a la nube mediante Firebase, permitiendo el almacenamiento, la consulta remota y el seguimiento en tiempo real de las condiciones del proceso de secado del café.

Figura 55. Diagrama de flujo de datos del Sistema IoT v2 para el monitoreo del proceso de secado del café.



4.6.4 *Diseño, impresión 3D y ensamblaje de la carcasa del dispositivo IoT*

Una vez integrada la electrónica en la placa PCB, se verificaron las dimensiones de los componentes para asegurar su correcta disposición y evitar interferencias durante el ensamblaje. Con base en estas medidas, se diseñó la carcasa final del dispositivo IoT, buscando proteger los componentes y permitir un acceso adecuado a los conectores necesarios para su funcionamiento.

Posteriormente, la carcasa fue fabricada mediante impresión 3D utilizando filamento PLA, material seleccionado por su facilidad de impresión, resistencia y buen acabado superficial, lo que permitió obtener una estructura precisa y adaptada al dispositivo.

Finalmente, se realizó el ensamblaje de todos los componentes dentro de la carcasa, verificando su correcto ajuste y funcionamiento. De esta manera, se obtuvo la versión final del dispositivo IoT, completamente integrado y listo para su implementación en las pruebas de campo.

La implementación de la carcasa permitió mejorar la protección del sistema y su portabilidad, facilitando su uso en condiciones reales de campo y asegurando la integridad de los componentes durante la recolección de datos.

Figura 56. Dimensiones de carcasa dispositivo

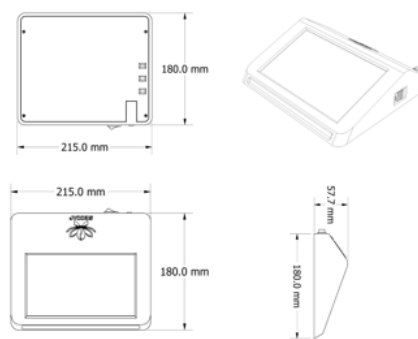


Figura 57. Acoplamiento de componentes en carcasa



4.6.5 *Funcionamiento del dispositivo v2*

Durante la validación del sistema se verificó el correcto funcionamiento del dispositivo IoT, el cual integra una pantalla y los sensores BME280 y DHT22 como parte del mejoramiento del diseño. Esta configuración permite la lectura simultánea de los sensores y la visualización en tiempo real de las variables medidas, facilitando la identificación de posibles fallos y garantizando un monitoreo confiable de las condiciones durante las mediciones.

Para las pruebas, el dispositivo IoT fue integrado a un rastrillo automatizado que se desplaza sobre una muestra de café húmedo, permitiendo registrar la temperatura y la humedad del ambiente. Adicionalmente, los tres sensores BME280 se ubicaron sobre la superficie del café sin contacto directo con el grano, con el fin de medir las condiciones superficiales durante el proceso de secado.

A partir de los datos obtenidos, se realizó un análisis matemático para identificar el modelo que mejor describe la variación de la humedad del café en función de las condiciones ambientales, lo que permitió estimar con mayor precisión el tiempo necesario para alcanzar el punto óptimo de secado. En la siguiente figura se presenta el funcionamiento del dispositivo durante las pruebas realizadas en laboratorio.

Figura 58. Funcionamiento del dispositivo IOT



4.6.6 *Diseño y construcción de la interfaz en la plataforma Firebase*

En el proyecto IoT desarrollado, la plataforma Firebase se utilizó para almacenar y visualizar en tiempo real los datos obtenidos por los sensores del sistema. Para su implementación, inicialmente se creó un proyecto en la plataforma mediante una cuenta de Google, donde se habilitó el servicio Realtime Database, encargado de almacenar los valores de temperatura y humedad registrados durante el proceso de secado del café.

Posteriormente, se configuró la estructura de la base de datos para organizar la información proveniente de los sensores BME280, encargados de medir las condiciones del café, y del sensor DHT22, destinado a registrar las variables ambientales. Firebase proporciona los parámetros de configuración necesarios, como la API Key, el dominio de autenticación y la URL de la base de datos, los cuales se integraron en el código del microcontrolador ESP32 utilizando la librería `Firebase_ESP_Client`. [23]

Una vez establecida la conexión WiFi del dispositivo, cada lectura realizada por los sensores es enviada automáticamente a la base de datos mediante rutas definidas para cada variable medida. Esto permite almacenar la información de manera organizada y facilitar su consulta posterior. Además, se desarrolló una interfaz personalizada que permite visualizar en tiempo real los valores de temperatura y humedad del café y del ambiente, así como descargar los registros y gráficas generadas a partir de los datos obtenidos durante el proceso de secado. La implementación de esta plataforma permitió centralizar y visualizar los datos en tiempo real, facilitando el análisis del comportamiento del secado y mejorando la toma de decisiones a partir de información continua y organizada.

Figura 59. Diseño interfaz



5. Análisis de Resultados

5.1 Análisis de los datos

Con el fin de estandarizar el análisis de los datos del proceso de secado del café con el rastrillo, se establecieron criterios comunes de medición y comparación para todas las tomas en campo. En cada medición se registraron simultáneamente la humedad relativa y la temperatura relativa, considerando el estado del café y las condiciones climáticas presentes (exposición al sol, cielo nublado y tomas bajo techo). También se tuvo en cuenta la ubicación espacial de los sensores dentro de la masa de café para garantizar la consistencia en la interpretación de los resultados.

El movimiento del café mediante el rastrillo mecanizado se realizó de forma sistemática cada 45 minutos, con el objetivo de homogenizar la exposición térmica y reducir gradientes de humedad entre capas. Por su parte, los registros de datos se efectuaron cada 2 horas, permitiendo analizar la evolución progresiva del proceso sin interferir con la dinámica natural del secado. Esta diferencia temporal entre el volteo y la toma de datos permitió evaluar el efecto acumulativo del movimiento sobre la redistribución de humedad dentro de la masa de café, observándose que los cambios más notorios en los sensores superficiales podían coincidir con ciclos previos de volteo.

El procesamiento y la visualización de los datos se realizaron en Python utilizando la librería Scikit-learn y herramientas complementarias, mediante un código que permite cargar archivos de Excel organizados y generar de forma sistemática gráficas de humedad relativa y temperatura relativa en función del tiempo para cada día de medición y municipio.

Se analizaron las tomas realizadas en los municipios de Génova, Albán y Sandoná. En Génova, las mediciones se efectuaron entre el 7 y el 13 de septiembre con café recién cosechado y alto contenido de humedad, generando valores elevados y cercanos a la saturación. En Albán, las mediciones se realizaron del 7 al 13 de octubre con un café inicialmente más seco, lo que explica los menores valores de humedad relativa. En Sandoná, las mediciones se llevaron a cabo entre el 26 y el 30 de octubre con un nuevo lote de café húmedo desde el inicio del secado, permitiendo analizar etapas tempranas bajo condiciones de llovizna y tomas bajo techo.

Las mediciones se obtuvieron mediante un dispositivo IoT con tres sensores BME280, complementadas con un termohigrómetro comercial y un medidor de humedad de café DH200X.

Los sensores se ubicaron en tres niveles de la capa de café (S1 superior, S2 medio y S3 inferior), lo que permitió analizar los gradientes higrotérmicos y evaluar la influencia del ambiente y del movimiento periódico del rastrillo en la uniformidad del secado en cada municipio.

5.1.1 Herramienta de procesamiento y visualización de datos

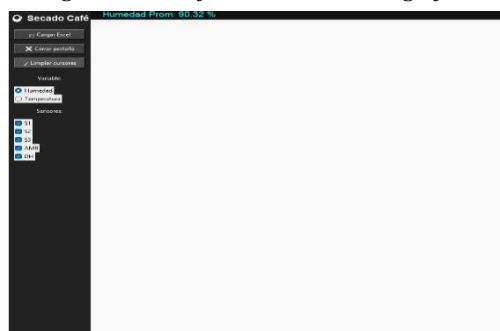
Con el objetivo de facilitar el análisis, la comparación y la visualización de los datos obtenidos durante el proceso de secado del café, se desarrolló una herramienta computacional en Python orientada al procesamiento de información proveniente de archivos de Excel generados durante las tomas de datos en campo. Esta herramienta fue diseñada para apoyar el análisis del comportamiento de la humedad relativa y la temperatura relativa en función del tiempo, variables fundamentales para la caracterización del proceso de secado.

El código implementado permite cargar de manera dinámica distintos archivos de Excel, correspondientes a jornadas y municipios diferentes, y generar gráficas temporales que muestran la evolución de las variables medidas por los sensores del sistema IoT, así como por los instrumentos de referencia. Para este propósito se emplearon librerías de Python como Pandas para la gestión y organización de los datos, Matplotlib para la generación de las gráficas y Scikit-learn como parte del entorno de análisis y estandarización del procesamiento de datos.

La interfaz desarrollada facilita la selección de la variable de interés humedad relativa o temperatura relativa, la visualización individual o conjunta de los sensores ubicados en los distintos niveles del café S1, S2 y S3, y la comparación con las mediciones ambientales y de referencia. Asimismo, la herramienta permite analizar cambios temporales específicos mediante cursores interactivos, lo que resulta útil para evaluar variaciones asociadas a eventos climáticos o al movimiento del café generado por el rastrillo mecanizado.

El uso de esta herramienta permitió estandarizar la forma en que se analizaron y presentaron los resultados para los municipios de Génova, Albán y Sandoná, garantizando coherencia en la interpretación de las gráficas que se presentan en las siguientes secciones, donde se realiza el análisis detallado del comportamiento de la humedad y la temperatura durante el proceso de secado del café en cada caso de estudio.

Figura 60. Interfaz Visualización de gráficas



5.1.2 Análisis de la toma de datos en el municipio de Génova

La toma de datos en el municipio de Génova se realizó como la primera campaña de medición en campo, utilizando un lote de café recién cosechado y con alto contenido de humedad, correspondiente a una etapa inicial del proceso de secado. Este escenario permitió evaluar el comportamiento del sistema IoT y del rastrillo mecanizado bajo condiciones cercanas a la saturación, donde la liberación de vapor y la evaporación son más intensas. El café fue dispuesto sobre el sistema mecánico de rastrillo, lo que facilitó su movimiento y redistribución durante la jornada, permitiendo analizar la respuesta de los sensores ante un secado progresivo.

Tabla 3. Muestra de datos dispositivo IoT. Génova

Fecha	Hora	Muestra	DH200X		Muestra	IoT			
			Humedad del café (00,0%)	Temperatura del café (00°C)		Sección	Humedad del café IoT (00,0%)	Temperatura del café IoT (00°C)	Temperatura ambiente (00°C)
7/09/2025	12:00m	M1 Superior	33.6	23.7	S1 Superior	100	23.3	23.1	70
		M2 Medio	32.7	24.2	S2 Medio	98	24.1		
		M3 Inferior	31.8	25.6	S3 Inferior	100	23.8		
7/09/2025	2:00pm	M1 Superior	32.1	26.3	S1 Superior	100	26.3	24.7	62
		M2 Medio	31.6	26.7	S2 Medio	97	26.7		
		M3 Inferior	30.2	25.4	S3 Inferior	99	25.4		
7/09/2025	4:00pm	M1 Superior	28.3	24.7	S1 Superior	100	26.9	24.1	63
		M2 Medio	29.9	25.6	S2 Medio	97	27.9		
		M3 Inferior	28.2	23.6	S3 Inferior	98	25.4		
7/09/2025	6:00pm	M1 Superior	27.1	24.8	S1 Superior	100	28.9	23.6	64
		M2 Medio	26.4	25.3	S2 Medio	96.5	30.2		
		M3 Inferior	26.6	22.7	S3 Inferior	98	27.9		
8/09/2025	8:00am	M1 Superior	28.6	19.5	S1 Superior	100	21.1	20.2	72

		M2 Medio	29.1	19.2	S2 Medio	96.7	20.8		
		M3 Inferior	27.9	19.6	S3 Inferior	94.6	23.8		
8/09/2025	10:00am	M1 Superior	26.2	23.7	S1 Superior	100	25.9	23.4	71
		M2 Medio	27.8	24.1	S2 Medio	95.3	26.3		
		M3 Inferior	26.9	24.2	S3 Inferior	94.6	25.8		
8/09/2025	12:00m	M1 Superior	25.8	26.7	S1 Superior	99	28.3	24.3	69
		M2 Medio	26.1	27.1	S2 Medio	88.9	28.9		
		M3 Inferior	25.1	27.2	S3 Inferior	89.3	27.9		
8/09/2025	2:00pm	M1 Superior	23.5	27.8	S1 Superior	97.5	26.7	25.8	67
		M2 Medio	22.9	28.1	S2 Medio	85.6	27.8		
		M3 Inferior	21.7	27.6	S3 Inferior	82.1	30.5		
8/09/2025	4:00pm	M1 Superior	21.6	28.6	S1 Superior	98.4	32.7	26.4	65
		M2 Medio	20.7	28.5	S2 Medio	84.7	31.6		
		M3 Inferior	20.1	29.1	S3 Inferior	83.2	28.6		
8/09/2025	6:00pm	M1 Superior	20.7	30.6	S1 Superior	97.1	31.8	25.1	66
		M2 Medio	20.2	29.7	S2 Medio	83.3	30.6		
		M3 Inferior	19.8	28.5	S3 Inferior	82.9	32.5		

5.1.2.1 Comportamiento de la humedad en el proceso de secado de café Génova

Durante la toma de datos en Génova, el café se encontraba en una etapa inicial del proceso de secado, con un contenido de humedad muy elevado, lo que generó condiciones cercanas a la saturación en las mediciones de humedad relativa. En los primeros días, los sensores del sistema IoT registraron valores altos, especialmente el sensor S1, ubicado en la parte superior, debido a la intensa liberación de vapor de agua proveniente del café recién lavado y aún muy húmedo. Según las Tablas 3 y 4, los registros iniciales alcanzaron valores cercanos o superiores al 80 %, lo que confirma un estado de saturación propio de la fase inicial del secado.

Con el avance de los días y la exposición continua al ambiente, la humedad relativa descendió de manera progresiva, evidenciando el efecto del proceso de evaporación. Esta disminución indica la transición hacia una etapa intermedia del secado, así como una reducción gradual de los gradientes de humedad entre las distintas capas del café.

Tabla 4. Muestra de datos con el pasar de los días. Génova

Fecha	Hora	Muestra	DH200X		Muestra	IoT			
			Humedad del café (00,0%)	Temperatura del café (00°C)		Sección	Humedad del café IoT (00,0%)	Temperatura del café IoT (00°C)	Temperatura ambiente (00°C)
11/09/2025	8:00am	M1 Superior	16.2	19.2	S1 Superior	82.1	20.9	20.1	69
		M2 Medio	16.5	19.8	S2 Medio	73.2	22.9		

		M3 Inferior	16.7	19.1	S3 Inferior	72.5	23.1		
11/09/2025	10:00am	M1 Superior	15.2	23.2	S1 Superior	81.9	25.7	22.6	69
		M2 Medio	15.1	23.6	S2 Medio	71.2	24.7		
		M3 Inferior	14.9	24.1	S3 Inferior	70.5	25.8		
11/09/2025	12:00m	M1 Superior	14.8	27.2	S1 Superior	80.3	28.2	25.9	66
		M2 Medio	14.5	27.9	S2 Medio	70.1	29.7		
		M3 Inferior	14.2	28.1	S3 Inferior	69.9	29.5		
11/09/2025	2:00pm	M1 Superior	13.9	29.3	S1 Superior	80.2	30.1	29.1	65
		M2 Medio	13.8	29.5	S2 Medio	69.8	31.5		
		M3 Inferior	14.1	29.4	S3 Inferior	69.2	32.9		
11/09/2025	4:00pm	M1 Superior	14.2	27.9	S1 Superior	80.4	28.6	25.8	68.2
		M2 Medio	13.9	28.2	S2 Medio	68.6	29.8		
		M3 Inferior	14.1	27.9	S3 Inferior	67.2	30.1		
11/09/2025	6:00pm	M1 Superior	13.7	26.8	S1 Superior	82.4	27.9	25.3	69
		M2 Medio	13.9	27.8	S2 Medio	66.5	28.2		
		M3 Inferior	14.2	26.1	S3 Inferior	66.8	28.8		
12/09/2025	8:00am	M1 Superior	15.9	18.3	S1 Superior	84.7	19.7	20.4	75
		M2 Medio	15.5	17.2	S2 Medio	67.2	18.5		
		M3 Inferior	15.5	18.1	S3 Inferior	66.9	18.9		
12/09/2025	10:00am	M1 Superior	13.6	25.3	S1 Superior	82.7	26.9	23.7	73
		M2 Medio	14.4	26.1	S2 Medio	65.2	27.8		
		M3 Inferior	13.7	24.8	S3 Inferior	64.3	26.8		
12/09/2025	12:00m	M1 Superior	12.9	25.1	S1 Superior	80.5	27.6	25.1	71
		M2 Medio	13.9	27.6	S2 Medio	63.4	30.4		
		M3 Inferior	13.1	28.8	S3 Inferior	64.2	30.7		
12/09/2025	2:00pm	M1 Superior	12.6	29.1	S1 Superior	79.6	32.3	25.5	68
		M2 Medio	13.1	29.7	S2 Medio	62.5	31.1		
		M3 Inferior	12.6	30.3	S3 Inferior	61.9	32.2		
12/09/2025	4:00pm	M1 Superior	12.1	30.1	S1 Superior	80.3	32.1	25.6	67
		M2 Medio	12.4	30.5	S2 Medio	61.8	33.5		
		M3 Inferior	11.9	31.2	S3 Inferior	62.9	32.4		
12/09/2025	6:00pm	M1 Superior	11.8	29.4	S1 Superior	81.4	31.2	25.5	66
		M2 Medio	12.1	29.1	S2 Medio	60.2	32.8		
		M3 Inferior	11.5	28.1	S3 Inferior	61.1	30.8		

Ver anexo 5 tabla completa de la toma de datos. Es importante mencionar que este descenso no ocurre de forma homogénea en todas las capas. Mientras el sensor S1 superior, sobre el café, descendía más rápido por estar en contacto directo con el ambiente, los sensores S2 en el medio y S3 al fondo tardaban más tiempo debido a la retención de humedad dentro de la masa del café. Esto confirma la existencia de un gradiente de humedad vertical, típico en el

secado en capa estática, que solo se homogeniza mediante el movimiento generado por el rastrillo mecánico.

Para el análisis del proceso de secado se utilizaron herramientas de procesamiento y visualización de datos desarrolladas en Python con la librería Scikit-learn, considerando como variables principales la humedad y la temperatura medidas sobre la superficie del café (sensores IoT) y las condiciones ambientales. Adicionalmente, se incluyeron mediciones complementarias provenientes de sensores ubicados en diferentes capas del café (S1, S2 y S3), así como del equipo DH200X, el cual permite estimar directamente la humedad y temperatura interna del grano, sirviendo como referencia para contrastar el comportamiento del secado externo e interno.

Figura 61. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 7 de septiembre en el secado de café en Génova.

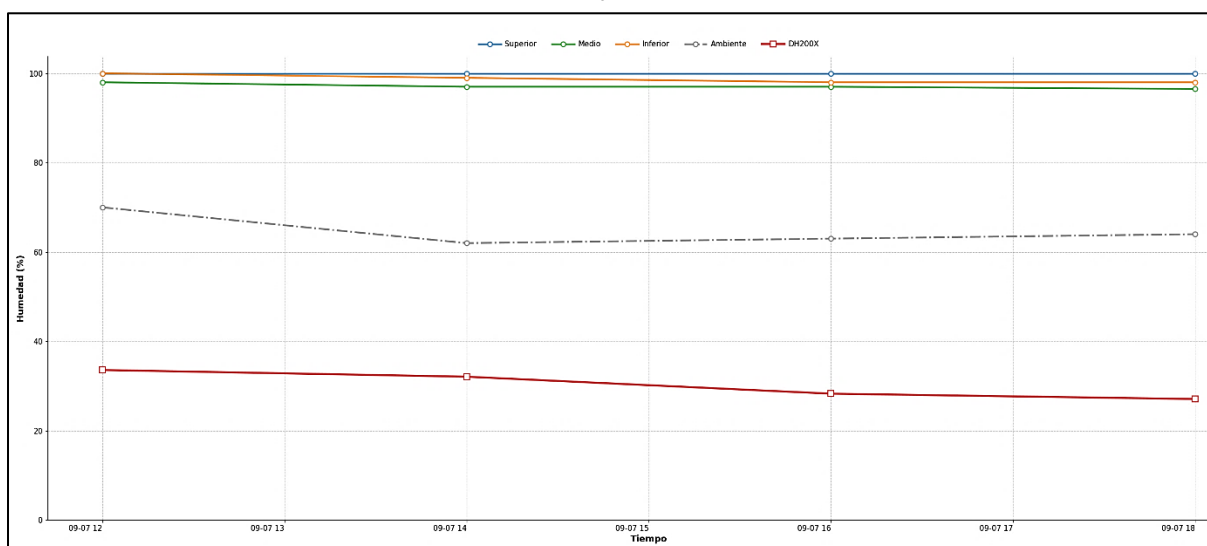
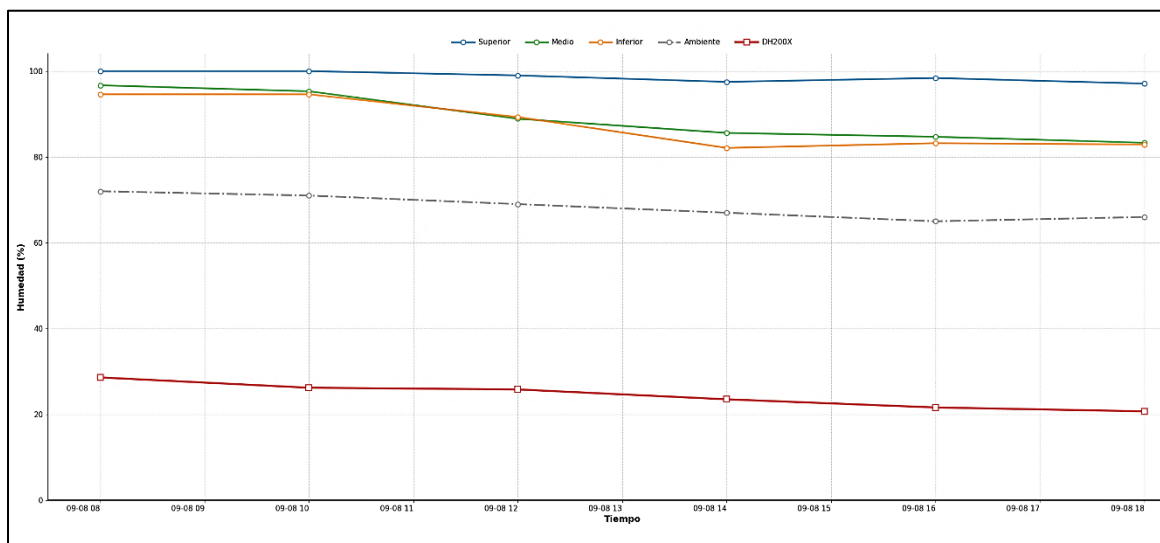


Figura 62. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 8 de septiembre en el secado de café en Génova.



En los primeros días de secado en el municipio de Génova como se observa en las figuras 60, 61 y 63, el comportamiento de la humedad registrada por el sensor S1, ubicado en la parte superior del café evidencia una condición inicial de humedad saturada, asociada al alto contenido de agua presente en el café. Es importante aclarar que esta medición corresponde a la humedad del vapor generado por la evaporación del café, y no directamente a la humedad interna del grano, la cual fue medida de forma puntual mediante el equipo DH200X.

Durante las primeras horas de medición, los valores de humedad en S1 se mantuvieron cercanos al 100 %, superando de manera constante la humedad ambiente. Este comportamiento confirma una intensa liberación de vapor de agua desde la masa de café, favorecida por las condiciones climáticas estables y de sol directo registradas durante la jornada. En este periodo, la evaporación es dominante y el secado ocurre principalmente en la capa superior del café.

Al contrastar estas mediciones con los valores obtenidos mediante el DH200X, se observa que, aunque la humedad del vapor registrada por los sensores IoT es elevada, la humedad interna del grano presenta valores progresivamente menores, lo que indica que el proceso de secado avanza desde el exterior hacia el interior del café. Esta diferencia entre ambas mediciones es esperada y confirma la validez del uso combinado de sensores externos e instrumentos de referencia.

A medida que avanza el tiempo, se observa que la humedad en S1 comienza a disminuir de forma progresiva, indicando que el café deja de estar en estado saturado y entra en una fase de

secado más controlada. Este descenso coincide con una reducción gradual del contenido de agua del grano medido con el DH200X y con una menor diferencia entre la humedad del vapor y la humedad ambiente, lo que sugiere que el café se aproxima a un estado de equilibrio higroscópico.

En comparación, los sensores ubicados en las capas media (S2) e inferior (S3) presentan valores ligeramente menores, lo que evidencia un gradiente de secado desde la parte superior hacia el interior del lote. Este comportamiento confirma la importancia de la radiación solar y del movimiento del café mediante el rastrillo mecanizado para lograr un secado más uniforme en todas las capas.

Figura 63. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 9 de septiembre en el secado de café en Génova.

