

PROTOTIPO PARA LA VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE SEGÚN IRCA DE LA RESOLUCIÓN 2115 DEL MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL.



Trabajo de grado para optar al título de ingeniero en electrónica

Autores

DEISY LORENA LUCERO RODRIGUEZ

KEVIN MARINO ORTIZ BURBANO

DIRECTOR

Msc. JULIO ANDRÉS MOSQUERA BOLAÑOS

CODIRECTOR

Msc. JULIÁN ANDRÉS CAICEDO MUÑOZ

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ELECTRONICA

FEBRERO DE 2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

En cumplimiento de los requisitos legales y reglamentarios, se declara aprobado el trabajo de grado titulado, **“PROTOTIPO PARA LA VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE SEGÚN IRCA DE LA RESOLUCIÓN 2115 DEL MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL”** realizado por DEISY LORENA LUCERO RODRÍGUEZ y KEVIN MARINO ORTIZ BURBANO.

Una vez revisado el escrito final y aprobado la sustentación del mismo, se autoriza para que se realice la gestión administrativa correspondiente para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos.



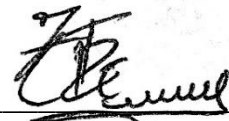
Arnol Arias Hoyos
Jurado



Geovanny Alberto Catamuscay
Jurado



Julio Andrés Mosquera Bolaños
Director



Julián Andrés Caicedo Muñoz
Codirector

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha brindado, por guiarme en el transcurso de mi proceso de formación profesional, ser apoyo y fortaleza en los momentos de dificultad y debilidad.

Gracias a mi madre, Mery; por ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que siempre me ha inculcado.

Agradezco a mis docentes de la Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, por haber compartido sus conocimientos durante mi preparación profesional, de manera especial, a los ingenieros Julián Caicedo Muñoz y Julio Andrés Mosquera, directores de mi trabajo de grado, quienes me han guiado académicamente con su paciencia, conocimiento y su gran trayectoria investigativa.

Igualmente, agradecer infinitamente al Docente Arnol Arias, por su amabilidad y predisposición; gracias a él y su conocimiento se ha logrado la transversalidad de esta investigación.

Les agradezco, a mis compañeros más cercanos, a quienes me acompañaron y apoyaron, con quienes tuve el placer de compartir e intercambiar ideas; a la familia Ortiz por acogerme cálidamente en su casa, y a todos quienes hicieron de esta etapa un trayecto de vivencias memorables.

Lorena

Primeramente, le agradezco a Dios, por darme sabiduría, acompañarme y guiarme en el transcurso de mi carrera universitaria, por ser mi fortaleza y permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida profesional.

Igualmente, agradezco a mis padres, por ser esos pilares fundamentales ofreciéndome la oportunidad de tener una excelente educación y brindarme su cariño y apoyo incondicional, en el trayecto de mi etapa académica.

De igual manera, agradezco a la universidad por las oportunidades que me brindó en el desarrollo del proceso de mi carrera universitaria, al conglomerado de maestros que me brindaron su confianza, paciencia, apoyo y dedicación, otorgándome las bases y conocimientos para hoy ver cumplida una de mis metas.

Kevin

CONTENIDO

1. CAPÍTULO 1 CONTEXTO GENERAL	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2 MARCO REFERENCIAL	13
1.2.1 Marco Conceptual.....	13
1.2.2 Estado actual del conocimiento	15
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 ESTRUCTURA METODOLÓGICA.....	18
2. CAPÍTULO 2 SISTEMA DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO	21
2.1 IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS	21
2.1.1 Parámetros Físicoquímicos y microbiológicos	21
2.1.2 Características de mayor impacto en la salud	22
2.2 IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	23
2.3 ANÁLISIS DE MÓDULOS Y COMPONENTES LÓGICOS.....	25
2.3.1 Primera fase: Esterilización Microbiológica.....	26
2.3.2 Segunda fase: Llenado	34
2.3.3 Tercera Fase: Dilución.....	36
2.3.4 Cuarta fase: Procesamiento	39
2.4 ESTRUCTURACIÓN DE COMPONENTES LÓGICOS.....	41
2.4.1 Módulos y componentes	41
2.5 ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS DE CARACTERÍSTICAS MEDIDAS..	50
2.5.1 SMTP (Simple Mail Transfer Protocol, O Protocolo Simple De Transferencia De Correo)	51
2.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO	51
2.6.1 Medidas	51
2.6.2 Sección Físicoquímica	52
2.6.3 Sección microbiológica	52
2.7 COMPONENTES TECNOLÓGICOS.....	54
2.8 CONSTRUCCIÓN FÍSICA DEL PROTOTIPO.....	57
2.8.1 Medidas y materiales	57
2.8.2 Sección físicoquímica	57
2.8.3 Sección microbiológica	58