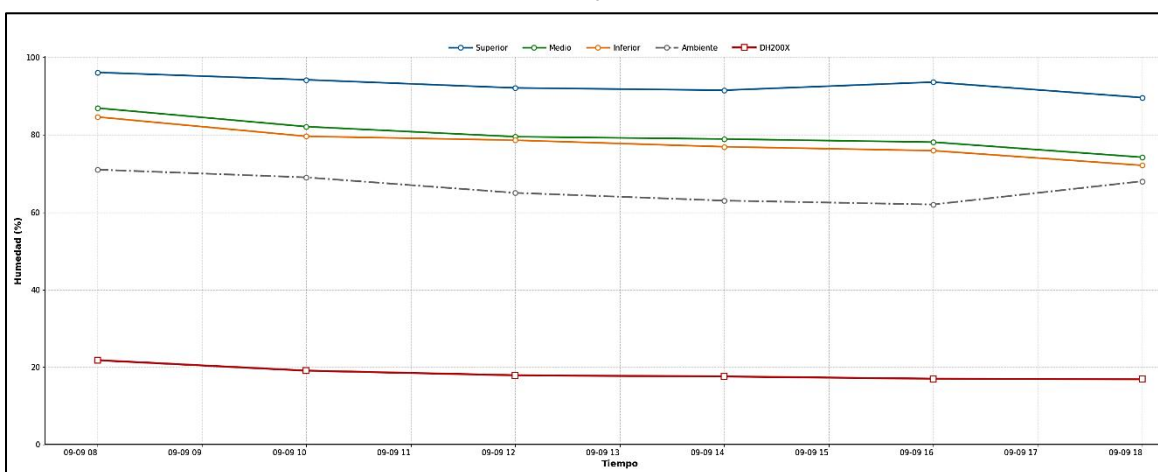
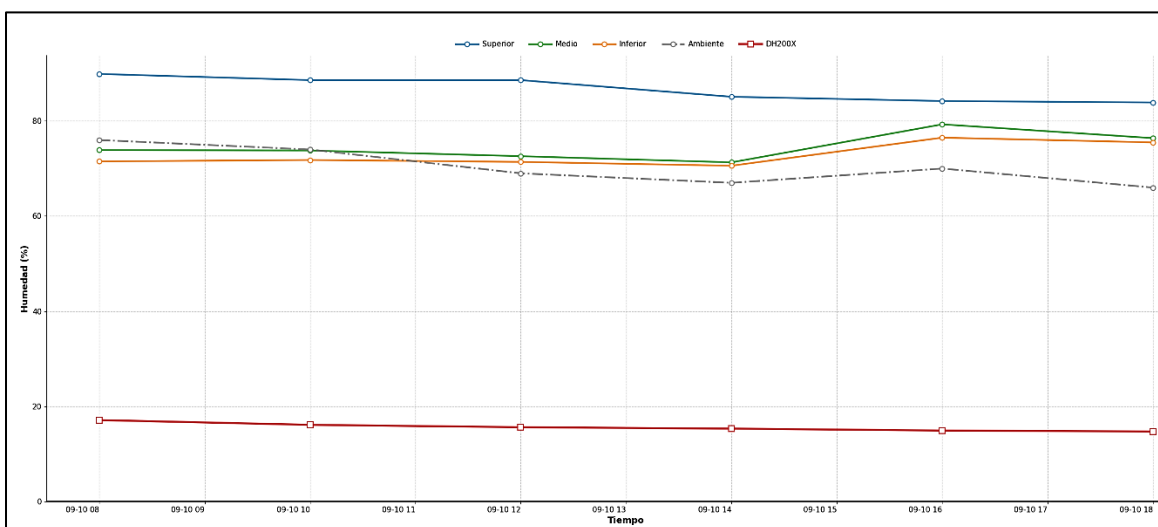


Figura 64. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 10 de septiembre en el secado de café de Genova



Durante los siguientes días se evidencia una etapa avanzada del proceso de secado, en la cual la humedad relativa medida por el sensor superior (S1) continúa disminuyendo de forma progresiva y sostenida. A diferencia de los primeros días, donde el vapor liberado por el café generaba condiciones cercanas a la saturación, en este periodo la humedad registrada sobre la superficie del café se aproxima cada vez más a la humedad ambiente, lo que indica una reducción significativa del contenido de agua disponible para evaporación.

En las Figura 63, se observa que la humedad en S1 desciende desde valores cercanos al 90 % hasta rangos alrededor del 84–85 %, mientras que los sensores S2 y S3 presentan valores aún más bajos. Este comportamiento muestra que el gradiente de humedad dentro de la masa de café se va reduciendo, señal de un secado más homogéneo. De manera simultánea, la humedad del grano medida con el DH200X disminuye progresivamente, situándose alrededor del 15–17 %, lo que confirma que el café ya ha superado la fase de secado rápido.

En la figura 64, la tendencia se mantiene estable, con una leve disminución adicional de la humedad registrada por S1 y una menor separación entre las curvas de los sensores internos y la humedad ambiente. Esto indica que el intercambio de vapor entre el café y el aire circundante es cada vez menor, y que el proceso se encuentra en una fase de equilibrio progresivo. El DH200X registra valores cercanos al 14–15 %, acercándose al rango de humedad objetivo establecido anteriormente.

Finalmente, la gráfica de la figura 66 muestra un comportamiento aún más cercano al estado final de secado. La humedad relativa en S1 se estabiliza alrededor del 80–82 %, mientras que los sensores S2 y S3 se mantienen próximos a la humedad ambiente. Paralelamente, la humedad real del grano medida con el DH200X desciende hasta valores cercanos al 12–13 %, aproximándose al rango óptimo de reportado para café seco. Este acercamiento entre la humedad del vapor sobre el café, la humedad ambiente y la humedad interna del grano confirma que el proceso de secado está llegando a su etapa final, con una menor liberación de vapor y una mayor estabilidad del sistema.

Figura 65. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 11 de septiembre en el secado de café en Génova

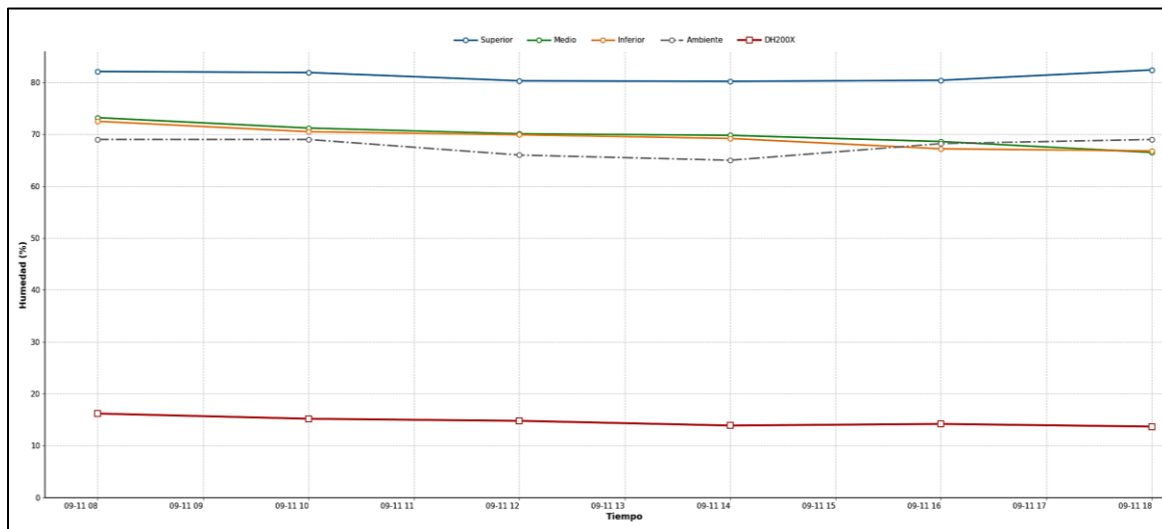
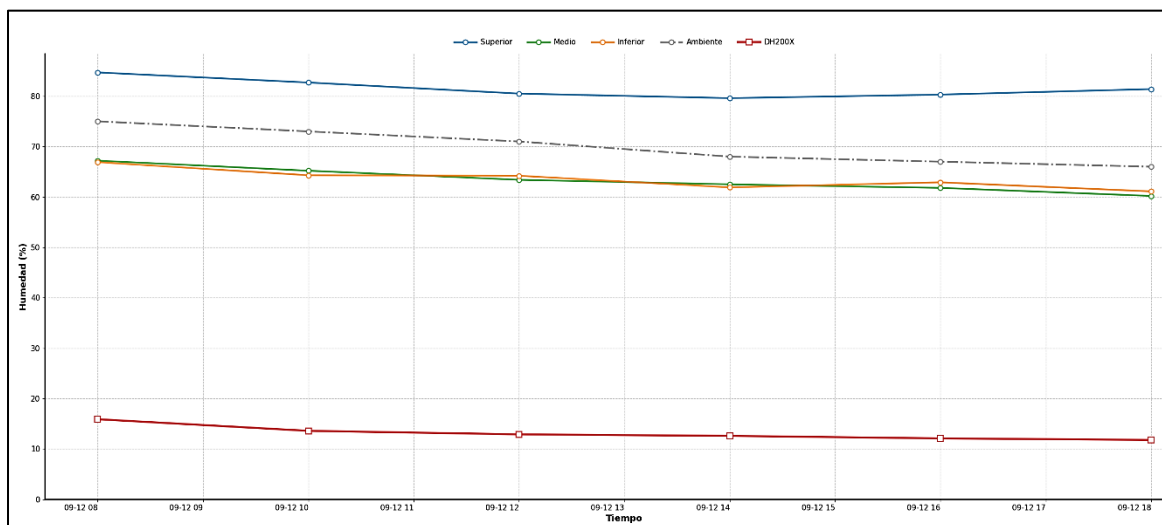


Figura 66. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 12 de septiembre en el secado de café en Génova



En la figura 67 se observa que la humedad relativa medida por el sensor superior (S1) se aproxima a la humedad ambiente, manteniendo una diferencia cercana al 9 %. Este comportamiento indica que el café alcanzó una etapa avanzada de secado, donde la liberación de vapor es baja y ya no se genera humedad sobre la superficie del grano.

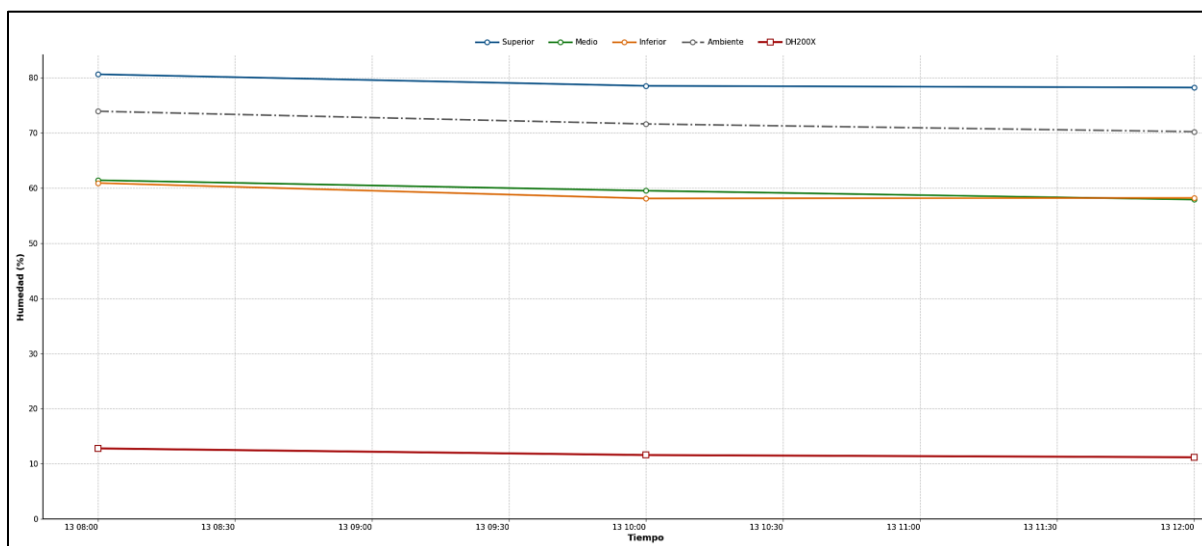
La similitud entre las lecturas de los sensores S2 y S3 se debe a la reducción del gradiente de humedad dentro de la masa del café. Al encontrarse el grano más seco, las condiciones de aire

en los niveles medio e inferior se homogenizan, lo que refleja un secado uniforme favorecido por el movimiento del café mediante el rastrillo mecanizado.

La humedad del grano medida con el DH200X se mantuvo estable entre 10 y 12 %, confirmando que el café alcanzó el nivel de secado adecuado. Esta estabilidad evidencia que la evaporación es mínima y que el sistema se encuentra cercano al equilibrio con el ambiente, indicando un secado efectivo y de buena calidad.

En conjunto, la cercanía entre la humedad registrada por S1 y la humedad ambiente, la similitud entre los sensores S2 y S3, y la estabilidad del DH200X confirman que el proceso de secado fue efectivo y controlado, alcanzando un secado de café adecuado, homogéneo y acorde con los parámetros de calidad esperados.

Figura 67. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 13 de septiembre en el secado de café en Génova



5.1.2.2 Comportamiento de la temperatura en el proceso de secado de café Génova

En el municipio de Génova, el comportamiento de la temperatura relativa estuvo fuertemente condicionado por el alto contenido inicial de humedad del café. Durante los primeros días del proceso, cuando el grano se encontraba muy húmedo e incluso en condiciones cercanas a saturación, las mediciones mostraron que la temperatura relativa registrada por los sensores tendía a ser ligeramente menor o muy cercana a la temperatura ambiente. Este comportamiento se explica por el fenómeno de evaporación: la gran cantidad de agua presente en

el café absorbía energía térmica del entorno para pasar a estado vapor, generando un efecto de enfriamiento del aire alrededor de la masa de café.

Figura 68. Toma de datos Génova



A medida que el proceso de secado avanzó y la humedad relativa descendió hacia rangos intermedios aproximadamente entre 50 % y 70 %, la evaporación se redujo progresivamente. En esta etapa, la temperatura relativa comenzó a estabilizarse y a aproximarse más a la temperatura ambiente, evidenciando una menor influencia del enfriamiento por evaporación. Durante los periodos de exposición directa al sol, se registraron incrementos moderados de temperatura, especialmente en el sensor superior (S1), mientras que en condiciones más cerradas el comportamiento térmico fue más estable.

Figura 69. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 7 de septiembre en el secado de café en Génova

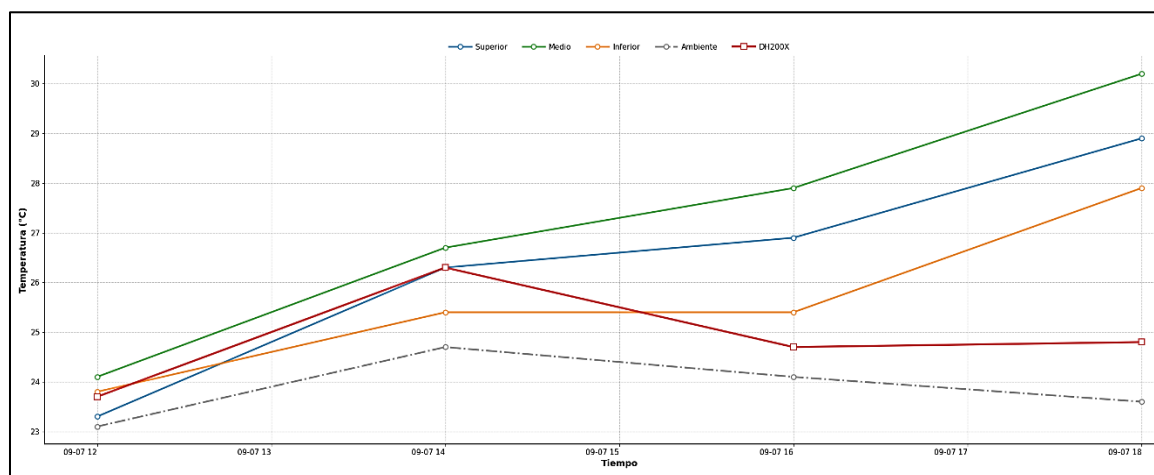


Figura 70. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 8 de septiembre en el secado de café en Génova

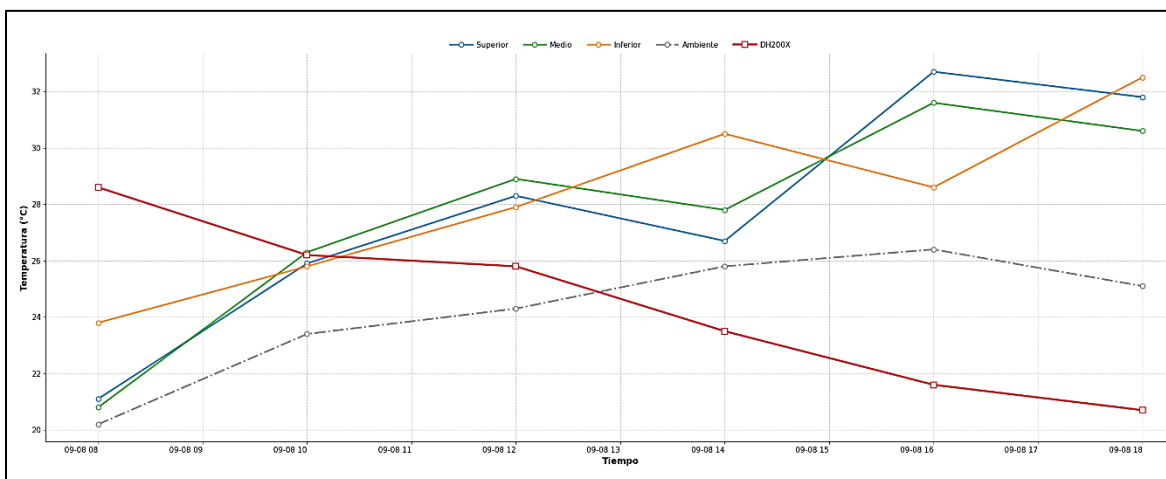
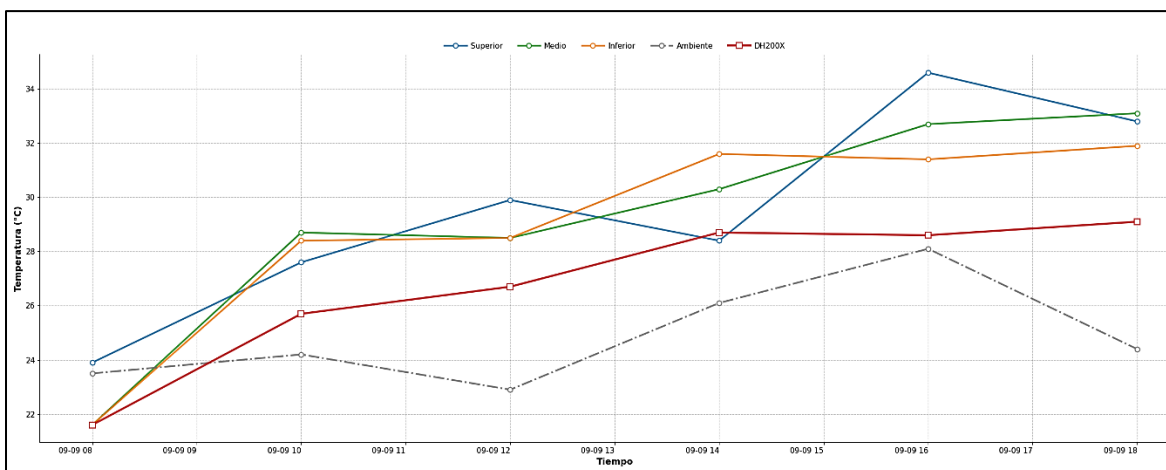


Figura 71. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 9 de septiembre en el secado de café en Génova



Durante los primeros tres días de medición en Génova, el comportamiento de la temperatura estuvo fuertemente condicionado por la alta humedad inicial del café y por un clima estable con predominio de sol. En las primeras horas del día, las temperaturas registradas por los sensores del sistema IoT, especialmente S1, tienden a ser más bajas debido al efecto de evaporación generado por el café húmedo. La liberación intensa de vapor consume energía térmica del entorno inmediato, provocando un enfriamiento relativo del aire sobre la superficie del grano.

A medida que avanza la jornada, especialmente entre las 12:00 m y las 2:00 p.m., se observa un aumento progresivo de la temperatura tanto en S1 como en los sensores S2 y S3. Este incremento coincide con el aumento de la radiación solar y la disminución gradual de la

humedad del café. En el primer día, aunque la temperatura ambiente comienza a descender después de las 2:00 p.m., los sensores dentro de la masa de café continúan registrando aumentos hasta aproximadamente las 6:00 p.m., lo cual se explica por la inercia térmica del café y la acumulación de calor en las capas internas.

El comportamiento del sensor DH200X difiere del de los sensores IoT, ya que mide directamente la temperatura del grano. Durante el primer día, el DH200X muestra un aumento de temperatura hasta las horas centrales del día y posteriormente una disminución, reflejando una menor capacidad del grano para retener calor debido a la alta humedad inicial. En el segundo día, el DH200X inicia con temperaturas más altas y luego desciende progresivamente, lo cual indica que, a medida que el café pierde humedad, el intercambio térmico con el ambiente se vuelve más eficiente y el grano se enfría con mayor rapidez cuando disminuye la radiación solar.

Figura 72. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 10 de septiembre en el secado de café en Génova

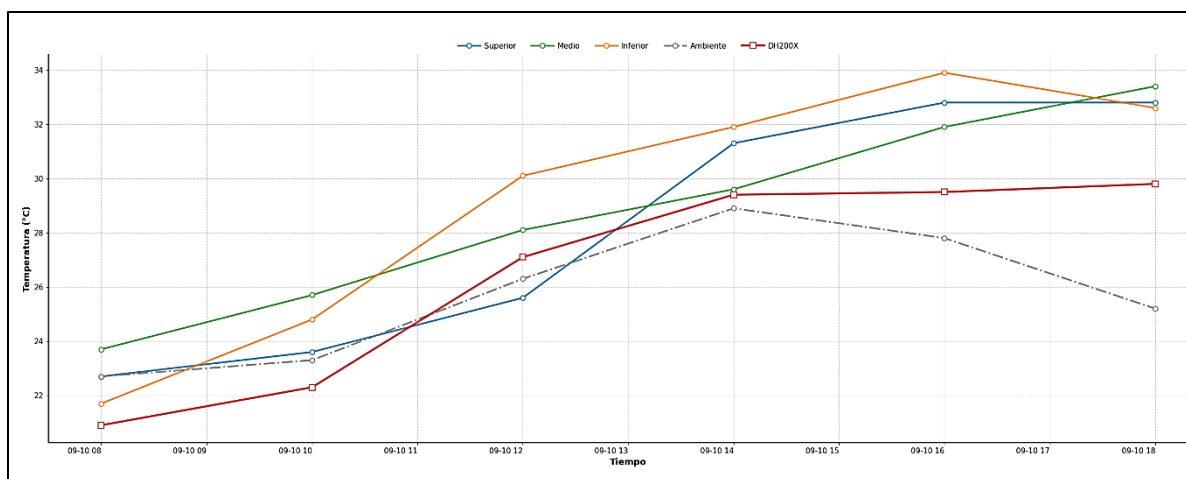


Figura 73. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 11 de septiembre en el secado de café en Génova

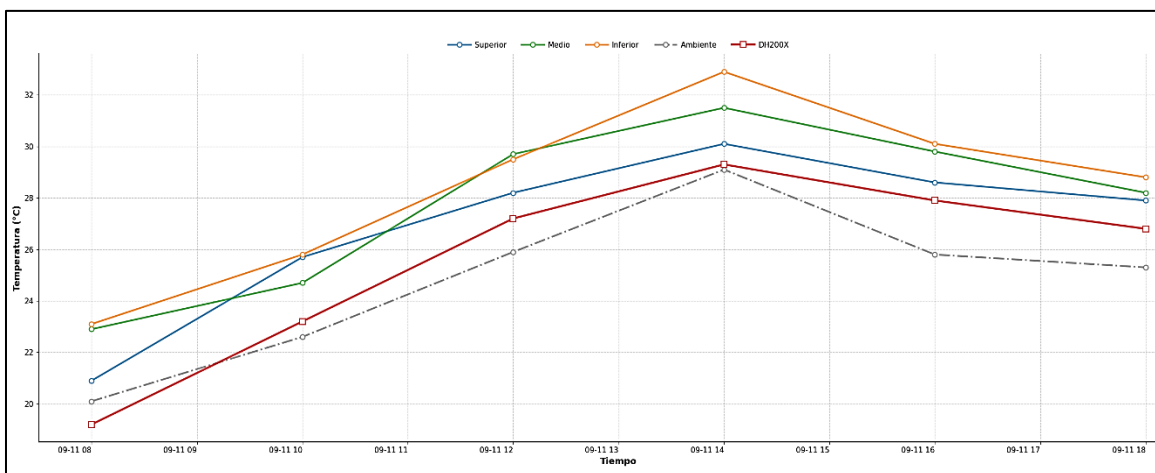
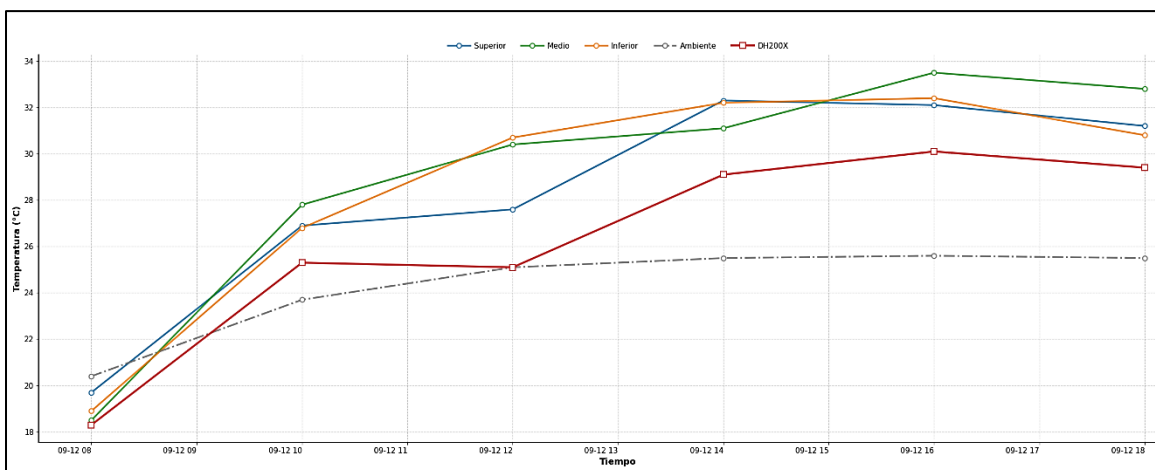


Figura 74. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 12 de septiembre en el secado de café en Génova



En los días posteriores del proceso de secado en Génova se observa un cambio claro en el comportamiento térmico del sistema. A diferencia de los primeros días, la temperatura registrada por el sensor S1 se mantiene de forma constante por encima de la temperatura ambiente. Esto ocurre porque, a medida que el café pierde humedad, el efecto de enfriamiento por evaporación disminuye y el calor comienza a acumularse en la masa del café, especialmente en la capa superior. La radiación solar calienta directamente el grano y el aire atrapado entre los granos, generando un microclima más cálido que el ambiente circundante.

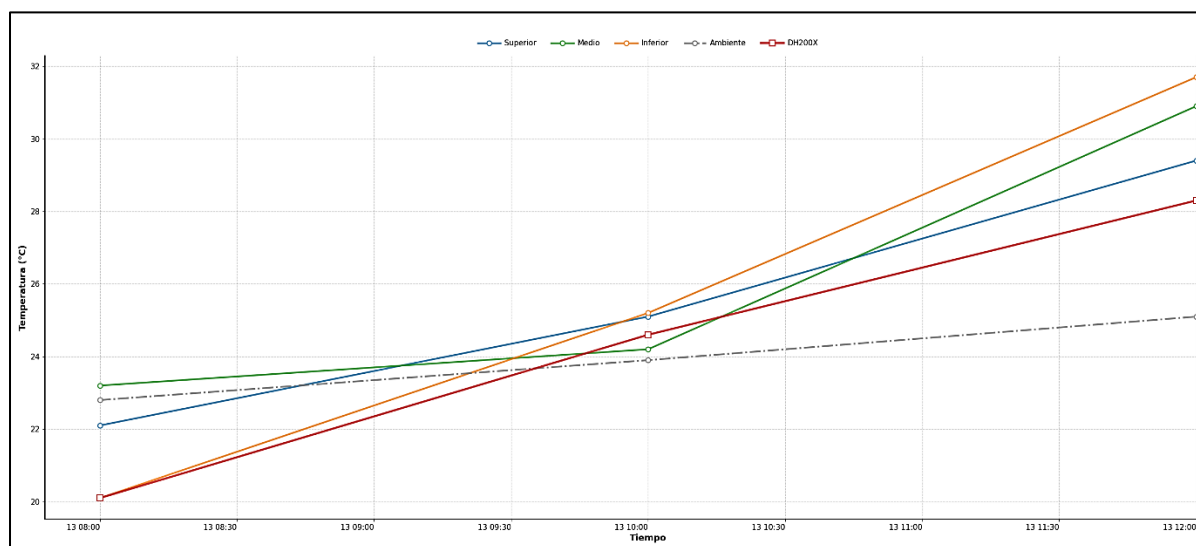
Durante esta etapa, el café actúa como un medio de almacenamiento térmico: absorbe calor durante las horas de mayor radiación y lo libera lentamente, lo que explica por qué la temperatura en S1 se mantiene elevada incluso cuando la temperatura ambiente empieza a

descender. Este fenómeno es menos evidente en los primeros días debido a la alta humedad y a la intensa evaporación.

Asimismo, el comportamiento del sensor DH200X cambia respecto a las etapas iniciales. En estos días, la temperatura del grano ya no presenta descensos marcados durante la tarde, sino que se mantiene en aumento o con variaciones suaves, siguiendo una tendencia similar a la de los sensores IoT y a la temperatura ambiente. Esto indica que el grano se encuentra más seco y que la transferencia de calor es más directa, con menor consumo energético por evaporación.

En el último día de medición, la temperatura muestra un comportamiento más lineal y estable en todos los sensores. Esta estabilidad térmica sugiere que el café ha alcanzado un estado cercano al equilibrio higrotérmico con el ambiente, donde la evaporación es mínima y la temperatura del grano, del aire sobre el café y del entorno tienden a seguir patrones similares. Este comportamiento confirma que el proceso de secado se encuentra en su etapa final y que el café ha alcanzado condiciones adecuadas para un secado homogéneo y controlado.

Figura 75. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 13 de septiembre en el secado de café en Génova



5.1.3 Análisis de la toma de datos en el municipio de Albán

En el municipio de Albán, la toma de datos correspondió a una segunda campaña de medición, realizada con un lote de café diferente, el cual ya se encontraba en una etapa más avanzada del secado desde el inicio. Esta condición permitió analizar el comportamiento de la humedad relativa y la temperatura relativa cuando el café presenta menores contenidos de agua. Durante esta campaña se registraron condiciones climáticas variables, incluyendo periodos de

sol, cielo nublado y tomas bajo techo, lo que permitió evaluar la influencia de estas variaciones sobre el proceso de secado utilizando el sistema de rastrillo mecanizado.

5.1.3.1 Comportamiento de la humedad en el proceso de secado de café Albán

En el municipio de Albán, las mediciones se realizaron sobre un lote de café diferente, el cual presentaba un contenido de humedad inicial considerablemente menor en comparación con Génova. Esto se reflejó en lecturas de humedad relativa más bajas desde el inicio del monitoreo, como se observa en la Tabla 5, sin alcanzarse condiciones de saturación. El café ya se encontraba en una etapa más avanzada del proceso de secado, por lo que los valores registrados fueron más estables.

A diferencia de Génova, durante las jornadas de medición en Albán se presentaron condiciones climáticas variables, alternando momentos de exposición directa al sol, cielo nublado y tomas bajo techo. Esta variabilidad generó fluctuaciones en la humedad relativa registrada por los sensores, observándose descensos durante los periodos de mayor radiación solar y aumentos temporales cuando el café se encontraba bajo techo o en condiciones nubladas. Estos cambios evidencian la influencia directa del clima sobre el comportamiento higrométrico del café durante el proceso de secado.

Tabla 5. muestra de datos soleado dispositivo IoT, Alban

Fecha	Hora	Muestra	DH200X		Muestra	IoT			
			Humedad del café (00,0%)	Temperatura del café (00°C)		Sección	Humedad del café IoT (00,0%)	Temperatura del café IoT (00°C)	Temperatura ambiente (00°C)
7/10/2025	2:00pm	M1 Superior	48,30	28,90	S1 Superior	38,20	34,30	37,10	28,20
		M2 Medio	48,30	29,20	S2 Medio	38,70	24,50		
		M3 Inferior	41,20	28,10	S3 Inferior	36,90	28,30		
7/10/2025	4:00pm	M1 Superior	39,10	27,40	S1 Superior	45,00	28,90	30,50	42,00
		M2 Medio	39,00	27,70	S2 Medio	38,40	29,60		
		M3 Inferior	38,80	27,80	S3 Inferior	39,60	30,50		
7/10/2025	6:00pm	M1 Superior	37,00	26,10	S1 Superior	46,80	26,70	24,40	48,00
		M2 Medio	37,20	26,10	S2 Medio	61,00	27,60		
		M3 Inferior	37,40	26,10	S3 Inferior	55,60	28,70		
8/10/2025	8:00am	M1 Superior	32,10	20,80	S1 Superior	43,20	26,70	25,30	45,30
		M2 Medio	26,80	20,50	S2 Medio	44,10	26,80		
		M3 Inferior	34,60	19,90	S3 Inferior	44,00	27,20		
8/10/2025	10:00am	M1 Superior	30,30	21,40	S1 Superior	49,10	26,30	23,40	48,90

		M2 Medio	30,90	21,40	S2 Medio	39,20	26,40		
		M3 Inferior	27,90	22,70	S3 Inferior	37,70	26,50		
8/10/2025	12:00m	M1 Superior	36,90	24,10	S1 Superior	39,30	26,10	25,50	42,10
		M2 Medio	30,40	23,40	S2 Medio	39,80	26,10		
		M3 Inferior	27,80	23,40	S3 Inferior	39,40	26,30		
8/10/2025	2:00pm	M1 Superior	27,10	20,60	S1 Superior	48,30	20,40	24,00	52,20
		M2 Medio	27,10	20,60	S2 Medio	48,40	24,10		
		M3 Inferior	27,10	20,60	S3 Inferior	48,70	24,20		
8/10/2025	4:00pm	M1 Superior	32,30	21,20	S1 Superior	69,00	23,70	23,80	51,50
		M2 Medio	32,20	21,20	S2 Medio	70,00	23,70		
		M3 Inferior	32,20	21,20	S3 Inferior	52,00	24,40		
8/10/2025	6:00pm	M1 Superior	27,30	19,10	S1 Superior	73,00	22,00	21,30	74,30
		M2 Medio	32,90	19,30	S2 Medio	79,00	22,80		
		M3 Inferior	32,80	19,20	S3 Inferior	72,20	22,80		

Figura 76. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 7 de octubre en el secado de café en Albán

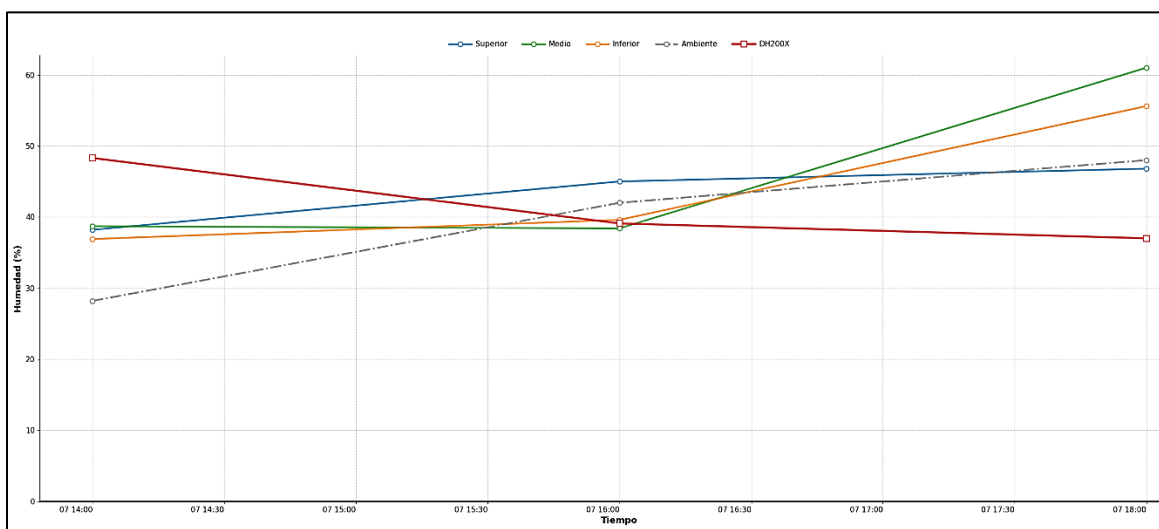


Figura 77. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 8 de octubre en el secado de café en Albán

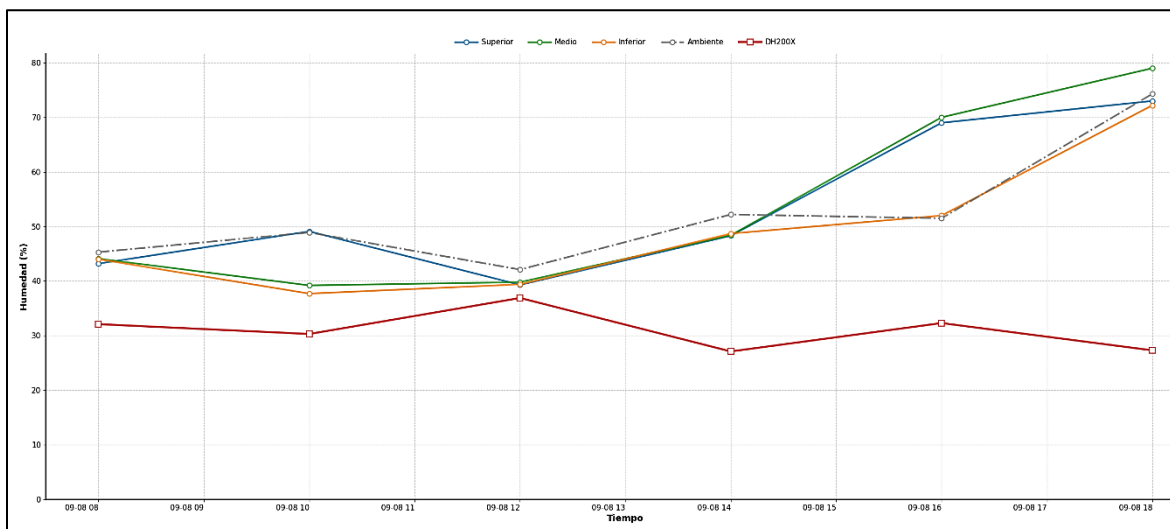
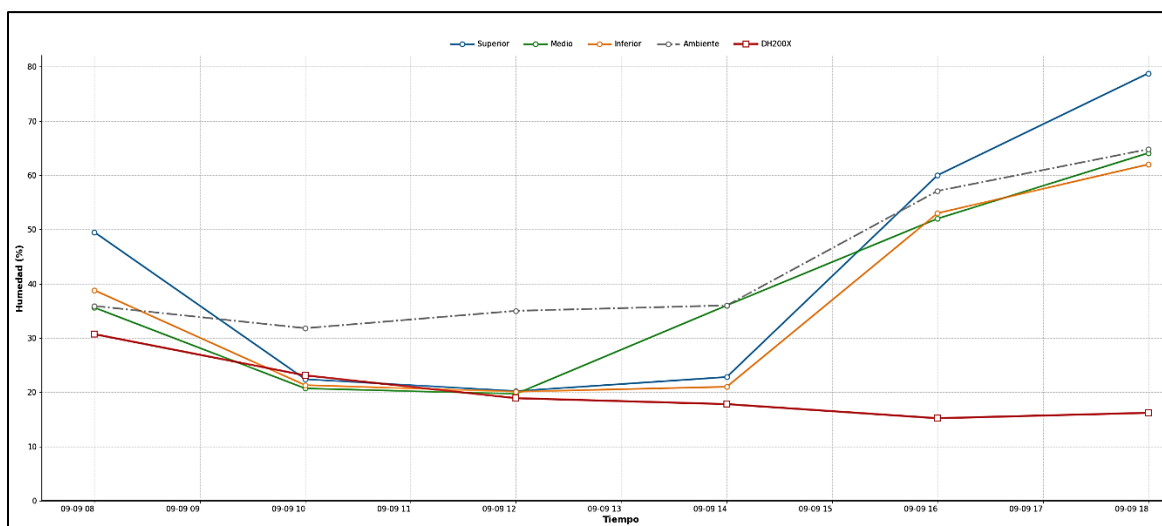


Figura 78. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 9 de octubre en el secado de café en Albán



En el municipio de Albán, el comportamiento de la humedad presentó una alta dispersión a lo largo del tiempo, asociada principalmente a la variabilidad climática y a la forma en que se realizaron las tomas de datos. A diferencia de Génova, donde el clima fue más estable, en Albán se registraron condiciones cambiantes entre periodos soleados, nublados, llovizna y mediciones bajo techo, lo que influyó directamente en los valores medidos.

Los sensores IoT, especialmente el sensor S1 ubicado en la parte superior del café, registraron la humedad relativa del aire generado por la evaporación del grano. En momentos de exposición al sol, la humedad relativa medida tendió a disminuir debido a una mayor evaporación. Sin embargo, cuando el café fue trasladado a sombra o bajo techo, o cuando el

clima se tornó nublado o con llovizna, se observó un aumento de la humedad relativa, producto de la acumulación de vapor y la menor capacidad del aire para disiparlo. Esta alternancia de condiciones explica las oscilaciones observadas en las gráficas de humedad durante los primeros días de medición.

El medidor DH200X, encargado de medir la humedad real del grano, también mostró variaciones que no solo dependen del avance del secado, sino del momento específico en el que se realizó la medición. En algunos casos, el café fue muestreado inmediatamente después de estar expuesto a ambientes más húmedos o bajo techo, lo que generó valores de humedad ligeramente más altos. En otros momentos, la medición se realizó tras periodos de exposición al sol, reflejando valores más bajos. Aun así, al analizar la tendencia general, el DH200X evidencia una disminución progresiva de la humedad del grano, confirmando que el proceso de secado continuó avanzando pese a las fluctuaciones climáticas.

En conjunto, los resultados muestran que en Albán la humedad relativa medida por los sensores IoT responde de forma inmediata a los cambios del clima y del entorno del café, mientras que la humedad real del grano, medida con el DH200X, depende tanto del estado del secado como del momento y las condiciones bajo las cuales se realiza la toma. Por esta razón, el análisis combinado de ambos tipos de medición resulta fundamental para interpretar correctamente el comportamiento del secado en escenarios de clima variable.

Figura 79. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 10 de octubre en el secado de café en Albán

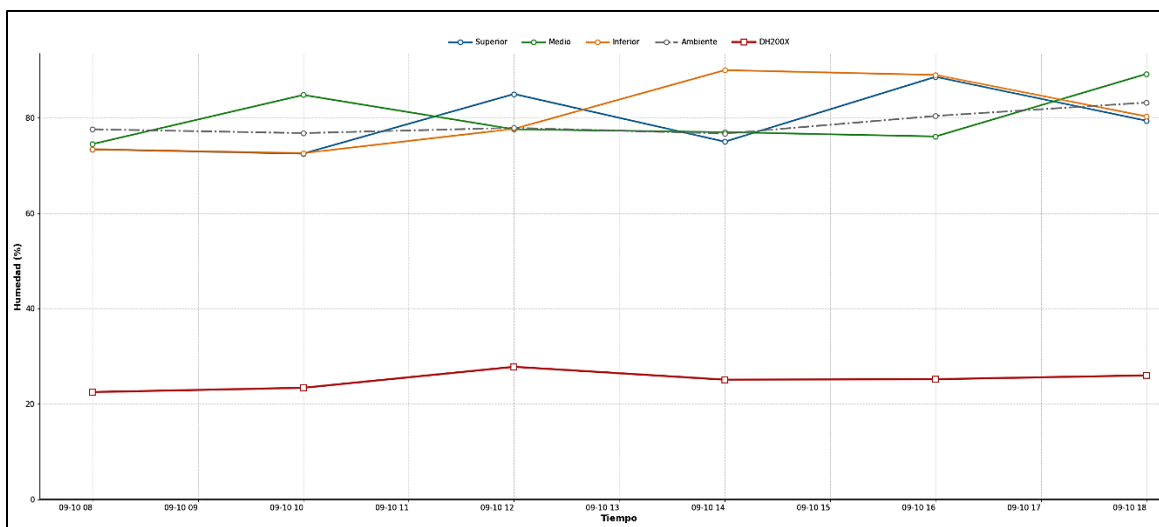
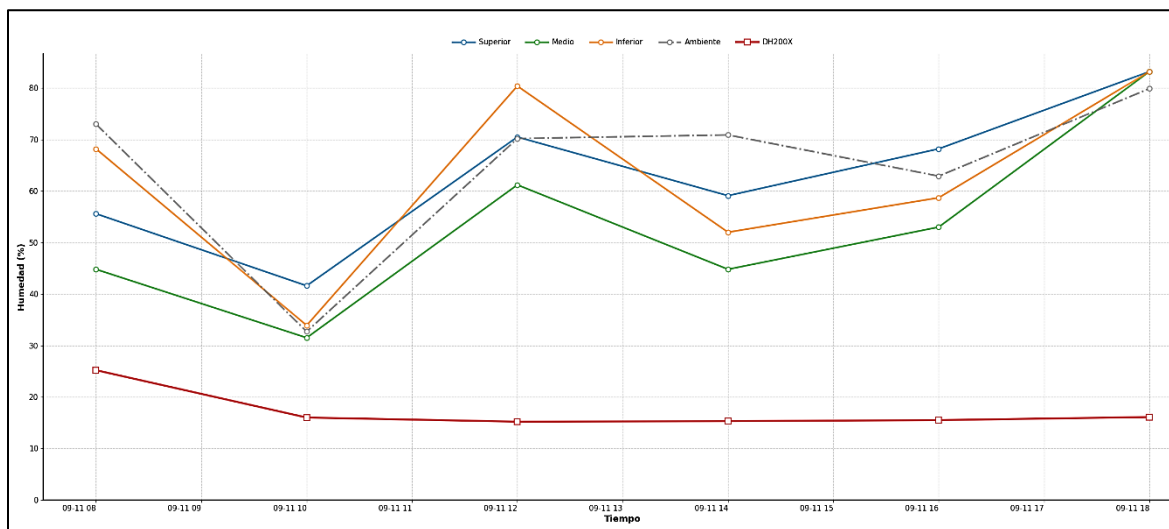


Figura 80. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 11 de octubre en el secado de café en Albán



En las figuras 78 a 80, durante este periodo, el comportamiento de la humedad estuvo fuertemente condicionado por las condiciones climáticas inestables, caracterizadas por episodios de lluvia, cielo nublado y momentos puntuales de sol con nube, tal como se registra en las observaciones de los datos. Esta variabilidad provocó un aumento general de la humedad relativa tanto en los sensores ubicados en el café como en el ambiente.

En los sensores S1, S2 y S3 se observan incrementos marcados de humedad, con valores que en varios momentos superan el 75 % especialmente cuando el café permaneció bajo lluvia o alta nubosidad. La cercanía entre las lecturas de S2 y S3 indica que, bajo estas condiciones, la masa de café tendió a homogenizar su humedad interna, reduciendo los gradientes verticales observados en días más secos. S1, al estar más expuesto, mostró mayor sensibilidad a los cambios ambientales, reflejando aumentos rápidos cuando la humedad ambiente se elevaba.

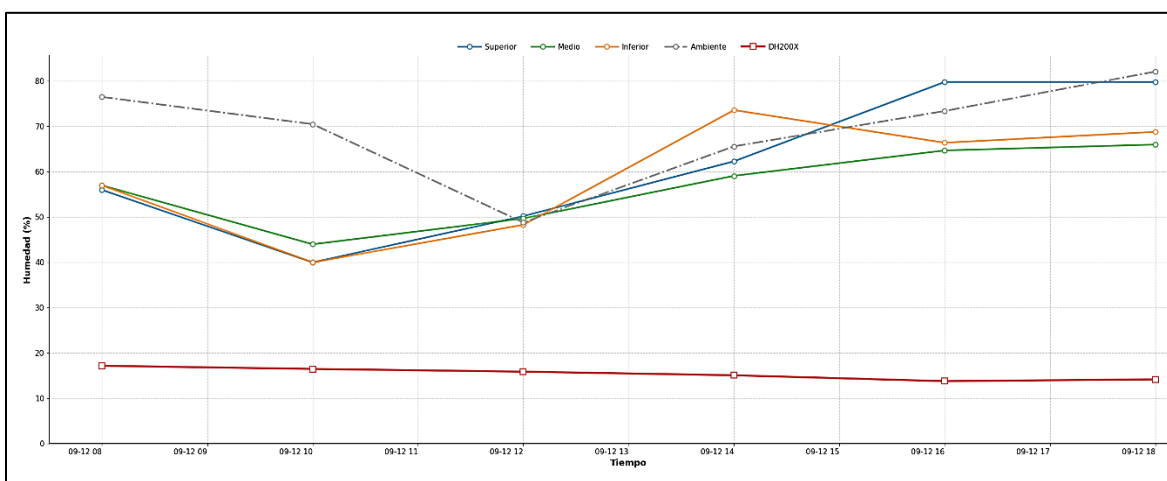
La humedad ambiente también se mantuvo elevada durante estos días, generalmente en rangos aproximados del 70%, lo que limitó la capacidad de evaporación y favoreció la reabsorción de humedad por parte del café. Esto explica que, a diferencia de jornadas más soleadas, no se observe una tendencia clara de descenso, sino más bien oscilaciones y repuntes en la humedad registrada.

En cuanto al DH200X, que representa la humedad real del grano, se evidencia un comportamiento coherente con el clima y con el momento puntual de la medición. Los valores se mantuvieron mayoritariamente en un rango aproximado del 20–30 %, mostrando incrementos cuando el café fue medido tras periodos de lluvia o alta humedad, y ligeras reducciones en

momentos de menor carga de humedad. Estas variaciones confirman que la lectura del DH200X depende no solo del estado global del secado, sino también de la condición inmediata del grano al momento de la toma, validando su uso como referencia directa del contenido de humedad real.

En conjunto, estos días evidencian que en Albán el proceso de secado estuvo fuertemente restringido por el clima, generando aumentos temporales de humedad y retrasando la pérdida progresiva de agua del grano. Los resultados refuerzan la necesidad de ajustar el manejo del café y los ciclos de rastrillado en función de las condiciones ambientales, especialmente en escenarios de lluvia y alta nubosidad.