3. CAPÍTULO 3 SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA GENERACIÓN DEL IRCA	60
3.1 PARAMETROS Y METODOS NORMATIVOS	60
3.1.1 Parámetros	60
3.1.2 Métodos	60
3.2 MÁXIMOS PERMISIBLES NORMATIVOS.....	61
3.3 MECANISMO DE COMPARACIÓN DE LOS DATOS MEDIDOS CON MÁXIMOS PERMISIBLES	62
3.4 DISEÑO DEL INDICADOR IRCA	62
3.4.1 MECANISMO DEL CÁLCULO DEL IRCA POR MUESTRA	63
3.4.2 MECANISMO DE CLASIFICACIÓN DE RIESGO IRCA	63
4. CAPITULO 4 AJUSTES Y EVALUACIÓN.....	65
4.1 PLAN DE AJUSTES	65
4.1.1 Reconocimiento de espacio y materiales.....	65
4.1.2 Prueba e identificación de tiempo de dilución y reposo	66
4.1.3 CALIBRACIÓN DE COLORES DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS.	67
4.1.4 Verificación de colores de las características microbiológicas.....	68
4.1.5 Calibración de colores de las características microbiológicas	70
4.2 PLAN DE PRUEBAS	74
4.2.1 Pruebas de validación.....	74
4.2.2 Pruebas de evaluación	91
5. CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
5.1. CONCLUSIONES.....	104
5.2. RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS	107

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1.4.1. Fases principales del prototipo.....	20
Ilustración 2.1.Fase 1: Sistema de medición de parámetros	21
Ilustración 2.3.2. Componentes por fase	26
Ilustración 2.3.3. Fase de esterilización.....	26
<i>Ilustración 2.3.4. Proyección de la dosis UV para esterilización de la bacteria Sarcina Lutea. Fuente creada a partir de [13].</i>	28
Ilustración 2.3.5. Medidas de la sección microbiológica.	28
Ilustración 2.3.6. Pseudocódigo Fase Esterilización.....	29
Ilustración 2.3.7. Fuente de alimentación de lámpara UVC.....	30
Ilustración 2.3.8. Diagrama eléctrico del control de encendido con MOC3021.....	30
Ilustración 2.3.9. Diagrama eléctrico de la conexión de Interruptores en la fase de esterilización.....	31
Ilustración 2.3.10. Efecto de la temperatura sobre la velocidad de crecimiento y consecuencias moleculares para la célula. Figura extraída de [16].	31
Ilustración 2.3.11. Calentador.....	32
Ilustración 2.3.12. Comunicación I2C (Atmega328p / Raspberry)	32
Ilustración 2.3.13. Fuente de alimentación del sistema de calefacción.	33
Ilustración 2.3.14. Diagrama eléctrico de la conexión del sensor de temperatura y el microcontrolador ATMEGA320P.	33
Ilustración 2.3.15. Diagrama eléctrico del conector de la Raspberry.....	33
Ilustración 2.3.16. Diagrama eléctrico del sistema de calefacción.....	34
Ilustración 2.3.17. Conexiones lógicas en el sistema de calefacción	34
Ilustración 2.3.18. Fase de llenado.....	35
Ilustración 2.3.19. Proceso de llenado sección fisicoquímica.	35
Ilustración 2.3.20. Proceso de llenado de la sección microbiológica.	36
Ilustración 2.3.21. Número más probable. Fuente extraída de [19].	36
Ilustración 2.3.22. Fase de dilución.	37
Ilustración 2.3.23. Pseudocódigo Fase de Dilución	37
Ilustración 2.3.24. Fuente de alimentación de los servomotores.	38
Ilustración 2.3.25. Diagrama de conexión de Servomotores y sensores Encoder.....	38
Ilustración 2.3.26. Fase de procesamiento.	39
Ilustración 2.3.27. Pseudocódigo Fase de Procesamiento	39
Ilustración 2.3.28. Tipos de iluminación del procesamiento.	40
Ilustración 2.3.29. Diseño PCB de todas las fases del prototipo.	40
Ilustración 2.3.30. Diseño SCH de todas las fases del prototipo	41
Ilustración 2.4.31. Módulos y componentes (Características Fisicoquímicas).....	41
Ilustración 2.4.32. Módulos y componentes lógicos (Características microbiológicas)..	42
Ilustración 2.4.33. Captura de imagen (sección Fisicoquímica). Fuente propia	43
Ilustración 2.4.34. Captura de imagen (sección Microbiológica). Fuente propia	43
Ilustración 2.4.35. Pseudocódigo de la verificación de turbiedad.	44
Ilustración 2.4.36. Iluminación (Sección fisicoquímica). Fuente propia	44
Ilustración 2.4.37. Vista de muestra microbiológica con ausencia de Coliformes totales.	45
Ilustración 2.4.38. Vista de muestra microbiológica con presencia de Coliformes totales	45