Figura 81. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 12 de octubre en el secado de café en Albán



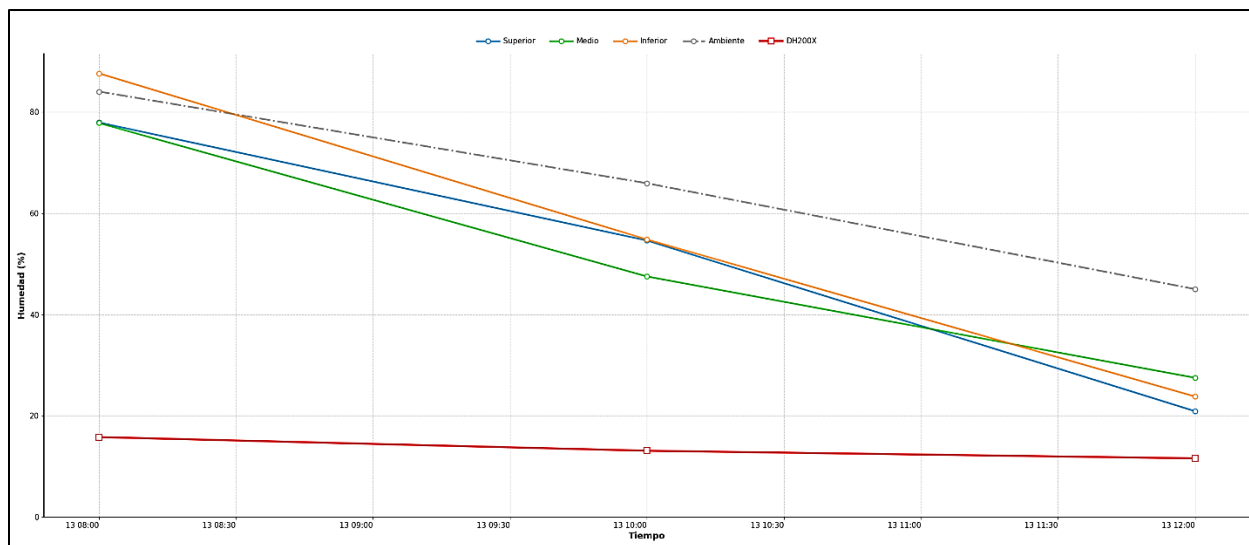
En la última gráfica de la figura 81 se observa una disminución marcada de la humedad en todos los sensores a lo largo de la jornada. Durante la mañana, con condiciones inicialmente nubladas y alta humedad ambiental, el café mantiene valores elevados de humedad; sin embargo, a medida que el clima evoluciona hacia sol con nubes y posteriormente a sol directo, la evaporación se intensifica y la humedad del café desciende rápidamente.

En este punto se evidencia que la humedad ambiente llega a ser mayor que la registrada por el sensor S1. Esto se explica por la variación climática del día: tras periodos de alta humedad, la presencia de sol intenso favoreció una disipación rápida de la humedad superficial del café ya que en este municipio el clima puede llegar a picos de temperatura muy elevados a comparación de Genova. Al estar el sensor S1 más expuesto al calor y a la radiación solar directa, registró una reducción más acelerada de la humedad en comparación con el ambiente, donde la humedad relativa disminuyó de forma más gradual.

Los sensores S2 y S3 presentan comportamientos muy similares entre sí, lo que indica una mayor estabilidad y homogeneidad del secado en las capas media e inferior del café. La humedad ambiente, aunque elevada al inicio, disminuye progresivamente, manteniendo el gradiente necesario para el proceso de secado.

Por su parte, el DH200X muestra una reducción continua de la humedad real del grano, pasando de valores cercanos al 15–16 % hasta aproximarse al rango de 10–12 %, confirmando que el proceso alcanzó un secado adecuado. Este comportamiento final refleja un secado más eficiente y controlado, condicionado principalmente por la mejora de las condiciones climáticas y la exposición directa del café al sol.

Figura 82. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 13 de octubre en el secado de café en Alban



5.1.3.2 Comportamiento de la temperatura en el proceso de secado de café Albán

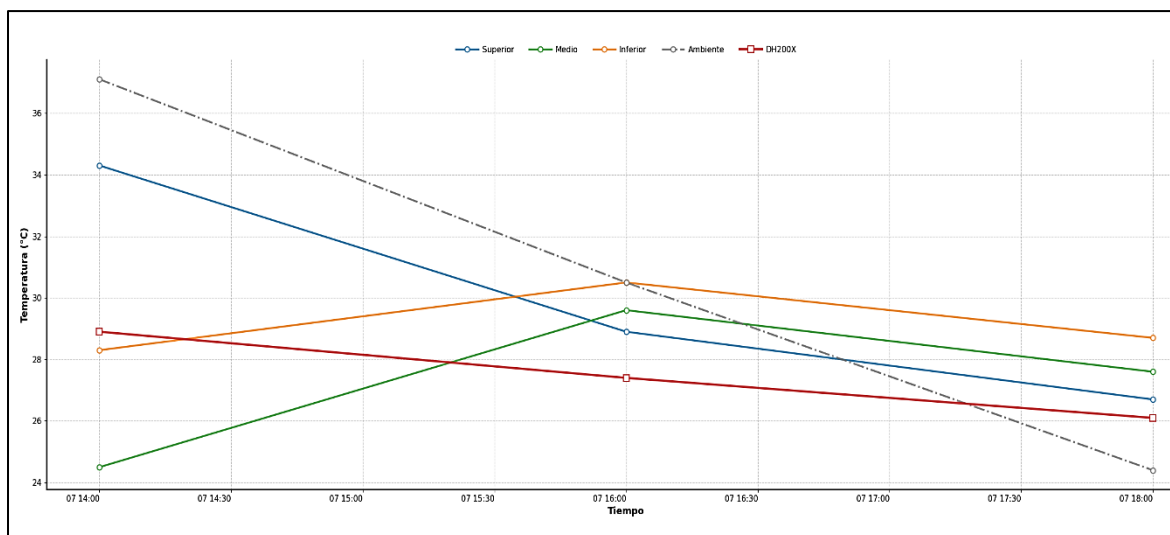
En Albán, el café utilizado presentaba un menor contenido de humedad desde el inicio, lo que se reflejó en un comportamiento térmico distinto al observado en Génova. Las mediciones mostraron una temperatura relativa más cercana a la temperatura ambiente durante gran parte del monitoreo, debido a que la evaporación fue menos intensa al tratarse de un café más seco.

Figura 83. Toma de datos Albán



Adicionalmente, en Albán se presentaron condiciones climáticas variables, alternando entre sol directo, cielo nublado y tomas bajo techo. Esta variabilidad influyó directamente en las lecturas de temperatura: durante los periodos de sol, la temperatura relativa aumentó de forma gradual, mientras que en condiciones nubladas o bajo techo se mantuvo más estable y cercana al ambiente. Al disminuir la humedad del café, el efecto de enfriamiento por evaporación fue mínimo, permitiendo que el aire alrededor del grano se calentara con mayor facilidad.

Figura 84. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 7 de octubre en el secado de café en Albán



A partir de los datos registrados, se evidencia que la temperatura del café y del ambiente presenta variaciones marcadas, directamente asociadas a los cambios climáticos durante la jornada. En los periodos con exposición solar directa, especialmente en horas de la tarde, se registran las temperaturas más altas, tanto en los sensores ubicados sobre el café (S1, S2 y S3) como en el ambiente. Este incremento se debe a la radiación solar incidente, que eleva rápidamente la temperatura superficial del grano y del aire circundante.

Cuando el clima cambia a nublado, con viento o llovizna, se observa una disminución progresiva de la temperatura. En estos casos, el enfriamiento del ambiente y el aumento de la humedad relativa reducen la ganancia térmica del café, generando descensos más pronunciados, especialmente en el sensor superior (S1), que es el más expuesto a las condiciones externas. Bajo condiciones de techo, la temperatura tiende a estabilizarse, con valores más bajos y variaciones más suaves, al eliminarse la radiación solar directa.

Los sensores S2 y S3 muestran una respuesta térmica más amortiguada en comparación con S1, debido a su ubicación dentro de la masa de café. Esto indica que el grano actúa como un amortiguador térmico, reteniendo calor y liberándolo de forma más lenta, lo que explica por qué las variaciones en estos sensores son menos abruptas.

Figura 85. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 8 de octubre en el secado de café en Albán

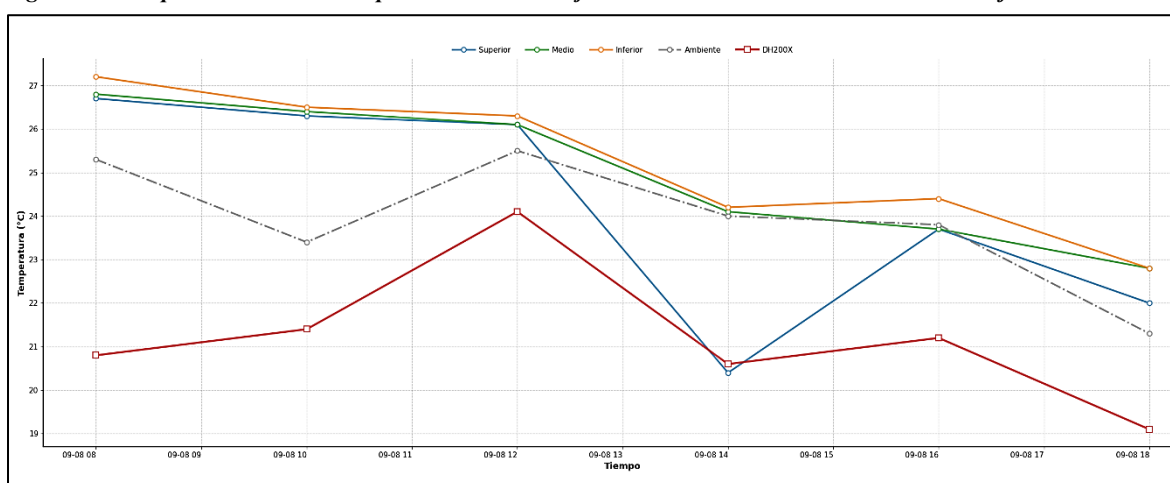
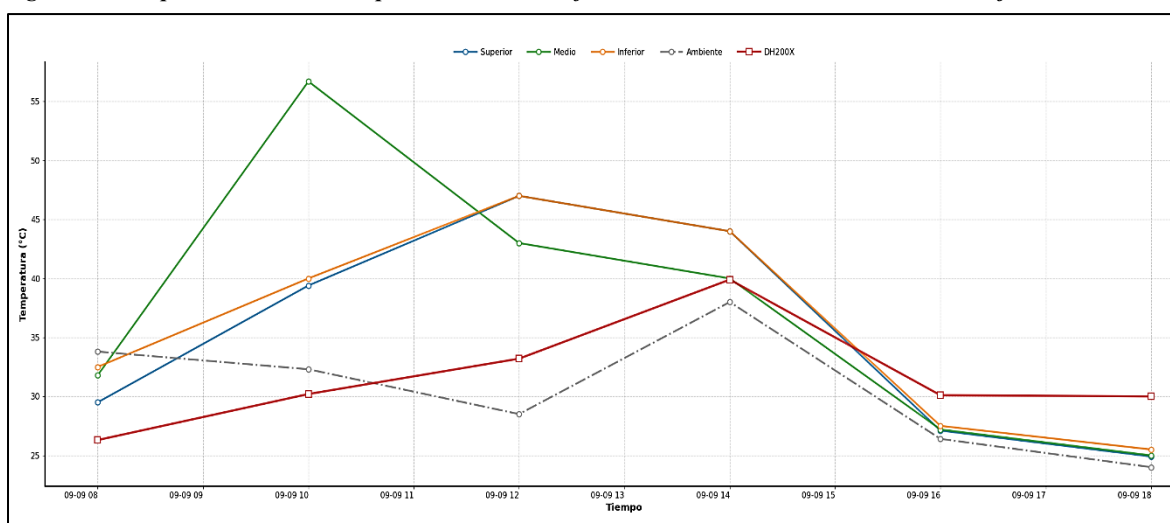


Figura 86. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 9 de octubre en el secado de café en Albán



El DH200X presenta un comportamiento distinto al de los sensores externos, con cambios más graduales en la temperatura medida. Al registrar la temperatura real del grano, su respuesta depende del estado térmico interno del café y no únicamente del ambiente inmediato. En momentos de sol intenso, el DH200X puede mantenerse estable o aumentar de forma más lenta, mientras que durante periodos nublados o bajo techo conserva el calor acumulado, mostrando una inercia térmica clara frente a los cambios rápidos del clima.

Figura 87. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 10 de octubre en el secado de café en Albán

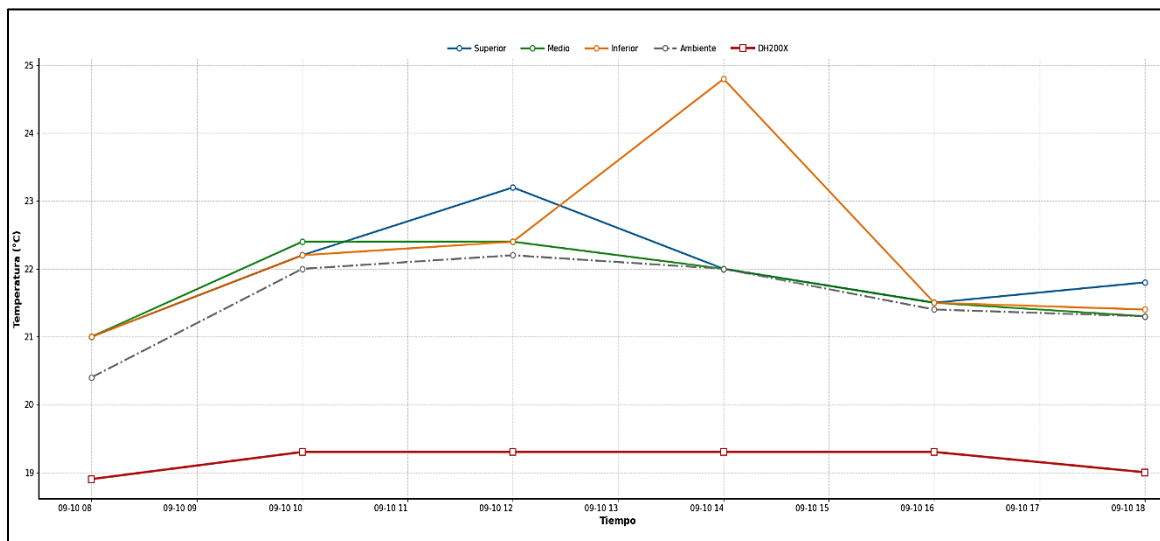
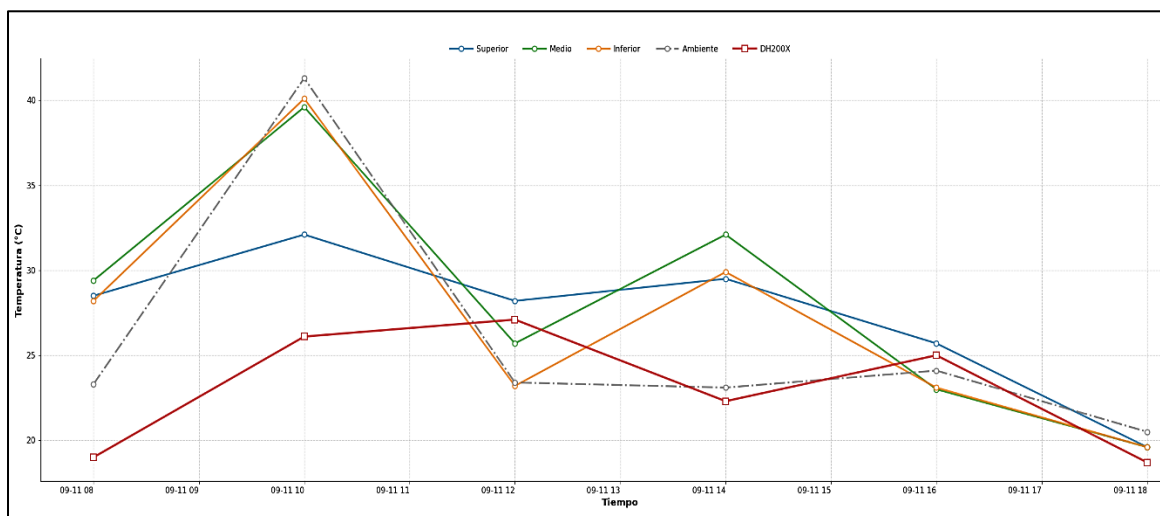


Figura 88. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 11 de octubre en el secado de café en Albán



En conjunto, los datos confirman que la alta variabilidad climática de Albán genera respuestas térmicas dispersas, donde la exposición solar eleva rápidamente la temperatura del café, y los cambios a sombra, viento o lluvia provocan descensos notables. La combinación de

sensores ambientales, sensores en la masa de café y el DH200X permite identificar claramente estas transiciones y comprender cómo el clima condiciona el comportamiento térmico durante el proceso de secado.

Figura 89. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 12 de octubre en el secado de café en Albán

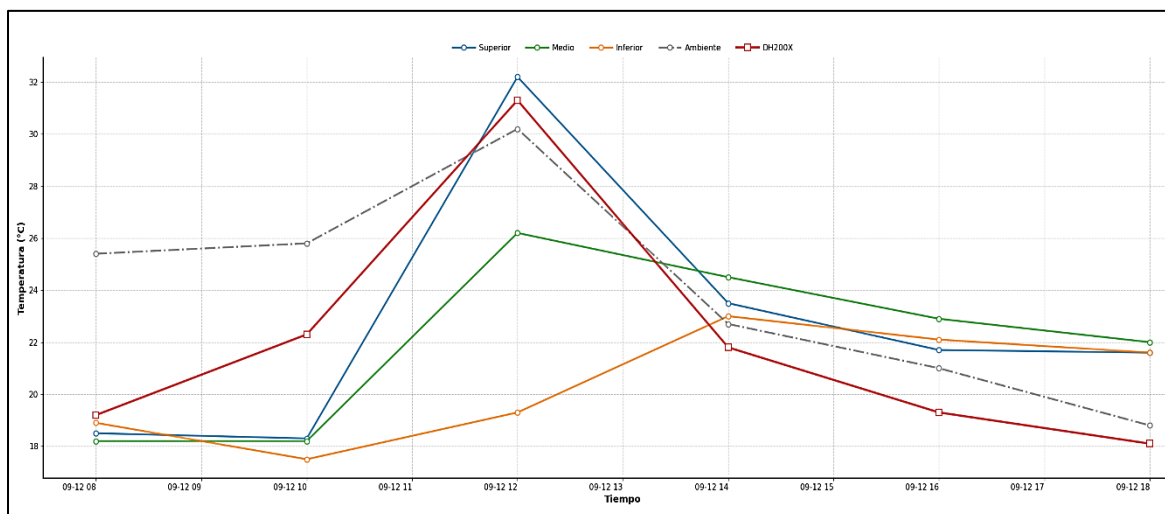
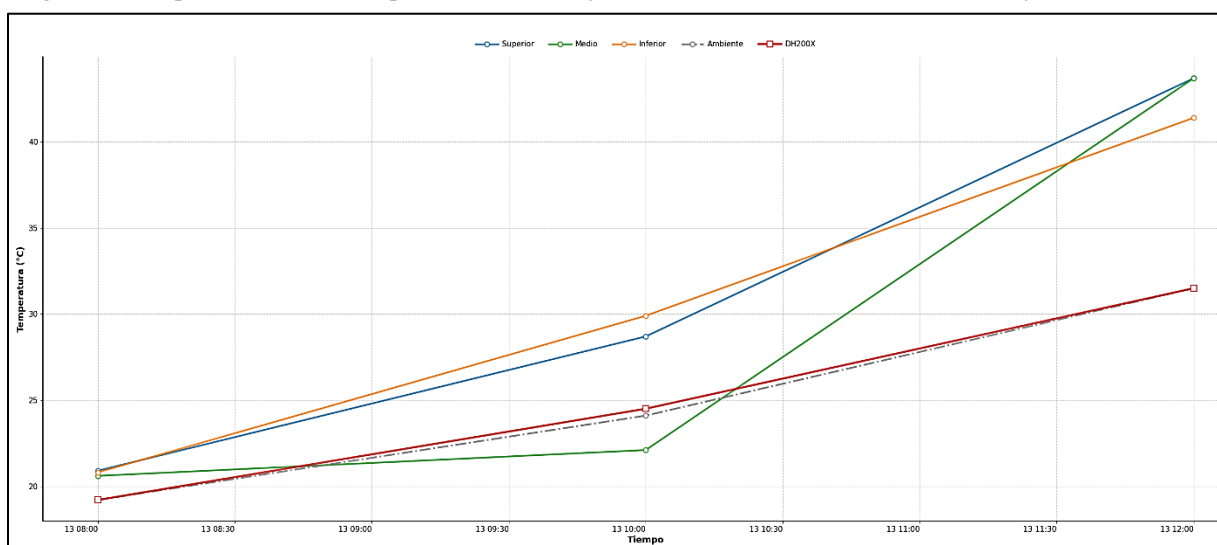


Figura 90. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 13 de octubre en el secado de café en Albán



5.1.4 Análisis de la toma de datos en el municipio de Sandoná

La toma de datos realizada en el municipio de Sandoná corresponde a una etapa adicional de validación del sistema IoT y del rastrillo mecanizado, empleando un lote nuevo de café en estado húmedo, iniciado prácticamente desde cero en el proceso de secado. Este escenario permitió analizar nuevamente el comportamiento del café en condiciones de alta humedad

inicial, de manera similar a Génova, pero en un contexto operativo distinto y con una segunda campaña de medición.

Las mediciones se realizaron utilizando el dispositivo IoT con tres sensores BME280 distribuidos en la masa de café, S1 en la parte superior, S2 en el centro y S3 en el fondo, junto con instrumentos de referencia como el termohigrómetro comercial y el medidor de humedad DH200X. El café fue dispuesto sobre el sistema mecánico de rastrillo, el cual permitió el desplazamiento y redistribución del grano durante la jornada, exponiendo progresivamente diferentes zonas del lote al ambiente.

Tabla 6. Muestra de datos Sandoná

Fecha	Hora	Muestra	DH200X		Muestra	IoT			
			dd/mm/yy	00:00 am/pm		Sección	Humedad del café (00,0%)	Temperatura del café (00°C)	Sección
26/10/2025	8:00 a. m.	M1 Superior	24,60	20,10	S1 Superior	100,00	25,00	22,10	87,10
		M2 Medio	23,80	27,90	S2 Medio	92,50	23,50		
		M3 Inferior	23,30	20,40	S3 Inferior	87,80	24,10		
26/10/2025	10:00 a. m.	M1 Superior	39,70	29,00	S1 Superior	89,60	34,90	29,10	63,00
		M2 Medio	39,70	30,60	S2 Medio	69,00	34,60		
		M3 Inferior	41,20	31,20	S3 Inferior	69,80	37,80		
26/10/2025	12:00 p. m.	M1 Superior	27,80	29,90	S1 Superior	76,00	32,90	29,80	56,30
		M2 Medio	27,40	29,60	S2 Medio	61,00	34,30		
		M3 Inferior	27,00	30,60	S3 Inferior	54,20	34,30		
26/10/2025	2:00 p. m.	M1 Superior	27,10	26,80	S1 Superior	81,00	27,60	26,40	68,10
		M2 Medio	27,20	26,80	S2 Medio	74,00	27,90		
		M3 Inferior	26,30	26,80	S3 Inferior	71,00	27,50		
26/10/2025	4:00 p. m.	M1 Superior	27,80	21,40	S1 Superior	95,30	24,50	24,20	78,10
		M2 Medio	29,10	21,20	S2 Medio	84,20	24,50		
		M3 Inferior	28,20	21,80	S3 Inferior	80,60	24,70		
26/10/2025	6:00 p. m.	M1 Superior	28,60	20,30	S1 Superior	100,00	23,40	22,80	78,10
		M2 Medio	31,00	20,50	S2 Medio	87,30	23,20		
		M3 Inferior	29,70	20,20	S3 Inferior	83,90	23,50		
27/10/2025	8:00 a. m.	M1 Superior	31,40	19,10	S1 Superior	100,00	21,70	21,40	86,10
		M2 Medio	30,30	19,20	S2 Medio	93,00	21,80		
		M3 Inferior	30,30	19,00	S3 Inferior	85,50	22,30		
27/10/2025	10:00 a. m.	M1 Superior	26,50	28,10	S1 Superior	83,00	38,70	34,40	50,90
		M2 Medio	27,30	30,20	S2 Medio	70,00	37,00		
		M3 Inferior	27,80	29,70	S3 Inferior	55,50	38,90		

27/10/2025	12:00 a. m.	M1 Superior	31,40	19,80	S1 Superior	66,00	37,00	31,80	53,70
		M2 Medio	32,00	20,00	S2 Medio	56,00	36,20		
		M3 Inferior	33,00	18,90	S3 Inferior	42,00	39,40		
27/10/2025	2:00 p. m.	M1 Superior	16,70	31,20	S1 Superior	50,00	38,50	39,00	40,30
		M2 Medio	17,20	31,40	S2 Medio	39,00	41,00		
		M3 Inferior	16,10	32,00	S3 Inferior	45,00	41,80		
27/10/2025	4:00 p. m.	M1 Superior	15,90	26,30	S1 Superior	64,00	29,00	27,60	61,00
		M2 Medio	15,70	26,20	S2 Medio	66,00	27,70		
		M3 Inferior	15,70	26,30	S3 Inferior	62,00	28,00		
27/10/2025	6:00 p. m.	M1 Superior	16,70	21,50	S1 Superior	84,50	24,50	23,90	74,70
		M2 Medio	17,60	21,70	S2 Medio	76,40	24,80		
		M3 Inferior	16,50	21,50	S3 Inferior	74,80	24,60		

5.1.4.1 Comportamiento de la humedad en Sandoná

Debido a que el café utilizado en Sandoná se encontraba mojado, los sensores registraron valores saturados de humedad desde el inicio, especialmente en los primeros días de medición. El sensor S1 presentó los valores más altos en las etapas iniciales, ya que la evaporación del agua superficial generó una acumulación de vapor en la capa superior del café. Por su parte, los sensores S2 y S3 mostraron humedades relativas también elevadas, aunque con una ligera atenuación debido a la menor exposición directa al aire.

Con el paso de los días, se observó una disminución progresiva de la humedad relativa en los tres niveles, evidenciando el avance del proceso de secado. El movimiento periódico del rastrillo mecanizado favoreció la homogenización del lote, reduciendo gradualmente las diferencias entre sensores. Este comportamiento es consistente con los datos registrados en el archivo de Excel, donde se aprecia una tendencia descendente clara en la humedad relativa conforme aumenta el tiempo de exposición al ambiente.

Figura 91. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 26 de octubre en el secado de café en Sandoná

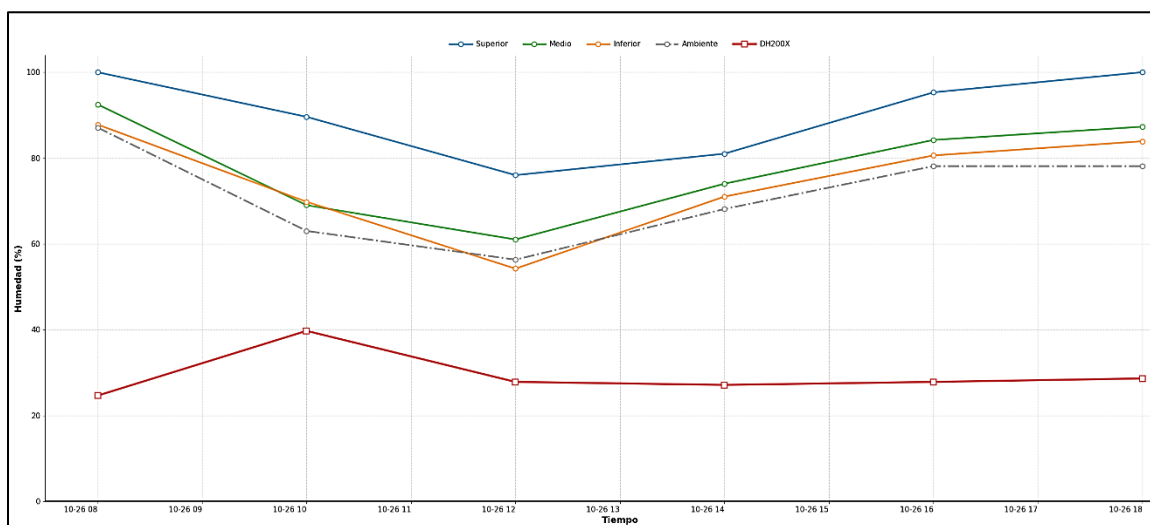
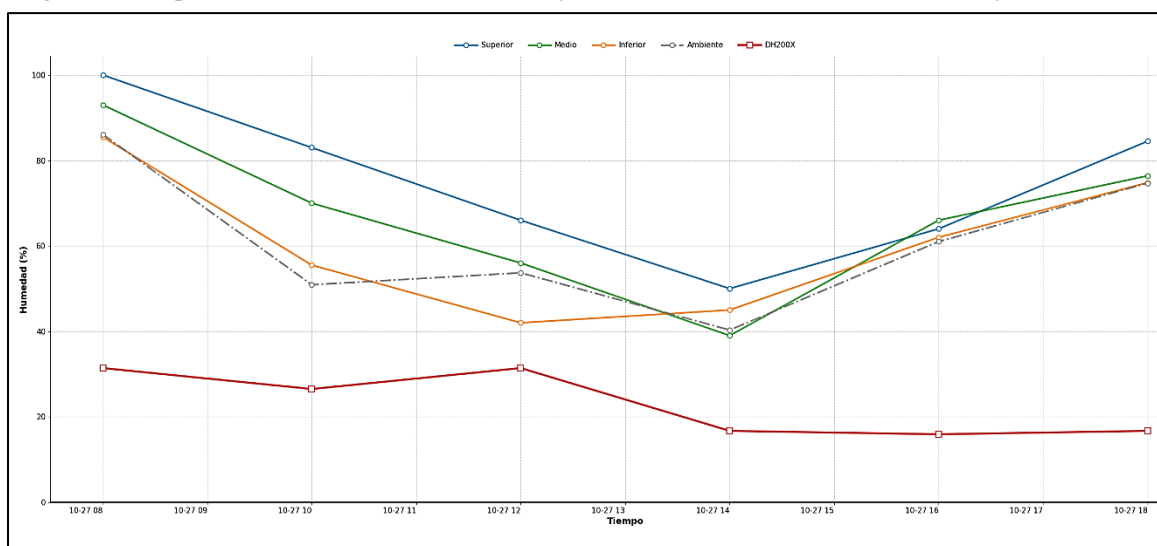


Figura 92. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 27 de octubre en el secado de café en Sandoná



Durante el primer periodo, el proceso de secado del café en Sandoná estuvo marcado por una alta variabilidad climática, caracterizada por condiciones de llovizna bajo techo, nubosidad persistente y momentos puntuales de sol, especialmente hacia el mediodía del último día. Estas condiciones influyeron directamente en el comportamiento de la humedad del café y en la respuesta de los sensores ubicados en los diferentes puntos del café.

En general, se observan valores elevados de humedad del café durante las primeras horas de la mañana, asociados a una alta humedad ambiental y a la ausencia de radiación solar directa. El sensor superior S1, presenta los valores más altos y la mayor variabilidad, evidenciando su mayor exposición a las condiciones ambientales y a la evaporación que sale de la capa inferior

del café llegando a saturarse por ese motivo. A medida que avanza la jornada y se presentan periodos de clima templado o con presencia parcial de sol, la humedad del café disminuye de forma progresiva, alcanzando mínimos alrededor del mediodía y primeras horas de la tarde, cuando se favorece la evaporación.

Los sensores medio e inferior muestran un comportamiento más estable y con descensos más graduales, lo que indica que la masa de café actúa como un amortiguador de humedad, reduciendo la velocidad de pérdida en los estratos menos expuestos. En horas de la tarde, al disminuir la radiación solar y aumentar nuevamente la humedad ambiente, se evidencia una tendencia a la reabsorción superficial de humedad, especialmente en el estrato superior, reflejando la sensibilidad del café a los cambios rápidos del entorno.

El DH200X presenta valores considerablemente más bajos que los sensores superficiales y con variaciones suaves a lo largo del periodo, lo cual confirma que el contenido interno de humedad del grano no responde de manera inmediata a las fluctuaciones ambientales, sino que mantiene una dinámica más lenta y continua. Esta diferencia entre los sensores externos y el DH200X permite identificar claramente los momentos de secado superficial frente al secado real del grano.

En conjunto, los resultados muestran que el secado en Sandoná durante estos tres días fue intermitente y condicionado por el clima, con fases de reducción efectiva de humedad durante periodos templados o soleados y fases de estabilización o incremento durante condiciones de nubosidad y llovizna. La combinación de sensores en distintos niveles y la medición directa con DH200X permite una comprensión integral del proceso, evidenciando la importancia de controlar la exposición al ambiente para lograr un secado más uniforme y eficiente

Figura 93. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 28 de octubre en el secado de café en Sandoná

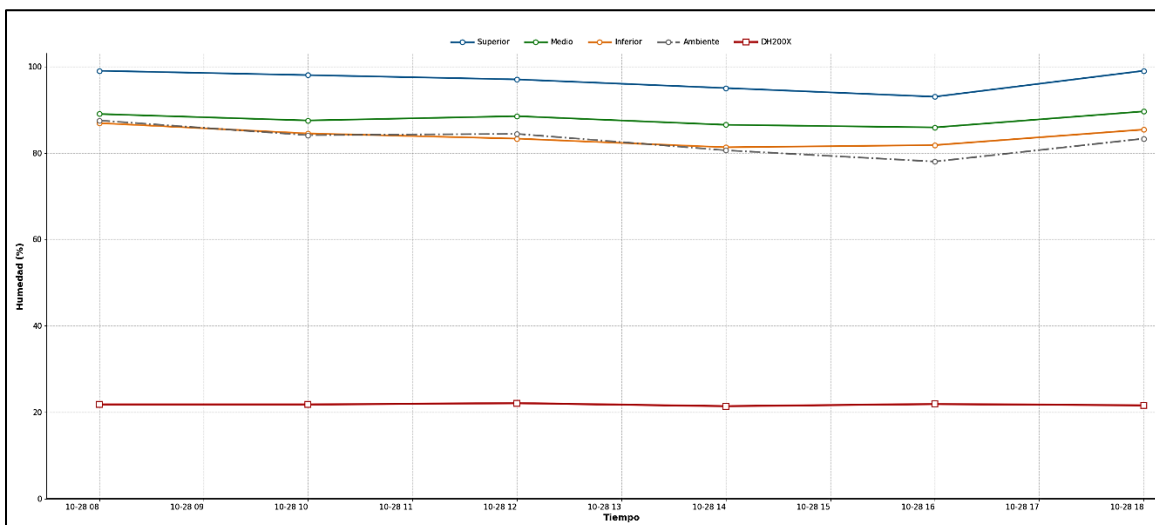
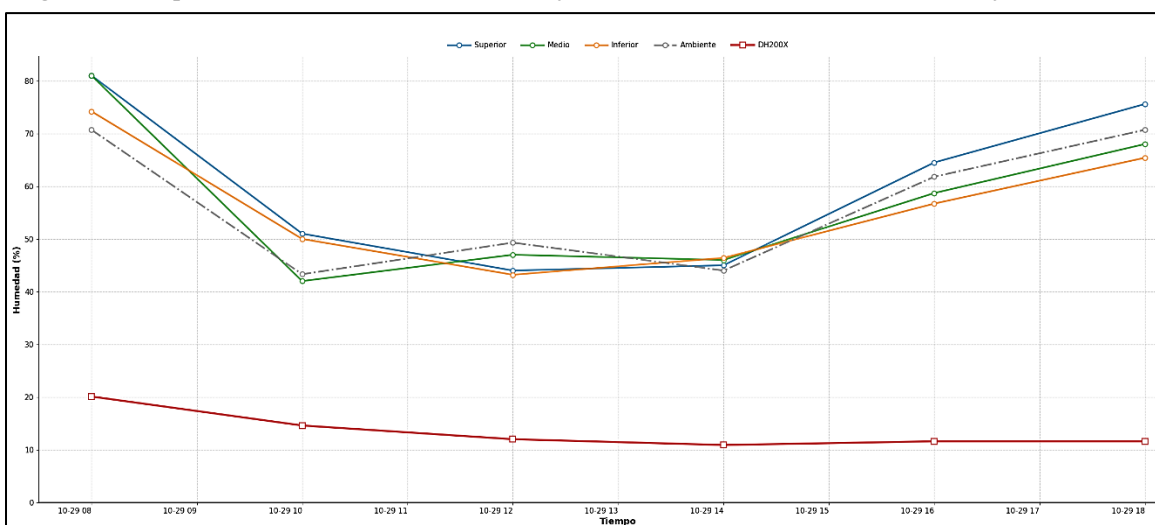


Figura 94. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 29 de octubre en el secado de café en Sandoná



En el último día como se observa en la figura 95, el proceso de secado del café en Sandoná inició bajo condiciones de alta humedad, asociadas a la presencia de nubosidad en las primeras horas del día. Esto se refleja en los valores elevados registrados en los sensores de los diferentes estratos, especialmente en el sensor superior (S1), indicando una baja tasa inicial de evaporación debido a la limitada radiación solar y al alto contenido de humedad en el ambiente.

Con el avance de la jornada, la aparición de radiación solar directa provocó un aumento en la temperatura del sistema, favoreciendo la disipación de la humedad superficial del café. En este periodo se observa un descenso progresivo de la humedad en el sensor superior, el cual responde de forma más rápida a los cambios climáticos por su mayor exposición. A diferencia de

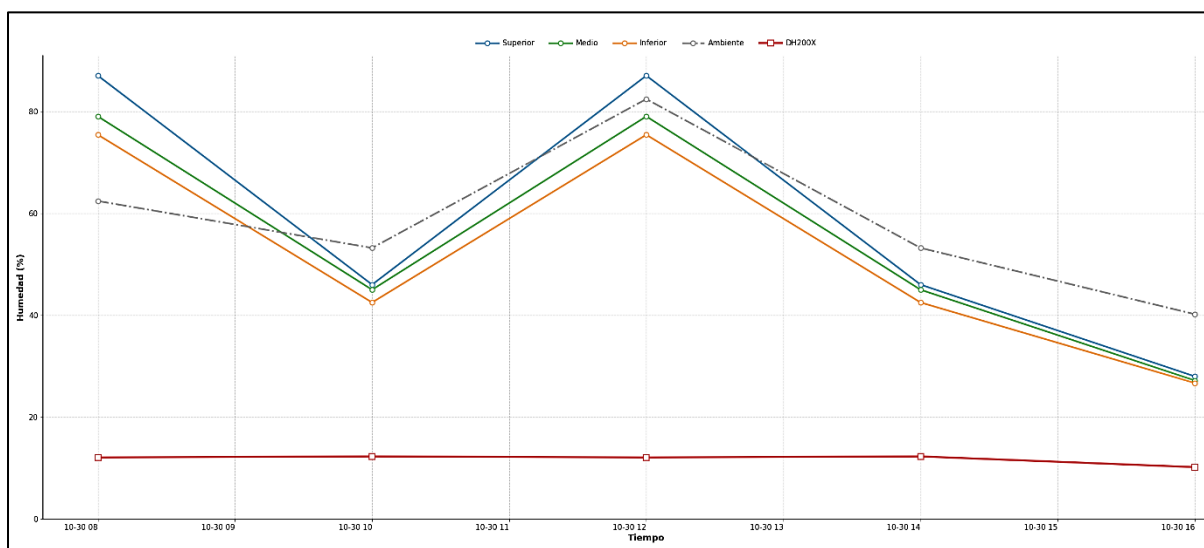
las primeras horas, la humedad del café en S1 llega a ser inferior a la humedad ambiente, evidenciando que el calentamiento del grano y la acción del sol tienen un efecto dominante sobre el proceso de secado, incluso cuando la humedad relativa del aire permanece elevada.

Los sensores ubicados en los estratos medio e inferior presentan una disminución más gradual de la humedad, lo que indica un proceso de transferencia de humedad desde el interior de la masa de café hacia la superficie. Este comportamiento sugiere un secado más estable y controlado, donde la estructura del grano actúa como un regulador frente a las variaciones externas del clima.

Por su parte, las mediciones realizadas con el DH200X se mantienen dentro del rango de 10 a 12 % de humedad, confirmando que el grano ya ha alcanzado su contenido óptimo de humedad. Esto demuestra que las variaciones observadas en los sensores superficiales corresponden principalmente a cambios en la humedad externa y no a alteraciones significativas en la humedad interna del café.

Estos resultados resaltan la importancia de considerar tanto las condiciones ambientales como la posición de los sensores para una correcta interpretación del proceso y para evitar posibles fenómenos de sobre secado en etapas avanzadas.

Figura 95. Comportamiento de la humedad durante la jornada del 30 de octubre en el secado de café en Sandoná



5.1.4.2 Comportamiento de la temperatura relativa en Sandoná

En el municipio de Sandoná, la temperatura relativa estuvo condicionada principalmente por llovizna y tomas bajo techo, sin presencia significativa de radiación solar directa. Como

resultado, los registros muestran una temperatura relativa estable y muy cercana a la temperatura ambiente, sin incrementos térmicos marcados a lo largo del periodo de medición.

La alta humedad inicial del café y la ausencia de sol hicieron que la energía disponible se utilizara principalmente en el proceso de evaporación, lo que limitó el aumento de temperatura.

Figura 96. Toma de datos Sandoná



Las diferencias entre los sensores S1, S2 y S3 fueron mínimas, aunque el sensor inferior S3 tendió a registrar valores ligeramente menores debido a una mayor retención de humedad y menor ventilación.

Este comportamiento contrasta con lo observado en Génova y Albán, confirmando que en condiciones de lluvia o sombra la temperatura relativa del café se mantiene controlada y depende más del equilibrio con el ambiente que del calentamiento por radiación solar.

Figura 97. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 26 de octubre en el secado de café en Sandoná

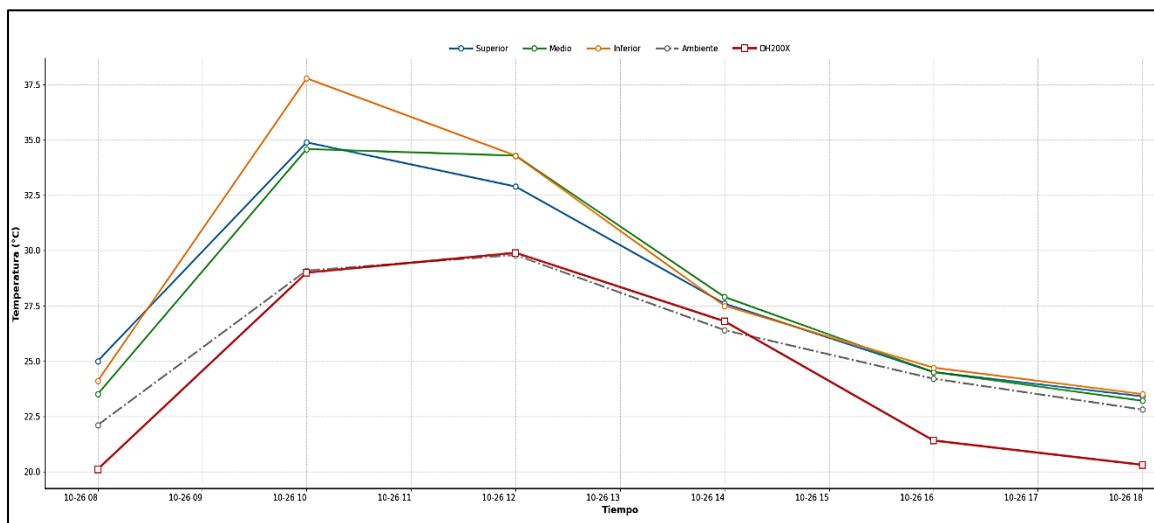
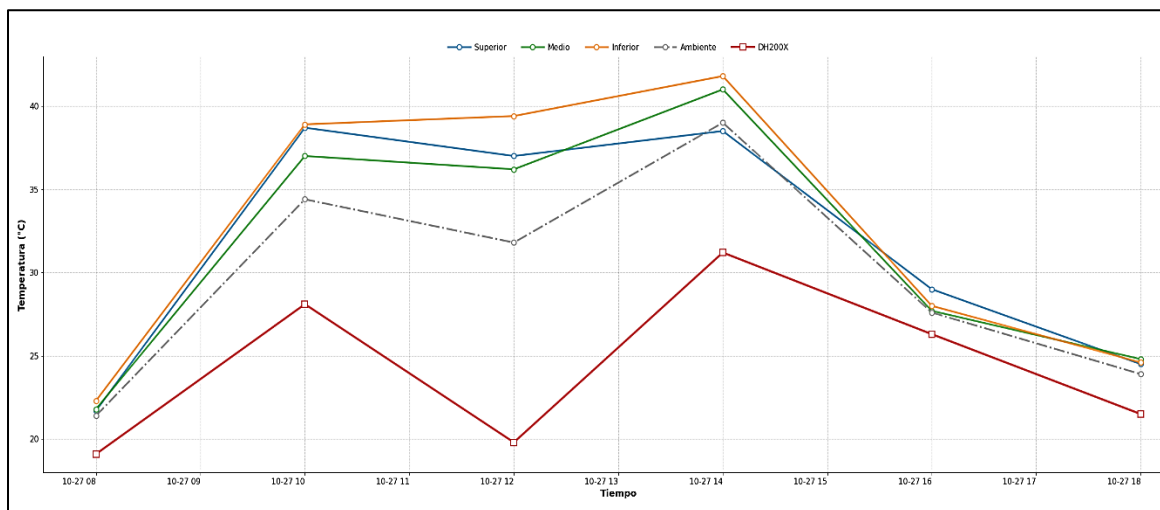


Figura 98. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 27 de octubre en el secado de café en Sandoná



El comportamiento de la temperatura del secado en Sandoná estuvo fuertemente condicionado por la variabilidad climática diaria, principalmente la alternancia entre nubosidad, llovizna y periodos de radiación solar. En las primeras horas de cada jornada, las temperaturas registradas en el sensor superior S1 se mantienen cercanas a las del ambiente, lo que indica una baja influencia de la radiación solar directa y un sistema térmicamente estable pero cuando el sol está presente la temperatura del café aumenta lo que hace que el S1 se aleje del ambiente registrando temperaturas altas. En este mismo intervalo, el DH200X presenta las temperaturas más bajas, reflejando la inercia térmica del grano y confirmando que el contenido interno del café responde de manera más lenta a los cambios externos.

Hacia la media mañana y el mediodía, se observa un incremento marcado de la temperatura en el sensor S1, alcanzando valores significativamente superiores a los del ambiente, especialmente en los días donde se presentó mayor radiación solar por unos instantes. Este comportamiento evidencia que el sensor ubicado sobre el grano capta directamente el efecto del calentamiento superficial del café, generando un gradiente térmico entre la superficie del café y el aire circundante. En contraste, el DH200X muestra aumentos más moderados y progresivos, lo que indica que el calor superficial no se transfiere de forma inmediata al interior del grano, manteniendo un proceso térmico más controlado.

Figura 99. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 28 de octubre en el secado de café en Sandoná

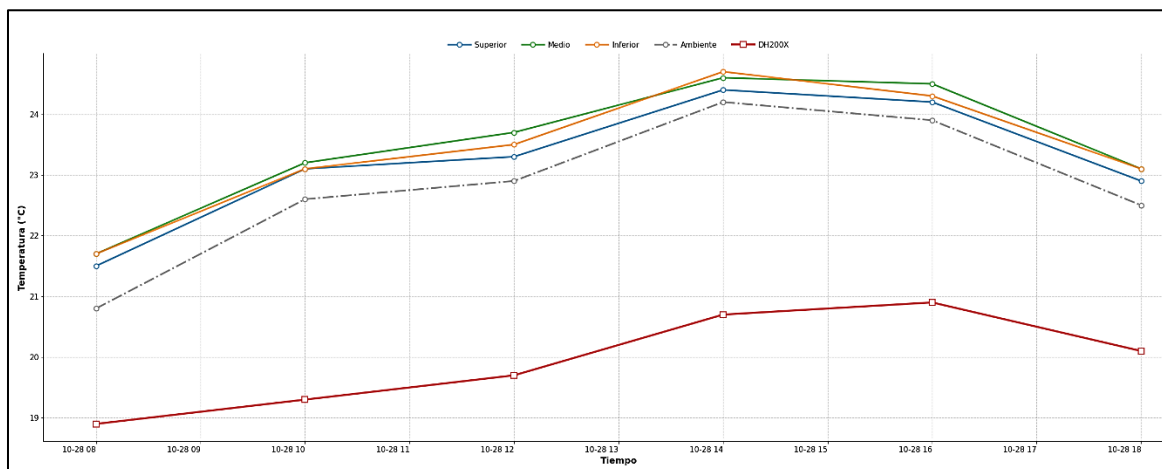
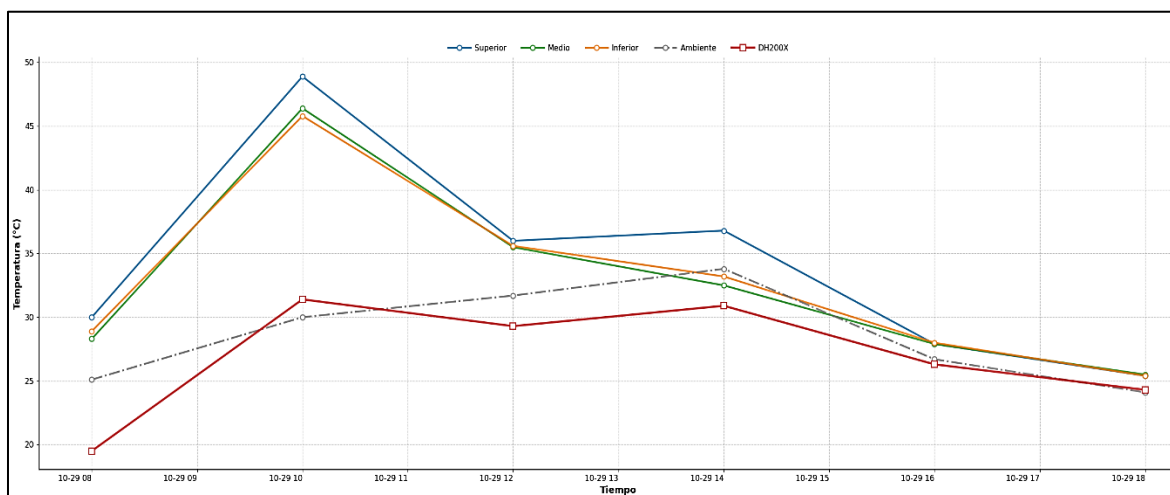
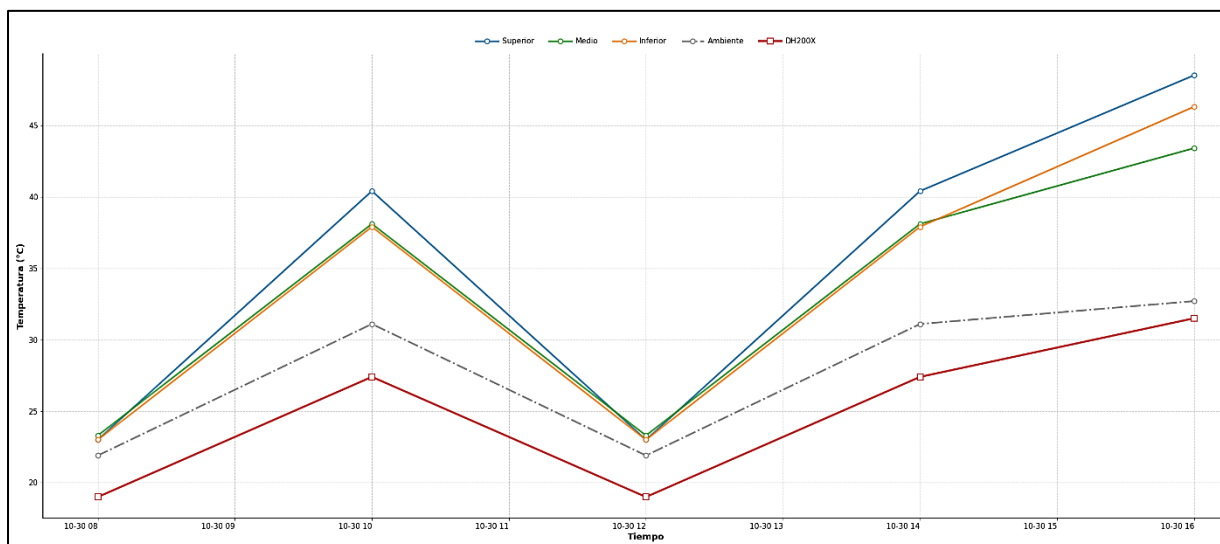


Figura 100. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 29 de octubre en Sandoná



En las horas de la tarde como se observa en la figura 101, se evidencia un descenso progresivo de la temperatura en todos los sensores, asociado a la disminución de la radiación solar y al aumento de la nubosidad. El sensor S1 continúa mostrando una respuesta más rápida frente a estos cambios, acercándose nuevamente a los valores del ambiente. El DH200X, por su parte, mantiene temperaturas relativamente estables, lo que reafirma su utilidad como indicador del estado térmico real del grano, independiente de las fluctuaciones externas de corta duración.

Figura 101. Comportamiento de la temperatura durante la jornada del 30 de octubre en el secado de café en Sandoná



5.1.5 Comportamiento por variación del clima

El clima influyó de manera directa en la dinámica de la humedad relativa y la temperatura del café durante el proceso de secado, condicionando tanto la velocidad de evaporación superficial como la estabilidad del contenido interno del grano. Las diferencias observadas entre municipios evidencian que la radiación solar, la nubosidad y la exposición ambiental son factores determinantes en el comportamiento del sistema de secado.

En Génova, donde predominó la exposición directa al sol durante gran parte del periodo de evaluación, se presentó una evaporación más rápida y sostenida, reflejada en descensos acelerados de la humedad relativa del café, especialmente en el estrato superior. De forma simultánea, la temperatura superficial del café mostró incrementos moderados durante las horas de mayor insolación, superando ligeramente la temperatura ambiente. No obstante, las mediciones realizadas con el DH200X evidenciaron un comportamiento más estable, indicando que el contenido interno del grano respondió de manera progresiva y controlada, favoreciendo un secado continuo y uniforme.

En Albán, el clima presentó una mayor variabilidad, con alternancia entre periodos de sol, cielo nublado y condiciones bajo sombra. Esta variabilidad se tradujo en oscilaciones tanto en la humedad como en la temperatura superficial del café. Durante los periodos de radiación solar se observaron disminuciones marcadas de la humedad y aumentos de la temperatura en el sensor superior, mientras que en condiciones nubladas o bajo techo la evaporación se redujo y la

humedad tendió a estabilizarse. A pesar de estas fluctuaciones externas, el DH200X registró cambios graduales, confirmando que el interior del grano mantiene una dinámica más lenta y menos sensible a las variaciones climáticas de corta duración.

Por su parte, en Sandoná, las mediciones se realizaron mayoritariamente bajo condiciones de llovizna, alta nubosidad y tomas bajo techo, lo que limitó la disponibilidad de radiación solar. En este contexto se observaron descensos más lentos de la humedad relativa y temperaturas más estables y cercanas a las ambientales, especialmente en las primeras horas del día. Sin embargo, durante los momentos puntuales de radiación solar, la temperatura superficial del café aumentó de manera notable y la humedad del café llegó a ser inferior a la humedad ambiente, evidenciando que, aun en ambientes húmedos, la radiación solar puede activar el proceso de secado superficial. En todos los casos, el DH200X mostró valores estables y dentro del rango óptimo, confirmando que las variaciones observadas en los sensores externos correspondieron principalmente a cambios superficiales y no a alteraciones significativas del contenido interno del grano.

Finalmente, los resultados confirman que la exposición controlada al sol acelera el secado del café, incrementando la temperatura superficial y favoreciendo la evaporación, mientras que la ausencia o limitación de radiación solar conduce a procesos de secado más lentos y estables. Asimismo, se evidencia que el contenido interno del grano, medido mediante el DH200X, presenta una respuesta más gradual frente a los cambios ambientales, lo que resalta la importancia de diferenciar entre el secado superficial y el secado real del grano. Finalmente, el movimiento del café mediante el rastrillo mecanizado contribuyó a mejorar la uniformidad del proceso, permitiendo una distribución más homogénea de la humedad y la temperatura, incluso bajo condiciones climáticas variables.

5.1.6 Relación entre la temperatura y la humedad en el proceso de secado

A partir del análisis de las tablas y gráficas obtenidas durante las mediciones en los municipios de Génova, Albán y Sandoná, se evidencia una relación inversa entre la temperatura y la humedad en el proceso de secado del café.

En términos generales, cuando la temperatura aumenta, la humedad del café tiende a disminuir, lo cual se asocia al proceso de evaporación del agua contenida en el grano. Por ejemplo, en las mediciones realizadas en Génova, se observa que al pasar de temperaturas

cercanas a 19.7 °C a valores superiores a 27 °C, la humedad del café desciende progresivamente de valores alrededor del 84.7 % a aproximadamente 80.5 % en una misma jornada. Este comportamiento se repite en diferentes días, evidenciando una tendencia consistente durante el proceso de secado.

Asimismo, en condiciones de mayor radiación solar, como se observó en Albán, el incremento de la temperatura favorece una disminución más rápida de la humedad, mientras que, en condiciones de alta humedad ambiental o presencia de lluvia, la reducción de la humedad es más lenta o incluso presenta incrementos temporales.

Adicionalmente, las mediciones muestran que esta relación no es completamente uniforme debido a factores como la humedad ambiente, la nubosidad y la distribución del café, lo que genera variaciones entre los sensores ubicados en diferentes niveles superior, medio e inferior. Sin embargo, la tendencia general se mantiene: el aumento de la temperatura favorece la pérdida de humedad del café.

En conclusión, los datos obtenidos confirman que existe una relación directa entre las condiciones térmicas y el proceso de secado, donde la temperatura actúa como un factor determinante en la reducción de la humedad, validando la importancia de su monitoreo para optimizar el proceso.

5.1.7 Comparación del comportamiento del secado de café en patio entre municipios

El análisis comparativo del proceso de secado del café en los municipios de Génova, Albán y Sandoná evidencia tanto similitudes estructurales en la dinámica del secado como diferencias significativas asociadas principalmente a las condiciones climáticas y al grado de exposición ambiental durante el proceso.

En los tres municipios se observa un comportamiento común caracterizado por una mayor variabilidad en los sensores superficiales, especialmente en el sensor superior S1, el cual responde de forma inmediata a los cambios de radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa. En todos los casos, la humedad superficial del café disminuye con mayor rapidez durante los periodos de mayor insolación, mientras que la temperatura registrada en S1 tiende a superar la temperatura ambiente en las horas de mayor radiación. De manera consistente, el DH200X presentó un comportamiento más estable y gradual, confirmando que el contenido

interno del grano mantiene una dinámica más lenta y menos sensible a las fluctuaciones ambientales de corta duración, independientemente del municipio evaluado.

No obstante, se identifican diferencias claras en la velocidad y estabilidad del secado entre los municipios. En Génova, la predominancia de sol directo y condiciones climáticas más estables favoreció un secado continuo, con descensos sostenidos de la humedad y aumentos moderados de la temperatura superficial. Esta estabilidad permitió una mayor coherencia entre la evolución de la humedad superficial y el contenido interno del grano, reflejando un proceso eficiente y controlado, con menor presencia de reabsorción de humedad.

En Albán presentó un comportamiento intermedio, condicionado por una alta variabilidad climática. La alternancia entre sol, nubosidad y sombra generó oscilaciones tanto en la humedad como en la temperatura superficial, evidenciando fases de secado activo seguidas de periodos de estabilización. Es posible que los sensores tengan variaciones de subir o bajar ya que los sensores no están midiendo directamente el grano interno del café, es decir solo una superficie donde está el café por esta razón cuando el clima varíe se puede ver afectado los sensores. A pesar de estas fluctuaciones externas, el contenido interno del grano, medido con el DH200X, mantuvo una tendencia progresiva, lo que indica que el sistema fue capaz de amortiguar los efectos de la variabilidad ambiental, aunque con una menor continuidad en la tasa de secado en comparación con Génova.

Por su parte, Sandoná se diferenció por presentar condiciones predominantemente húmedas y con limitada radiación solar, lo que resultó en un secado más pausado. En este municipio se observaron descensos más lentos de la humedad y temperaturas superficiales más cercanas a las ambientales durante gran parte del proceso. Sin embargo, durante los periodos puntuales de radiación solar, el sensor superior registró incrementos térmicos significativos y valores de humedad inferiores a los del ambiente, evidenciando que incluso bajo condiciones húmedas la radiación solar puede activar de forma efectiva el secado superficial. El DH200X confirmó que, a pesar de estas variaciones externas, el grano alcanzó y mantuvo valores de humedad interna dentro del rango óptimo.

En términos generales, la comparación entre municipios demuestra que la radiación solar es el factor dominante en la aceleración del secado, mientras que la nubosidad y la humedad ambiental actúan como elementos reguladores que ralentizan el proceso. Asimismo, se confirma que la diferencia entre humedad y temperatura superficial y el contenido interno del grano es un

aspecto clave para la interpretación correcta del secado, resaltando la importancia del uso complementario de sensores ambientales y del DH200X. Finalmente, el uso del rastrillo mecanizado contribuyó de manera transversal a mejorar la uniformidad del secado en los tres municipios, mitigando parcialmente los efectos de la variabilidad climática.

5.1.7.1 Influencia del rastrillo en el proceso de secado de café en patio

Es importante considerar la influencia del rastrillo mecanizado en el comportamiento registrado por los sensores durante el proceso de secado. El movimiento del café se realizó de manera sistemática cada 45 minutos, lo que permitió una redistribución periódica de las capas del grano dentro de la masa en secado. Este volteo frecuente favorece la exposición alternada de zonas más húmedas y más secas a la radiación solar y a las condiciones ambientales, reduciendo gradientes internos y promoviendo una mayor uniformidad higrotérmica.

Desde el punto de vista analítico, el hecho de que los registros de datos se realizaran cada 2 horas permitió evaluar el efecto acumulativo de varios ciclos de volteo entre cada medición. En ese intervalo podían ocurrir al menos dos o tres movimientos del rastrillo, lo que generaba una reconfiguración interna del café antes de cada lectura registrada. Esta dinámica explica la presencia de picos o variaciones puntuales en los valores de humedad y temperatura, especialmente en el sensor superior S1, el cual puede quedar temporalmente en contacto con granos que previamente se encontraban en capas internas con mayor contenido de humedad.

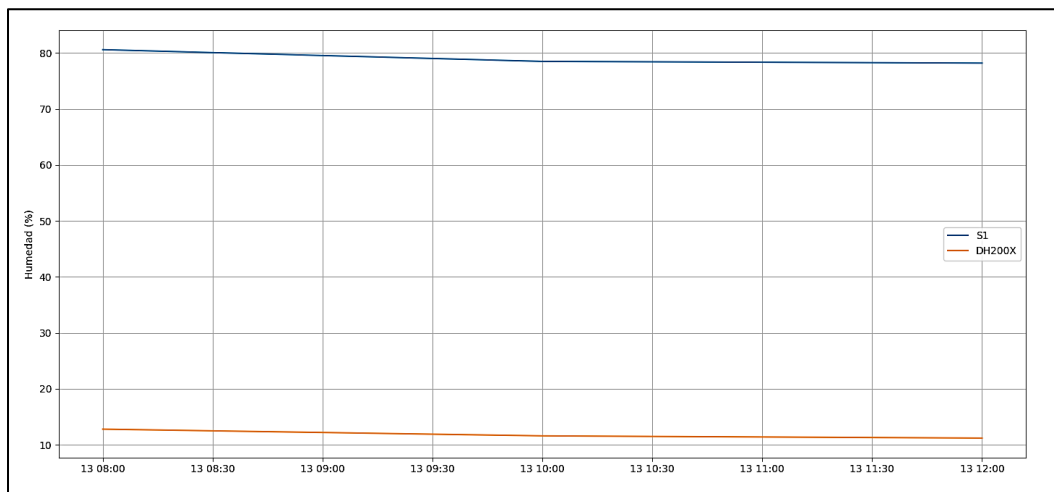
Por tanto, las fluctuaciones observadas en determinados horarios no deben interpretarse como anomalías o inestabilidades del proceso, sino como una consecuencia directa del mecanismo de mezclado. El rastrillo introduce una variabilidad controlada que, aunque genera cambios momentáneos en los registros, contribuye significativamente a la homogenización global del secado. De hecho, la reducción progresiva de los gradientes entre sensores (S1, S2 y S3) y la estabilización final del contenido interno medido con el DH200X evidencian que el movimiento periódico fue un factor determinante para alcanzar un secado más uniforme en los municipios evaluados.

Por ende, el rastrillo no solo cumple una función mecánica de volteo, sino que actúa como un elemento regulador del proceso, facilitando la transferencia de humedad desde el núcleo hacia la superficie y evitando acumulaciones localizadas que podrían generar secados desiguales o riesgos de deterioro del grano.

5.1.8 Relación entre superficie del grano de café y su núcleo interno

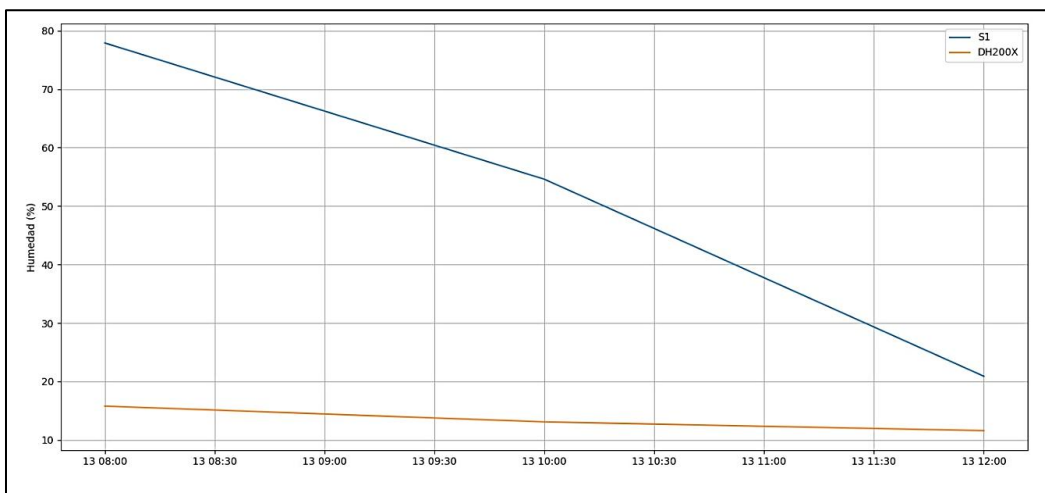
Las gráficas correspondientes a la fase final del secado en los tres municipios, figuras 102, 103 y 104, mostrando únicamente el sensor superficial S1 y el equipo DH200X, permiten evidenciar de forma clara la diferencia en la dinámica de secado entre la superficie del grano y su núcleo interno cuando el café se encuentra próximo a alcanzar su punto óptimo.

Figura 102. Relación entre humedad superficial y humedad interna en la etapa final del secado en Genova



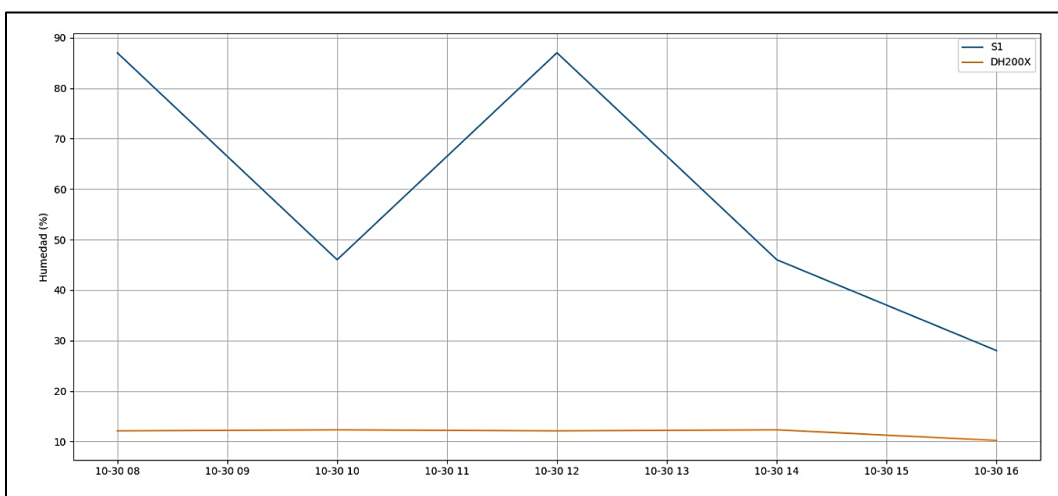
En términos generales, el sensor S1 presenta variaciones más marcadas a lo largo de la jornada, reflejando la influencia directa de la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y el movimiento del café mediante el rastrillo. Estas variaciones pueden manifestarse como descensos rápidos de humedad o incluso pequeños picos asociados a cambios ambientales momentáneos. Sin embargo, el DH200X mantiene un comportamiento más estable y progresivo, mostrando una reducción gradual hasta ubicarse dentro del rango óptimo de 10–12% de humedad interna.

Figura 103. Relación entre humedad superficial y humedad interna en la etapa final del secado en Alban



Esta diferencia confirma la existencia de una inercia higroscópica en el núcleo del grano. Mientras la superficie responde casi de inmediato a las condiciones externas, el contenido interno evoluciona de manera amortiguada, reduciendo lentamente el gradiente de humedad entre la capa externa y el centro del grano. En la etapa final del proceso, cuando el DH200X se estabiliza dentro del rango recomendado y presenta una tendencia prácticamente horizontal, se evidencia que el equilibrio interno ha sido alcanzado, aun cuando el sensor superficial continúe mostrando ligeras fluctuaciones.

Figura 104. Relación entre humedad superficial y humedad interna en la etapa final del secado en Sandona



Asimismo, las gráficas demuestran que la percepción visual o la medición superficial por sí sola no es suficiente para determinar el estado real del secado. El café puede presentar valores bajos en S1 mientras el núcleo aún conserva humedad, o puede mostrar pequeñas oscilaciones

superficiales incluso cuando internamente ya se encuentra dentro del rango adecuado. Por ello, la integración de ambas mediciones permite interpretar correctamente el comportamiento del grano y evitar decisiones prematuras o tardías en la finalización del secado.

El análisis comparativo de S1 y DH200X en la fase final del proceso confirma que el indicador determinante para establecer el punto óptimo de secado es la estabilidad del contenido interno del grano. Cuando el DH200X se mantiene entre 10% y 12% y no presenta descensos significativos adicionales, se puede afirmar técnicamente que el café ha alcanzado su condición adecuada para almacenamiento y comercialización, independientemente de las variaciones superficiales momentáneas.

5.1.8.1 Criterios integrados para la evaluación del secado y determinación del punto óptimo del café

El análisis conjunto de los riesgos de secado superficial, la calidad del grano y los criterios de finalización del proceso permitió establecer una relación práctica entre las mediciones internas del café y los sensores superficiales. En este sentido, el contenido de humedad interna medido con el DH200X se consolidó como el indicador principal para definir un secado adecuado, situándose en el rango óptimo entre el 10 y el 12%. De forma complementaria, se observó que cuando el sensor superior S1 alcanzó valores de humedad superficial cercanos y relativamente estables, sin descensos abruptos asociados a radiación extrema, el núcleo del grano tendió a encontrarse dentro de este rango óptimo. No obstante, estos valores superficiales de los sensores BME280 estuvieron condicionados por la variación climática, pero se puede referenciar un rango donde haya más estabilidad y baja humedad.

5.2 Herramienta de modelamiento matemático para la estimación del contenido de humedad.

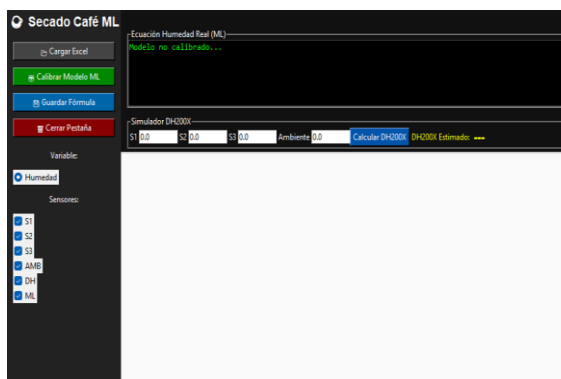
Una vez realizado el análisis exploratorio y la visualización de los datos obtenidos durante el proceso de secado del café, se desarrolló una herramienta computacional orientada al modelamiento matemático del contenido de humedad del grano a partir de las variables registradas por el sistema IoT.

El propósito de esta herramienta es establecer una relación matemática entre las variables medidas por los sensores tanto ambientales como internas del proceso de secado, incluyendo la humedad relativa registrada en diferentes puntos del sistema y el contenido de humedad del café

medido mediante instrumentos de referencia. De esta forma, se busca construir un modelo capaz de estimar el estado de secado del café a partir de dichas mediciones, lo cual constituye un paso importante hacia la automatización y el monitoreo inteligente del proceso.

Para el desarrollo de este modelo se emplearon técnicas de regresión polinómica multivariable, implementadas en el lenguaje de programación Python mediante librerías especializadas en análisis de datos y aprendizaje automático. Estas técnicas permiten modelar relaciones no lineales entre las variables de entrada y la humedad estimada del grano, utilizando como referencia las mediciones obtenidas con el medidor de humedad del café DH200X, el cual actúa como variable objetivo durante el proceso de calibración del modelo.

Figura 105. Herramienta para modelo matemático



5.2.1 Preprocesamiento de datos para el modelamiento

Antes de realizar el modelamiento matemático, fue necesario preparar y estructurar los datos experimentales obtenidos durante las campañas de medición realizadas en los municipios de Génova, Albán y Sandoná. Esta etapa es conocida como preprocesamiento de datos y constituye un paso fundamental en cualquier proceso de análisis de datos y aprendizaje automático, ya que la calidad del modelo depende directamente de la organización y consistencia de la información utilizada para su entrenamiento.

Durante el trabajo de campo, los datos fueron almacenados en archivos de Excel que contienen registros correspondientes a las variables medidas por los sensores del sistema IoT y por el instrumento de referencia utilizado para evaluar el contenido de humedad del café. Cada registro incluye principalmente:

Humedad relativa medida por los sensores del sistema IoT ubicados en diferentes niveles de la masa de café S1, S2 y S3.

Humedad relativa del ambiente durante el proceso de secado.

Contenido de humedad del café medido mediante el instrumento de referencia DH200X.

Tabla 7. Datos para modelamiento matemático humedad

Fecha Hora	Humedad S1 S	Humedad S2 M	Humedad S3 I	Humedad Ambiente	Humedad DH200X S
7/09/2025 12:00	100	98	100	70	33,6
7/09/2025 14:00	100	97	99	62	32,1
7/09/2025 16:00	100	97	98	63	28,3
7/09/2025 18:00	100	96,5	98	64	27,1

Tabla 8. Datos para modelamiento matemático temperatura

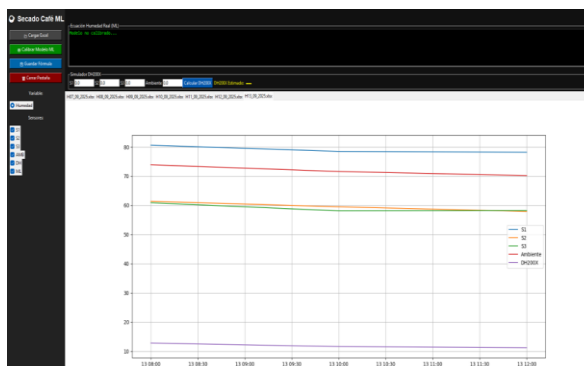
Fecha Hora	Temp S1 S	Temp S2 M	Temp S3 I	Temp Ambiente	Temp DH200X S
7/08/2025 12:00	23,3	24,1	23,8	23,1	23,7
7/08/2025 14:00	26,3	26,7	25,4	24,7	26,3
7/08/2025 16:00	26,9	27,9	25,4	24,1	24,7
7/08/2025 18:00	28,9	30,2	27,9	23,6	24,8

Estas variables permiten caracterizar tanto las condiciones ambientales como el comportamiento del grano durante el proceso de secado.

Debido a que las mediciones fueron realizadas en distintos días, municipios y condiciones climáticas, cada archivo de datos puede contener un número diferente de observaciones. Además, las campañas de medición corresponden a diferentes etapas del proceso de secado, desde estados iniciales con alto contenido de humedad hasta fases más avanzadas donde el grano presenta valores considerablemente menores.

Por esta razón, fue necesario implementar un procedimiento que permitiera integrar y estandarizar la información proveniente de múltiples archivos, con el fin de construir un único conjunto de datos representativo del proceso de secado. Esta consolidación permite aumentar el número de observaciones disponibles para el modelamiento y capturar una mayor diversidad de condiciones de secado, lo que mejora la capacidad del modelo para describir el fenómeno analizado.[24]

Figura 106. Visualización de datos modelamiento



Para el manejo de la información se utilizó la librería panda del lenguaje de programación Python[25], la cual permite organizar los datos en estructuras tipo tabla conocidas como DataFrame. Estas estructuras facilitan diversas operaciones necesarias para el análisis de datos, tales como:

La selección de las variables relevantes para el modelo.

La eliminación de registros incompletos o inconsistentes.

La concatenación de datos provenientes de diferentes archivos.

La reorganización de las variables para su procesamiento matemático.

Desde el punto de vista del modelamiento matemático, los datos organizados pueden representarse como una matriz de variables de entrada.

$$X = \begin{bmatrix} H_{S1} & H_{S2} & H_{S3} & H_{AMB} & G \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H^n_{S1} & H^n_{S2} & H^n_{S3} & h^n_{AMB} & G^n \end{bmatrix}$$

donde:

H_{S1} , H_{S2} y H_{S3} representan la humedad relativa medida por los sensores ubicados en diferentes niveles de la masa de café.

H_{amb} representa la humedad relativa del ambiente durante el proceso de secado.

G representa el gradiente de humedad dentro de la masa de café, definido como

$$G = H_{S3} - H_{S1}$$

El gradiente de humedad permite capturar diferencias internas en la distribución de humedad dentro del café durante el secado.

La variable objetivo del modelo corresponde al contenido de humedad del café medido mediante el instrumento de referencia DH200X, el cual puede representarse como:

$$Y = \begin{bmatrix} DH_1 \\ DH_2 \\ DH_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ DH_n \end{bmatrix}$$

Desde el punto de vista matemático, el objetivo del modelo consiste en encontrar una función $f(X)$ que permita aproximar la relación entre las variables medidas por los sensores y el contenido de humedad del café, de manera que

$$Y \approx f(x)$$

5.2.2 Regresión polinómica multivariable para la estimación del contenido de humedad

El proceso de secado del café está influenciado por diversos factores ambientales y por las condiciones internas de la masa de grano durante el secado. Variables como la humedad relativa del aire y la humedad presente en diferentes niveles de la masa de café influyen directamente en la velocidad con la que el agua contenida en el grano se evapora hacia el ambiente. Debido a la naturaleza física de este fenómeno, la relación entre estas variables y el contenido de humedad del café no es estrictamente lineal.

En procesos de transferencia de calor y masa, como el secado de productos agrícolas, es común que las variables presenten comportamientos no lineales a medida que el proceso evoluciona. Durante las etapas iniciales del secado el café presenta un alto contenido de agua, por lo que la evaporación ocurre con mayor intensidad. A medida que el proceso avanza, la cantidad de agua disponible disminuye y la velocidad de secado se reduce progresivamente. Este comportamiento genera relaciones con curvaturas y cambios de pendiente que no pueden describirse adecuadamente mediante un modelo lineal simple:

Figura 107. Gráfica total de muestras realizadas



Por esta razón, en este estudio se empleó un modelo de regresión polinómica multivariable de segundo grado, el cual permite capturar relaciones no lineales entre las variables sin incrementar excesivamente la complejidad del modelo.[26]

$$X = [S_1, S_2, S_3, H_{AMB}, G]$$

donde:

S_1 corresponde a la humedad relativa medida por el sensor ubicado en la parte superior de la masa de café.

S_2 corresponde a la humedad medida en la zona media.

S_3 corresponde a la humedad medida en la parte inferior.

H_{amb} corresponde a la humedad relativa del ambiente.

G corresponde al gradiente de humedad

La variable dependiente del modelo corresponde al contenido de humedad del café medido mediante el instrumento de referencia.

$$Y = DH$$

donde DH representa la humedad del grano medida con el sensor DH200X.

En un modelo de regresión polinómica de segundo grado, la variable dependiente puede expresarse como una combinación de términos lineales,[27] términos cuadráticos y términos de interacción entre las variables independientes. De forma general, el modelo puede escribirse como.

$$DH = \beta_0 + \sum_{i=1}^5 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^5 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 \beta_{ij} X_i X_j$$

donde:

β_0 es el término independiente del modelo

β_i representan los coeficientes lineales

β_{ii} representan los coeficientes cuadráticos

β_{ij} representan los coeficientes de interacción entre variables

Sustituyendo las variables del sistema de sensores, la expresión del modelo puede representarse como.[28]

$$DH = \beta_0 + \beta_1 S1 + \beta_2 S2 + \beta_3 S3 + \beta_4 H_{amb} + \beta_5 G + \beta_6 S1^2 + \beta_7 S2^2 + \beta_8 S3^2 + \beta_9 H_{amb}^2 \\ + \beta_{10} G^2 + \beta_{11} S1S2 + \beta_{12} S1S3 + \beta_{13} S1H_{amb} + \beta_{14} S1G + \beta_{15} S2S3 \\ + \beta_{16} S2H_{amb} + \beta_{17} S2G + \beta_{18} S3H_{amb} + \beta_{19} S3G + \beta_{20} H_{amb}G$$

Para evaluar la precisión del modelo, se emplea el error cuadrático medio (RMSE), definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (DH_i - \widehat{DH}_i)^2}$$

donde:

DH_i corresponde al valor real medido por el sensor de referencia.

\widehat{DH}_i corresponde al valor estimado por el modelo.

n representa el número total de observaciones utilizadas en el entrenamiento.

Este indicador permite cuantificar la diferencia promedio entre los valores reales y los valores estimados, proporcionando una medida de la capacidad del modelo para representar el comportamiento del proceso de secado del café.

5.2.3 Construcción de la regresión polinómica a partir de los datos experimentales

Una vez definida la formulación matemática del modelo de regresión polinómica, es necesario explicar cómo se construye dicho modelo a partir de los datos experimentales obtenidos durante las campañas de medición. El proceso consiste en transformar las variables medidas por los sensores, generar nuevas variables polinómicas y ajustar los coeficientes del modelo mediante técnicas de regresión.

Durante el trabajo de campo se registraron mediciones correspondientes a la humedad relativa en diferentes niveles de la masa de café, la humedad relativa del ambiente y el contenido de humedad del grano medido con el instrumento de referencia DH200X. A partir de estas variables también se calcula el gradiente de humedad dentro de la masa de café.

La estructura básica de los datos utilizados para el modelamiento puede representarse mediante una tabla de observaciones como la mostrada en la Tabla X.

En este caso para demostrar la regresión que se plantea aplicar en el sistema se utilizara 1 de las 5 variables que se usaran para el entrenamiento ML del sistema (S2).[29]

Tabla 9. Datos de Génova para realizar regresión.

Observación	S1	S2	S3	H_amb	G	DH
1	100	98	100	70	0	33,6
2	100	97	99	62	-1	32,1
3	100	97	98	63	-2	28,3
4	100	96,5	98	64	-2	27,1

Gradiente de humedad (G).

$$G_n = H_{S3} - H_{S1}$$

$$G_1 = 100 - 100$$

$$G_1 = 0$$

$$G_2 = 99 - 100$$

$$G_2 = -1$$

$$G_3 = 98 - 100$$

$$G_3 = -2$$

$$G_4 = 98 - 100$$

$$G_4 = -2$$

Ilustración del modelamiento matemático considerando inicialmente solo 2 variables; la humedad en el sensor medio S_2 y la humedad del ambiente H_{amb}

Modelo lineal

$$DH = \beta_0 + \beta_1 S_2 + \beta_2 H_{amb}$$

$$33,6 = \beta_0 + \beta_1 98 + \beta_2 70$$

$$32,1 = \beta_0 + \beta_1 97 + \beta_2 62$$

$$28,3 = \beta_0 + \beta_1 97 + \beta_2 63$$

$$27,1 = \beta_0 + \beta_1 96,5 + \beta_2 64$$

Este sistema posee cuatro ecuaciones y tres incógnitas, por lo que no puede resolverse exactamente. En su lugar se emplea el método de mínimos cuadrados, y de esta manera encontrar los coeficientes que minimicen el error entre los valores observados y los valores estimados por el modelo.

La fórmula Matricial se puede describir como.

$$Y = X\beta$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 98 & 70 \\ 1 & 97 & 62 \\ 1 & 97 & 63 \\ 1 & 96,5 & 64 \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 33,6 \\ 32,1 \\ 28,3 \\ 27,1 \end{bmatrix}$$

El vector de coeficientes que minimiza el error cuadrático se obtiene mediante la expresión

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

donde:

X^T es la matriz transpuesta de X .

$(X^T X)^{-1}$ es la inversa del producto matricial.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 98 & 70 \\ 1 & 97 & 62 \\ 1 & 97 & 63 \\ 1 & 96,5 & 64 \end{bmatrix}$$

$$X^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 98 & 97 & 97 & 96,5 \\ 70 & 62 & 63 & 64 \end{bmatrix}$$

$$X^T X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 98 & 97 & 97 & 96,5 \\ 70 & 62 & 63 & 64 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 98 & 70 \\ 1 & 97 & 62 \\ 1 & 97 & 63 \\ 1 & 96,5 & 64 \end{bmatrix}$$

$$1x1 + 1x1 + 1x1 + 1x1 = 4$$

$$1x98 + 1x97 + 1x97 + 1x96,5 = 388,5$$

$$1x70 + 1x62 + 1x63 + 1x64 = 259$$

$$98 \cdot 1 + 97 \cdot 1 + 97 \cdot 1 + 96,5 \cdot 1 = 388,5$$

$$98 \cdot 98 + 97 \cdot 97 + 97 \cdot 97 + 96,5 \cdot 96,5 = 37734,25$$

$$98 \cdot 70 + 97 \cdot 62 + 97 \cdot 63 + 96,5 \cdot 64 = 25161$$

$$70 \cdot 1 + 62 \cdot 1 + 63 \cdot 1 + 64 \cdot 1 = 259$$

$$70 \cdot 98 + 62 \cdot 97 + 63 \cdot 97 + 64 \cdot 96,5 = 25161$$

$$70 \cdot 70 + 62 \cdot 62 + 63 \cdot 63 + 64 \cdot 64 = 16809$$

$$X^T X = \begin{bmatrix} 4 & 388,5 & 259 \\ 388,5 & 37734,25 & 25161 \\ 259 & 25161 & 16809 \end{bmatrix}$$

$$(X^T X)^{-1} = \frac{1}{|(X^T X)|} \cdot Adj((X^T X))$$

$$(X^T X) = A$$

$$(A)^{-1} = \frac{1}{|A|} \cdot Adj(A)$$

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 388,5 & 259 \\ 388,5 & 37734,25 & 25161 \\ 259 & 25161 & 16809 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

$$|A| = a(ei - fh) - b(di - fg) + c(dh - eg)$$

$$\begin{array}{lll}
 a = 4 & b = 388.5 & c = 259 \\
 d = 388.5 & e = 37734.25 & f = 25161 \\
 g = 259 & h = 25161 & i = 16809
 \end{array}$$

$$+a(ei - fh) = +4(37734.25 \cdot 16809 - 25161 \cdot 25161)$$

$$-b(di - fg) = -388.5(388.5 \cdot 16809 - 25161 \cdot 259)$$

$$+c(dh - eg) = +259(388.5 \cdot 25161 - 37734.25 \cdot 259)$$

$$|A| = 4796349 - 5282628,75 + 486337,25$$

$$|A| = 57.5$$

$$(A)^{-1} = \frac{1}{57.5} \cdot Adj(A)$$

$$Adj(A)$$

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 388.5 & 259 \\ 388.5 & 37734.25 & 25161 \\ 259 & 25161 & 16809 \end{bmatrix}$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} 37734.25 & 25161 \\ 25161 & 16809 \end{bmatrix} = 1199087.25$$

$$C_{12} = - \begin{bmatrix} 388.5 & 25161 \\ 259 & 16809 \end{bmatrix} = -13597.5$$

$$C_{13} = \begin{bmatrix} 388.5 & 37734.25 \\ 259 & 25161 \end{bmatrix} = 1877.75$$

$$C_{21} = - \begin{bmatrix} 388.5 & 259 \\ 25161 & 16809 \end{bmatrix} = -13597.5$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 4 & 259 \\ 259 & 16809 \end{bmatrix} = 155$$

$$C_{23} = - \begin{bmatrix} 4 & 388.5 \\ 259 & 25161 \end{bmatrix} = -22.5$$

$$C_{31} = \begin{bmatrix} 388.5 & 259 \\ 37734.25 & 25161 \end{bmatrix} = 1877.75$$

$$C_{32} = - \begin{bmatrix} 4 & 259 \\ 388.5 & 25161 \end{bmatrix} = -22.5$$

$$C_{33} = \begin{bmatrix} 4 & 388.5 \\ 388.5 & 37734.25 \end{bmatrix} = 4.75$$

$$Adj(A) = \begin{bmatrix} 1199087.25 & -13597.5 & 1877.75 \\ -13597.5 & 155 & -22.5 \\ 1877.75 & -22.5 & 4.75 \end{bmatrix}$$

$$(A)^{-1} = \frac{1}{57.5} \cdot Adj \left(\begin{bmatrix} 1199087.25 & -13597.5 & 1877.75 \\ -13597.5 & 155 & -22.5 \\ 1877.75 & -22.5 & 4.75 \end{bmatrix} \right)$$

$$(A)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1199087.25}{57.5} & -\frac{13597.5}{57.5} & \frac{1877.75}{57.5} \\ -\frac{13597.5}{57.5} & \frac{155}{57.5} & -\frac{22.5}{57.5} \\ \frac{1877.75}{57.5} & -\frac{22.5}{57.5} & \frac{4.75}{57.5} \end{bmatrix}$$

$$(A)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{4796349}{230} & -\frac{5439}{23} & \frac{7511}{230} \\ -\frac{5439}{23} & \frac{62}{23} & -\frac{9}{23} \\ \frac{7511}{230} & \frac{9}{23} & \frac{19}{230} \end{bmatrix}$$

$$(A)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{4796349}{230} & -\frac{5439}{23} & \frac{7511}{230} \\ -\frac{5439}{23} & \frac{62}{23} & -\frac{9}{23} \\ \frac{7511}{230} & \frac{9}{23} & \frac{19}{230} \end{bmatrix}$$

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{4796349}{230} & -\frac{5439}{23} & \frac{7511}{230} \\ -\frac{5439}{23} & \frac{62}{23} & -\frac{9}{23} \\ \frac{7511}{230} & \frac{9}{23} & \frac{19}{230} \end{bmatrix}$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \frac{4796349}{230} & -\frac{5439}{23} & \frac{7511}{230} \\ \frac{5439}{23} & \frac{62}{23} & -\frac{9}{23} \\ \frac{7511}{230} & -\frac{9}{23} & \frac{19}{230} \end{bmatrix} \cdot X^T Y$$

$$X^T Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 98 & 97 & 97 & 96,5 \\ 70 & 62 & 63 & 64 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 33,6 \\ 32,1 \\ 28,3 \\ 27,1 \end{bmatrix}$$

$$1(33.6) + 1(32.1) + 1(28.3) + 1(27.1) = 121.1$$

$$98(33.6) + 97(32.1) + 97(28.3) + 96.5(27.1) = 11766.75$$

$$70(33.6) + 62(32.1) + 63(28.3) + 64(27.1) = 7859.5$$

$$X^T Y = \begin{bmatrix} 121.1 \\ 11766.75 \\ 7859.5 \end{bmatrix}$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} \cdot X^T Y$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \frac{4796349}{230} & -\frac{5439}{23} & \frac{7511}{230} \\ \frac{5439}{23} & \frac{62}{23} & -\frac{9}{23} \\ \frac{7511}{230} & -\frac{9}{23} & \frac{19}{230} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 121.1 \\ 11766.75 \\ 7859.5 \end{bmatrix}$$

$$\beta_0 = \frac{4796349}{230}(121.1) - \frac{5439}{23}(11766.75) + \frac{7511}{230}(7859.5) = -534.6265217391303$$

$$\beta_1 = -\frac{5439}{23}(121.1) + \frac{62}{23}(11766.75) - \frac{9}{23}(7859.5) = 6.09130435$$

$$\beta_2 = \frac{7511}{230}(121.1) - \frac{9}{23}(11766.75) + \frac{19}{230}(7859.5) = -0.4126087$$

$$DH \approx -534.6265217391303 + 6.09130435S_2 - 0.4126087H_{amb}$$

$$33,6 \approx \beta_0 + \beta_1 98 + \beta_2 70$$

$$DH \approx -534.6265217391303 + 6.09130435(98) - 0.4126087(70) = 33.438$$

$$32,1 \approx \beta_0 + \beta_1 97 + \beta_2 62$$

$$DH \approx -534.6265217391303 + 6.09130435(97) - 0.4126087(62) = 30.648$$

$$28,3 \approx \beta_0 + \beta_1 97 + \beta_2 63$$

$$DH \approx -534.6265217391303 + 6.09130435(97) - 0.4126087(63) = 30.235$$

$$27,1 \approx \beta_0 + \beta_1 96,5 + \beta_2 64$$

$$DH \approx -534.6265217391303 + 6.09130435(96.5) - 0.4126087(64) = 26.777$$

5.2.4 Implementación computacional del modelo

Aunque en la sección anterior se presentó un ejemplo del procedimiento matemático para estimar los coeficientes de la regresión utilizando un conjunto reducido de datos, en el sistema real este proceso se realiza de forma automática mediante herramientas de análisis de datos implementadas en Python.[30]

Para ello se desarrolló una aplicación de software que permite cargar los datos experimentales obtenidos durante las campañas de medición y realizar el entrenamiento del modelo de regresión polinómica de manera automática. El programa fue desarrollado utilizando el lenguaje de programación Python y diversas librerías especializadas en análisis de datos y aprendizaje automático.

Para la organización y manipulación de los datos se utilizó la librería Pandas, mientras que las operaciones numéricas se realizaron mediante NumPy. La construcción del modelo de regresión se llevó a cabo utilizando la librería Scikit-Learn, la cual permite generar automáticamente los términos polinómicos mediante la herramienta PolynomialFeatures y ajustar los coeficientes del modelo utilizando el algoritmo de regresión lineal implementado en la clase

5.3 Análisis comparativo del modelo en Génova, Albán y Sandoná

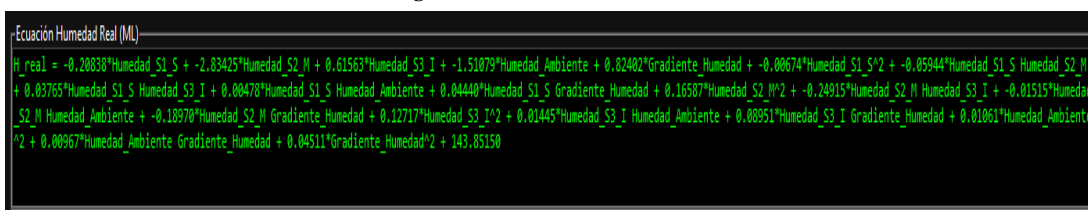
Con el fin de evaluar el comportamiento del modelo de regresión polinómica bajo diferentes condiciones de secado, se realiza un análisis comparativo utilizando los datos experimentales obtenidos en los municipios de Génova, Albán y Sandoná. Cada conjunto de datos representa condiciones climáticas y operativas distintas, lo que permite analizar la respuesta del modelo en diferentes escenarios.

A partir de las ecuaciones obtenidas en cada caso, se analiza la influencia de las variables del sistema, identificando cuáles tienen mayor aporte en la estimación de la humedad del

A partir de las ecuaciones obtenidas para Génova, Albán y Sandoná, es posible identificar diferencias importantes en la influencia de las variables del sistema, lo cual refleja cómo cambian las dinámicas del proceso de secado del café dependiendo de las condiciones ambientales y operativas de cada zona.

En el caso de Génova, se observa un modelo altamente no lineal, caracterizado por una gran cantidad de términos de interacción y la presencia de términos cuadráticos. Destaca especialmente la fuerte influencia de la humedad medida en el sensor S2, junto con la humedad ambiente y el gradiente de humedad, cuyos coeficientes presentan magnitudes elevadas. Esto indica que el proceso de secado en esta zona depende tanto de las condiciones internas de la masa de café como de su interacción con el entorno, generando un comportamiento complejo donde las variaciones internas de humedad juegan un papel determinante.

Figura 109. Modelamiento en Génova



```

Ecuación Humedad Real (ML)
H_real = -0.20838*Humedad_S1_S + -2.83425*Humedad_S2_N + 0.61563*Humedad_S3_I + -1.51079*Humedad_Ambiente + 0.82402*Gradiente_Humedad + -0.00674*Humedad_S1_S^2 + -0.05944*Humedad_S1_S*Humedad_S2_N + 0.03765*Humedad_S1_S*Humedad_S3_I + 0.00478*Humedad_S1_S*Humedad_Ambiente + 0.04440*Humedad_S1_S*Gradiente_Humedad + 0.16587*Humedad_S2_N^2 + -0.24915*Humedad_S2_N*Humedad_S3_I + -0.01515*Humedad_S2_N*Humedad_Ambiente + -0.18970*Humedad_S2_N*Gradiente_Humedad + 0.12717*Humedad_S3_I^2 + 0.01445*Humedad_S3_I*Humedad_Ambiente + 0.00951*Humedad_S3_I*Gradiente_Humedad + 0.01061*Humedad_Ambiente^2 + 0.00967*Humedad_Ambiente*Gradiente_Humedad + 0.04511*Gradiente_Humedad^2 + 143.85150
  
```

Para Albán, el modelo también incluye interacciones y términos no lineales, pero con coeficientes de menor magnitud en comparación con Génova. En este caso, la humedad ambiente presenta uno de los mayores pesos dentro de la ecuación, mientras que las variables internas, como los sensores de humedad, tienen una influencia más moderada. Esto sugiere un comportamiento más estable del sistema, donde el proceso de secado es más uniforme y con

menor intensidad en los gradientes internos, aunque sin dejar de existir efectos de interacción entre variables.

Figura 110. Modelamiento en Alban

```

Ecuación Humedad Real (ML)
H_real = 0.23599*Humedad_S1_S + 0.57878*Humedad_S2_M + 0.45671*Humedad_S3_I + -1.82096*Humedad_Ambiente + 0.22072*Gradiante_Humedad + -0.01267*Humedad_S1_S^2 + 0.01986*Humedad_S1_S_Humedad_S2_M + -0.00606*Humedad_S1_S_Humedad_S3_I + 0.00710*Humedad_S1_S_Humedad_Ambiente + 0.00662*Humedad_S1_S_Gradiante_Humedad + 0.00201*Humedad_S2_M^2 + 0.01635*Humedad_S2_M_Humedad_S3_I + -0.04263*Humedad_S2_M_Humedad_Ambiente + -0.00351*Humedad_S2_M_Gradiante_Humedad + -0.00785*Humedad_S3_I^2 + 0.00221*Humedad_S3_I_Humedad_Ambiente + -0.00180*Humedad_S3_I_Gradiante_Humedad + 0.02470*Humedad_Ambiente^2 + -0.00490*Humedad_Ambiente_Gradiante_Humedad + -0.00841*Gradiante_Humedad^2 + 47.34993
  
```

En Sandoná, el modelo presenta nuevamente una estructura no lineal con múltiples interacciones, pero con una característica distintiva: la humedad ambiente tiene el coeficiente más alto de los tres casos, lo que indica que las condiciones externas dominan el proceso de secado. Además, el sensor S2 también mantiene una influencia considerable, aunque menor que en Génova. La presencia de coeficientes negativos en algunas interacciones sugiere efectos de compensación entre variables, lo que indica que ciertas combinaciones reducen su impacto sobre la humedad final. En conjunto, esto refleja un sistema donde el secado está fuertemente controlado por el entorno, pero con una participación interna aún relevante, generando un comportamiento intermedio entre Génova y Albán.

5.4 Análisis de costo beneficio del sistema de rastrillo IoT para el proceso de secado de café en patio

Se evaluó la viabilidad económica del sistema propuesto, se realizó un análisis de costo beneficio considerando dos aspectos principales, el impacto del rastrillo automatizado en la de mano de obra durante el proceso de secado del café en patio y el beneficio del sistema IoT en la estimación del contenido de humedad del grano mediante el modelo matemático desarrollado.

Este análisis permite comparar el costo de implementación del sistema con los beneficios operativos y tecnológicos que ofrece al productor, tanto en términos de ahorro económico como de optimización del proceso de secado.

5.4.1 Relación costo beneficio del prototipo rastrillo

El rastrillo desarrollado integra un sistema mecánico y electrónico que permite realizar el movimiento periódico del café de forma automática, reduciendo la necesidad de intervención constante del operario durante el proceso de secado.

En el método tradicional de secado en patio, el caficultor o un trabajador debe realizar el volteo del café manualmente cada cierto tiempo para garantizar una exposición uniforme al sol y evitar acumulaciones de humedad. Este trabajo implica una supervisión continua durante la jornada de secado.

En el contexto local, el costo promedio de la mano de obra agrícola se estima aproximadamente en 60.000 pesos colombianos por día. Durante el proceso de secado, el operario debe dedicar varias horas a la supervisión y movimiento del café, lo que representa un costo operativo recurrente para el productor.

El sistema de rastrillo automatizado permite reducir significativamente esta necesidad de intervención, ya que el movimiento del café se realiza automáticamente en intervalos programados. Además, el sistema de monitoreo permite registrar variables ambientales y del proceso, almacenando la información para su posterior análisis sin necesidad de presencia permanente en el lugar de secado.

Considerando una vida útil aproximada del sistema de 5 años, y asumiendo que el equipo se utilice en 10 ciclos de secado por año, es posible estimar el ahorro en costos de mano de obra

asociado al uso del rastrillo automatizado. En un escenario tradicional, si se requiere un trabajador durante cada jornada de secado, el costo anual aproximado sería:

$$60.000 \text{ COP} \times 10 \text{ días de secado} = 600.000 \text{ COP por año}$$

En un periodo de dos años, el costo acumulado de la mano de obra destinada únicamente al movimiento del café sería aproximadamente:

$$1.200.000 \text{ COP}$$

Por lo tanto, el uso del rastrillo automatizado permitiría reducir significativamente este costo operativo, ya que el sistema realiza el volteo del café de forma automática y solo requiere supervisión ocasional. Cabe aclarar que se toma en cuenta solo el costo de los días de secado que son 10 en un año, si en un año hay más lote de café para secar se puede notar más significativamente el ahorro en mano de obra.

A continuación, se presenta una estimación aproximada del costo de implementación del sistema de rastrillo automatizado.

Tabla 10. Costo Equipo de rastrillo

Costo Dispositivo rastrillo			
Componente	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Estructura metálica + mano de obra	1	\$ 450.000	\$ 450.000
Transmisión mecánica	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Microcontrolador (ESP32)	1	\$ 39.000	\$ 39.000
Motor DC	1	\$ 25.000	\$ 25.000
Motor paso a paso	1	\$ 15.000	\$ 15.000
Controlador puente h 1298n	1	\$ 25.000	\$ 25.000
Sensores fin de carrera	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Fuente de alimentación	1	\$ 20.000	\$ 20.000
Tarjeta electrónica	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Cableado y conectores	1	\$ 15.000	\$ 15.000
Caja protectora impresiones 3D	1	\$ 80.000	\$ 80.000
Total			\$ 878.000

Comparando este valor con el costo acumulado de mano de obra destinado al movimiento del café, se observa que el sistema podría recuperar su inversión aproximadamente en un periodo cercano a dos años de uso, dependiendo de la frecuencia de secado y las condiciones de operación.

Durante el resto de su vida útil estimada de 5 años, el sistema continuaría generando beneficios económicos al reducir los costos asociados a la supervisión constante del proceso.

Además del ahorro económico directo, el sistema aporta beneficios adicionales como:

mayor uniformidad en el secado del café.

reducción del esfuerzo físico del operario.

automatización del proceso de volteo del grano.

registro histórico de datos del proceso.

Análisis detallado del proceso de secado de café

Estos factores contribuyen a mejorar la eficiencia general del secado en patio y a optimizar la gestión del proceso por parte del productor.

5.4.2 Relación costo beneficio del sistema IoT para estimación de humedad del café

Otro aspecto relevante del sistema desarrollado es la implementación del dispositivo IoT equipado con sensores ambientales como vimos anteriormente, permiten registrar variables de humedad y temperatura dentro de la masa de café durante el proceso de secado.

A partir de estos datos, se desarrolló un modelo matemático utilizando herramientas de programación en Python, mediante el cual es posible estimar el contenido de humedad interna del grano. Este modelo permite aproximar los valores obtenidos con equipos comerciales de medición de humedad de café.

En los procesos tradicionales de control del secado, los productores utilizan medidores comerciales de humedad del grano, como el DH200X, los cuales permiten obtener mediciones directas del contenido de humedad del café. Sin embargo, este tipo de equipos puede representar un costo considerable para pequeños productores.

El sistema IoT propuesto ofrece una alternativa de bajo costo basada en sensores ambientales como el BME280, los cuales permiten monitorear continuamente las condiciones del café durante el secado. Mediante el modelo matemático desarrollado, estos datos pueden utilizarse para estimar la humedad interna del grano con una aproximación adecuada, reduciendo la necesidad de mediciones frecuentes con equipos comerciales.

Adicionalmente, para el análisis de costo-beneficio se consideró el costo de fabricación del prototipo, incluyendo la mano de obra. Aunque el desarrollo inicial no implicó un costo

directo, se estimó que la construcción del sistema, una vez definido, puede realizarse en aproximadamente 40 horas de trabajo.

Para el cálculo de la mano de obra, se tomó como referencia un valor promedio de \$12.500 COP por hora, correspondiente a un trabajo técnico básico. De esta manera, el costo se calcula como:

$$\text{Costo mano de obra} = 40 \text{ horas} \times \$12.500 \text{ COP/hora} = \$500.000 \text{ COP}$$

Sumando este valor al costo total de los componentes electrónicos:

$$\text{Costo total del sistema} = \$518.066 + \$500.000 = \$1.018.066 \text{ COP}$$

Este valor continúa siendo competitivo frente a equipos comerciales de medición de humedad, los cuales pueden superar este costo dependiendo de sus características, lo que evidencia la viabilidad económica del sistema IoT propuesto como una solución accesible para pequeños y medianos caficultores.

Tabla 11. Costo dispositivo IoT

Costo Dispositivo IOT			
Componente	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Sensor BME280	3	\$ 20.825	\$ 62.475
Microcontrolador pantallaESP32-8048S070C	1	\$ 248.591	\$ 248.591
microcontrolador ESP32-SE	1	\$ 39.000	\$ 39.000
modulo regulador de voltaje 5v con display digital	1	\$ 18.000	\$ 18.000
Sensor DHT22	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Cableado y conectores	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Caja protectora impresiones 3D	1	\$ 100.000	\$ 100.000
mano de obra 40H	1	\$ 500.000	\$ 500.000
Total			\$ 1.018.066

En comparación, un medidor comercial de humedad de café como el DH200X puede tener un costo aproximado entre 1.500.000 y 2.000.000 pesos colombianos, dependiendo del proveedor y del mercado.

Desde el punto de vista económico, el sistema IoT presenta una ventaja significativa en términos de inversión inicial. Mientras que el medidor comercial permite realizar mediciones puntuales, del contenido de humedad del grano interno y poco contenido, el sistema IoT desarrollado permite realizar un monitoreo continuo del proceso de secado, generando además un registro histórico de datos que puede utilizarse para análisis posteriores y utilizar cantidades mayores.

Adicionalmente, el uso del modelo matemático permite estimar la humedad interna del café sin necesidad de realizar mediciones manuales constantes con equipos especializados, lo que contribuye a optimizar el seguimiento del proceso de secado.

Por lo tanto, el sistema IoT propuesto no pretende reemplazar completamente al medidor comercial, sino complementar su uso, proporcionando información continua del proceso y reduciendo la frecuencia de mediciones manuales necesarias para verificar el estado del café.

Entre los beneficios adicionales del sistema se destacan:

monitoreo continuo del proceso de secado

almacenamiento de datos para análisis posterior

posibilidad de integración con plataformas en la nube

generación de históricos del comportamiento del secado

reducción de mediciones manuales con equipos comerciales

En conjunto, estas características permiten mejorar la toma de decisiones durante el proceso de secado del café, aportando una solución tecnológica de bajo costo y alto potencial de aplicación en pequeños y medianos sistemas de producción cafetera.

Conclusiones

El presente trabajo permitió caracterizar el proceso de secado de café en patio mediante la integración de tecnologías IoT, sensores ambientales y herramientas de análisis de datos. A partir de la implementación de un sistema de monitoreo basado en sensores BME280 ubicados en diferentes niveles de la masa de café, fue posible registrar de manera continua variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa, lo que permitió analizar el comportamiento del secado bajo condiciones reales de producción en los municipios de Génova, Albán y Sandoná.

Los resultados obtenidos evidenciaron que las condiciones climáticas influyen de manera directa en la dinámica del secado del café. En particular, se observó que los periodos de mayor radiación solar favorecen una reducción más rápida de la humedad superficial del grano, mientras que en condiciones de nubosidad o alta humedad ambiental el proceso de secado se vuelve más lento y estable. Estas variaciones generan diferencias entre la humedad superficial del café y la humedad interna del grano, lo que confirma la existencia de gradientes higrótérmicos dentro de la masa de café durante el proceso de secado.

El análisis comparativo entre los sensores ubicados en la superficie del café y las mediciones realizadas con el medidor comercial de humedad del grano permitió evidenciar que la humedad interna del café presenta una evolución más gradual y estable en comparación con las variaciones registradas en la superficie. Esto demuestra que la apariencia externa del café no siempre refleja con precisión el estado real de humedad del grano, lo que resalta la importancia de contar con herramientas de medición y monitoreo que permitan evaluar de manera más confiable el proceso de secado.

A partir de los datos recolectados se desarrolló un modelo matemático utilizando herramientas de programación en Python, mediante el cual fue posible estimar la humedad interna del grano a partir de las variables ambientales registradas por los sensores. La comparación entre las estimaciones obtenidas mediante el modelo y las mediciones realizadas con el medidor comercial permitió comprobar que el sistema IoT puede proporcionar una aproximación adecuada del contenido de humedad del café, lo que abre la posibilidad de utilizar sensores ambientales de bajo costo como una herramienta complementaria para el seguimiento del secado.

Por otra parte, la implementación del rastrillo mecanizado automatizado permitió evidenciar su importancia en la uniformidad del secado del café. El movimiento periódico del café contribuye a redistribuir las capas del grano, exponiendo de manera alternada las zonas internas y superficiales a las condiciones ambientales. Este mecanismo no solo favorece una mayor homogeneidad en la pérdida de humedad, sino que también reduce la necesidad de intervención manual constante por parte del operario, lo que representa una mejora significativa en términos de eficiencia operativa.

Desde el punto de vista económico, el análisis de costo–beneficio realizado muestra que tanto el sistema de monitoreo IoT como el rastrillo automatizado representan soluciones tecnológicas viables para su implementación en sistemas de secado en patio. La utilización de componentes electrónicos de bajo costo permite desarrollar dispositivos accesibles que pueden reducir los costos de mano de obra asociados al proceso de secado, además de proporcionar información valiosa para la toma de decisiones durante el proceso.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la integración de tecnologías IoT, análisis de datos y automatización mecánica puede contribuir significativamente a mejorar el control y la eficiencia del proceso de secado del café en patio. Estas herramientas permiten comprender con mayor detalle la dinámica del secado, optimizar las condiciones del proceso y generar información que puede ser utilizada para mejorar la calidad final del grano.

El sistema desarrollado representa una alternativa tecnológica con potencial de aplicación en el sector cafetero, especialmente para pequeños y medianos productores que buscan mejorar el control del proceso de secado sin realizar inversiones elevadas en equipos especializados. De esta manera, el uso de estas tecnologías puede contribuir al fortalecimiento de la producción cafetera y a la obtención de cafés de mayor calidad en el mercado.

Adicionalmente, el desarrollo del prototipo permitió validar la integración de sistemas mecánicos, electrónicos y de control dentro de un entorno real, demostrando que es posible replicar a pequeña escala el proceso tradicional de secado de café en patio. La construcción del sistema evidenció la importancia de un diseño mecánico adecuado para garantizar estabilidad, alineación y correcto desplazamiento del rastrillo durante la operación.

En cuanto al sistema de control implementado, se logró un funcionamiento autónomo y continuo del prototipo mediante el uso del microcontrolador ESP32, permitiendo coordinar el movimiento del motor DC y el motor paso a paso junto con la lectura de los sensores de final de

carrera. Esto demuestra que es posible automatizar procesos tradicionales mediante soluciones embebidas de bajo costo, mejorando la eficiencia sin incrementar significativamente la complejidad del sistema.

Durante las pruebas de funcionamiento, se evidenció que el sistema mecánico opera de manera adecuada bajo condiciones reales; sin embargo, también se identificó que el motor DC utilizado trabaja con un margen limitado de torque frente a las condiciones teóricas del sistema. Esto permite concluir que, aunque el prototipo es funcional, futuras mejoras deben considerar la selección de un motor con mayor capacidad para garantizar mayor robustez y confiabilidad ante variaciones de carga.

Por otra parte, la implementación del sistema IoT permitió validar la transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real, evidenciando la importancia de la conectividad para el monitoreo remoto del proceso. No obstante, se identificó que en zonas rurales la disponibilidad de redes WiFi puede representar una limitación, lo que sugiere la necesidad de explorar alternativas de comunicación como redes de largo alcance en futuras implementaciones.

El análisis de los datos recolectados también permitió identificar patrones de comportamiento del secado en diferentes ubicaciones geográficas, lo que evidencia que el proceso no es uniforme y depende en gran medida de las condiciones climáticas locales. Esto resalta la importancia de generar modelos específicos por región para obtener estimaciones más precisas del contenido de humedad del café.

Asimismo, se concluye que la variabilidad en las condiciones ambientales durante el día genera un comportamiento no lineal en el proceso de secado, lo que justifica el uso de modelos más avanzados, como regresiones polinómicas o técnicas de machine learning, para mejorar la precisión en la estimación de la humedad interna del grano.

Desde el punto de vista experimental, el proyecto permitió comprobar la importancia de realizar múltiples pruebas en diferentes condiciones, lo cual contribuye a aumentar la confiabilidad de los resultados y a validar el comportamiento del sistema frente a distintos escenarios climáticos.

Finalmente, el desarrollo de este proyecto evidencia el potencial de la ingeniería electrónica aplicada al sector agrícola, demostrando que la integración de tecnologías digitales en procesos tradicionales puede generar soluciones innovadoras que mejoran la productividad, la calidad del producto y la toma de decisiones basada en datos.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y posibles mejoras del sistema:

Se recomienda realizar la selección de un motor DC con mayor capacidad de torque, ya que, aunque el sistema desarrollado logró operar en condiciones reales, se evidenció que el motor trabaja con un margen limitado frente a las condiciones teóricas. Un motor con mayor potencia permitirá mejorar la confiabilidad del sistema, evitar sobreesfuerzos mecánicos y garantizar un funcionamiento estable ante variaciones de carga o condiciones adversas.

Se recomienda realizar una comparación experimental entre el secado tradicional y el secado con el sistema IoT, evaluando tiempos y condiciones del proceso, con el fin de validar la efectividad y viabilidad del sistema propuesto.

Se sugiere implementar sistemas de comunicación alternativos al WiFi, como tecnologías de largo alcance, LoRa o redes celulares, debido a que en zonas rurales la conectividad puede ser limitada o inestable. Esto permitiría garantizar la transmisión continua de datos y ampliar la aplicabilidad del sistema en entornos reales de producción cafetera.

Se recomienda ampliar la cantidad de sensores dentro de la masa de café, incluyendo sensores a diferentes profundidades y ubicaciones, con el fin de obtener una caracterización más detallada de los gradientes de temperatura y humedad. Esto contribuiría a mejorar la precisión del modelo matemático y a comprender con mayor profundidad el comportamiento del secado.

Se plantea como mejora futura la implementación de modelos más avanzados de análisis de datos, como técnicas de machine learning o redes neuronales, que permitan capturar relaciones no lineales más complejas entre las variables ambientales y la humedad del grano, aumentando la precisión en la estimación.

Se recomienda desarrollar una interfaz de usuario más robusta, como una aplicación móvil o plataforma web, que permita a los caficultores visualizar los datos en tiempo real, recibir alertas y tomar decisiones de manera más intuitiva durante el proceso de secado.

Se sugiere realizar pruebas con mayores volúmenes de café y en diferentes épocas del año, con el fin de validar el comportamiento del sistema en condiciones más cercanas a la producción real y evaluar su escalabilidad.

Se recomienda evaluar el consumo energético del sistema y considerar el uso de fuentes de energía renovable, como paneles solares, para hacer el sistema más sostenible y autónomo en zonas rurales.

Se propone como trabajo futuro la integración de un sistema de control automático que ajuste de manera inteligente el movimiento del rastrillo en función de las condiciones ambientales, permitiendo optimizar el proceso de secado sin intervención manual.

Se recomienda mejorar el encapsulamiento y protección de los componentes electrónicos, especialmente los sensores, para garantizar su durabilidad frente a condiciones ambientales como polvo, humedad y exposición prolongada al sol.

Finalmente, se sugiere continuar con la validación del sistema en conjunto con caficultores, con el fin de adaptar la solución a las necesidades reales del sector y facilitar su adopción, asegurando que la tecnología desarrollada tenga un impacto práctico en la mejora de la calidad del café.

Referencias

- [1] S. A. Delgado U, A. C. Silva C, and O. E. Sanclemente R, “Cadena productiva del café en el departamento de Nariño: Análisis de un caso exitoso,” *Doc. Trab. ECACEN*, vol. 1, no. 1, p. 17, 2017, [Online]. Available: www.hemeroteca.unad.edu.co
- [2] J. Montilla *et al.*, “Caracterización De Algunas Propiedades Físicas Y Factores De Conversión Del Café Durante El Proceso De Beneficio Húmedo Tradicional,” *Cenicafé*, vol. 59, no. 2, pp. 120–142, 2008, [Online]. Available: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059\(02\)120-142.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059(02)120-142.pdf)
- [3] C. Televisión, “Secado artesanal y calidad del café - La Finca de Hoy - YouTube.” Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=IfNOALeyoys>
- [4] J. S. M. Cadena and F. A. R. Loayza, “Diseño de un sistema automatizado para el movimiento del grano de café durante el proceso de secado para una planta productora en el Ecuador,” p. 114, 2020.
- [5] perez W. Ardila D, “CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD CAPACITIVO CON SALIDA ANALÓGICA E IMPLEMENTACIÓN EN EL DISEÑO DE UN CONTROL ON/OFF DE SECADO DE CAFÉ.,” pp. 1–39, 2016.
- [6] J. . Jurado, E. . Montoya, C. . Oliveros, and J. García, “Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café,” *Rev. Cenicafé*, vol. 60, no. 2, pp. 135–147, 2009, [Online]. Available: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2015/12/Mtodo-para-medir-el-contenido-de-humedad-del-cafe-pergamino.pdf>
- [7] K. N. Aswathi, H. Shetiya, M. S. Premachandaran, P. Y. Swasthika, S. K. Yannam, and P. S. Murthy, “Robusta honey coffee drying techniques and identification of changes in the bioactives and volatiles based on SPME-GCMS and E-Nose,” *J. Food Meas. Charact.*, vol. 18, no. 9, pp. 7550–7567, Sep. 2024, doi: 10.1007/s11694-024-02747-9.
- [8] S. M. Marín-López, J. Arcila-Pulgarín, E. C. Montoya-Restrepo, and C. E. Oliveros-Tascón, “Cambios Físicos Y Químicos Durante La Maduración del Fruto de Café (*Coffea arabica* L. var. Colombia),” *Cenifcafé*, vol. 54, no. 3, pp. 208–225, 2003.
- [9] E. Ruiz Lizama, *Clases de datos*, vol. 3, no. 1. 2014. doi: 10.15381/idata.v3i1.6585.
- [10] M. Eugenia and S. Noste, “Apunte de Regresión Lineal,” 2017.

- [11] B. V. L. L. Fanjul, "La_importancia_de_la_cobertura_arborea_e.pdf."
- [12] G. Roa-Mejía, C. E. Oliveros-Tascón, A. Parra-Coronado, and C. A. Ramírez-Gómez, "El Secado Mecánico Del Café," *Av. Técnicos Cenicafe*, no. 282, p. 8, 2000.
- [13] K. Glaría, "Sensores de humedad digitales/analógicos SHT3x," p. 25, 2023, [Online]. Available: <https://www.digikey.com/es/product-highlight/s/sensirion/sht3x-digital-and-analog-humidity-sensors>
- [14] M. Jacinto and G. Vera, "TUTOR : SISTEMA DOMÓTICO PARA EL CONTROL DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL Y CORPORAL DENTRO DE LOS GALPONES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM MFL," *Inf. Trab. Integr. Curric. PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO Ing. EN CIENCIAS LA Comput. Mec.*, p. 143, 2024.
- [15] P. F. Pereira and N. M. M. Ramos, "Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors - An assessment of their suitability for indoor built environments," *J. Build. Eng.*, vol. 60, p. 105151, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.105151.
- [16] D. B. Rojas and A. B. Reyes, "Iot System for Monitoring the Tobacco Curing Process With a Multi Probe Thermo-Hygrometer," vol. 22, pp. 21–32, 2023.
- [17] C. E. Oliveros and G. Roa, "Coeficiente de fricción, ángulo de reposo y densidades aparentes de granos de café coffee arabica variedad caturra," *Cenicafe*, vol. 36, no. 1, pp. 22–38, 1985, [Online]. Available: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/1050/1/arc036%2801%2922-38.pdf>
- [18] Martina Gelabert Galmés, "Grado en Ingeniería Mecánica DISEÑO Y CÁLCULO DE UN REDUCTOR DE VELOCIDAD Memoria y Anexos," 2024.
- [19] Jennifer Nontoa Ruiz and K. A. T. Romero, "Diseño de un sistema para la automatización del movimiento de las perillas de desplazamiento en el eje X y Y de un microscopio óptico," *γ787*, no. 8.5.2017, pp. 2003–2005, 2022.
- [20] J. A. S. Sánchez, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE TAQUILLAS A TRAVÉS DEL MÓDULO ESP32 Y LAS TECNOLOGÍAS WIFI , BLE Y RFID ," pp. 1–115, 2023.
- [21] J. A. Toscano Aguirre, "Implementación De Prototipos De Monitoreo Remoto Basados En Esp32 Y Página Web," pp. 7–35, 2024.
- [22] W. Sandoya and M. Mena, *Diseño e implementación de un prototipo de monitoreo de*

- temperatura, humedad y presión con comunicación vía radio e internet para mejorar la producción agrícola.* 2022. [Online]. Available:
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22634>
- [23] Wilson Duvan Urrea Garzon Juan David Fagua Cortes and Corporación, “Prototipo de aplicación web progresiva que almacena, interpreta y monitorea datos recolectados por sensores de PH, temperatura y humedad para análisis de un cultivo de fresa,” no. 8.5.2017, pp. 2003–2005, 2022.
- [24] R. Mendoza and J. Antonio, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación “ Obtención de un modelo matemático de la dinámica del balance de Muñoz Sánchez José Julián,” 2020.
- [25] J. J. (2025) Viscaíno, “UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN , VINCULACIÓN Y POSGRADO DIRECCIÓN DE POSGRADO Implementación de un modelo matemático de optimización para la asignación de horarios de clase y recursos tecnológicos mediante Python en un,” 2025.
- [26] C. Federico, H. Farfán, J. S. Zavala, J. Emilio, and G. Sánchez, “Resumen,” vol. 46, no. 149, pp. 88–104, 2025.
- [27] J. Reyes Chaparro, R. Duran Baron, J. Gamboa-Santos, R. Arballo, and L. Campañone, “Modelado matemático del secado con aire y microondas de Café Pergamino,” *Rev. Colomb. Investig. Agroindustriales*, vol. 6, no. 1, 2019, doi: 10.23850/24220582.1643.
- [28] K. Velasquez and D. Chamorro, “Regresion Lineal Multiple el modelo, estimación de los parámetros, contrastes,” *Handb. Biol. Stat.*, vol. 1, no. 12, pp. 1–31, 2012.
- [29] J. David, P. Bareño, U. Autonoma, D. E. Bucarmanga, F. De, and I. Fisico-Mecanicas, “Modelamiento Matematico De Un Sistema De Calentamiento De Aire Para Secado De Café Para La Empresa Penagos Hermanos,” 2021.
- [30] R. Montero, “Modelos de regresión lineal simple,” *Doc. Trab. en Econ. Apl.*, vol. 3, no. 12, p. 60, 2018, [Online]. Available:
https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

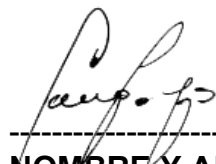
San Juan de Pasto, 28 de abril de 2026

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Caracterización del proceso de secado de café en patio utilizando tecnologías IoT, presentado por el (los) autor(es) Andrés Felipe Eraso Daza, y Santiago Rojas Perez del Programa Académico Ingeniería Electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



NOMBRE Y APELLIDOS DEL ASESOR(A)


Mg. Camilo Arturo Lagos Mora

C.c 12.997.039

Ingeniería Electrónica

Tel. 300 8198104


Correo: calagos@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Andrés Felipe Eraso Daza	Documento de identidad: 1081054073
Correo electrónico: Andresfelipeeraso66@gmail.com	Número de contacto: 315 5482621
Nombres y apellidos del autor: Santiago Rojas Perez	Documento de identidad: 1004597816
Correo electrónico: Santyrojas15@gmail.com	Número de contacto: 3215392471
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Camilo Arturo Lagos Mora	Documento de identidad: 12.997.039
Correo electrónico: calagos@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 300 8198104
Título del trabajo de grado: Caracterización del proceso de secado de café en patio utilizando tecnologías IoT	
Facultad y Programa Académico: Facultad de ingeniería, Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022



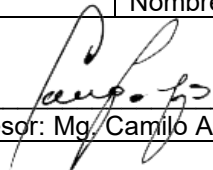
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 28 días del mes de abril del año 2026

	
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor: Andrés Felipe Eraso Daza	Nombre del autor: Santiago Rojas Perez
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
 Nombre del asesor: Mg. Camilo Arturo Lagos Mora	