Ilustración 2.4.39. Técnica de iluminación lateral. Fuente propia.	46
Ilustración 2.4.40. Espacio de color RGB. Ilustración extraída de [36].	46
Ilustración 2.4.41. Espacio de Color HSV. Ilustración extraída [36].	47
Ilustración 2.4.42. ROI de muestra con pH 4.5.	47
Ilustración 2.4.43. Escala de color de pH (HACH). Ilustración extraída de [38].	48
Ilustración 2.4.44. Ubicación de la ROI de la sección microbiológica.	48
Ilustración 2.4.45. Ejemplo de Imagen binarizada.	49
Ilustración 2.4.46. Ejemplo de pH 6.5.	49
Ilustración 2.4.47. Pseudocódigo del proceso de asignación de Valor (Características físicoquímicas).	49
Ilustración 2.4.48. Pseudocódigo del proceso de determinación de ausencia o presencia de parámetros microbiológicos.	50
Ilustración 2.5.49. Almacenamiento y envío de datos.	50
Ilustración 2.5.50. Pseudocódigo de almacenamiento y envío de datos.	51
Ilustración 2.6.51. Diseño y medidas del prototipo.	52
Ilustración 2.6.52. Diseño sección físicoquímica.	52
Ilustración 2.6.53. Diseño Sección microbiológica.	53
Ilustración 2.6.54. Plataforma para las muestras microbiológicas.	53
Ilustración 2.6.55. Vista superior e inferior del calentador.	53
Ilustración 2.8.56. Dimensiones externas del prototipo.	57
Ilustración 2.8.57. Plataforma rotativa físicoquímica.	58
Ilustración 2.8.58. Vista interna de la sección físicoquímica.	58
Ilustración 2.8.59. Vista interna de la sección microbiológica.	58
Ilustración 2.8.60. Plataforma rotatoria de la sección microbiológica.	59
Ilustración 2.8.61. Calentador.	59
Ilustración 3.1. Fase 2: Sistema de procesamiento de datos.	60
Ilustración 3.3.2. Pseudocódigo de la comparación de características con los máximos permisibles.	62
Ilustración 3.4.3. Pseudocódigo del cálculo del IRCA total.	63
Ilustración 3.4.4. Proceso de creación de nivel de riesgo.	64
Ilustración 3.4.5. Pseudocódigo de la clasificación IRCA.	64
Ilustración 4.1.1. Imagen con presencia de Escherichia Coli y Coliformes totales.	69
Ilustración 4.1.2. Presencia de Coliformes totales y ausencia de Escherichia Coli.	70
Ilustración 4.1.3. Imagen solo con agar Colitag.	70
Ilustración 4.1.4. Región de capa superior en presencia de Coliformes Totales.	71
Ilustración 4.1.5. Región de capa superior en ausencia de Coliformes Totales.	71
Ilustración 4.2.6. Muestras para evaluación de pH.	75
Ilustración 4.2.7. Muestras 2 y 5 (pH: 6.5) 6 y 7 (pH: 5).	76
Ilustración 4.2.8. Comparación de muestras de Ph.	76
Ilustración 4.2.9. Prueba de calibración (Muestra 1: Cloro Residual Libre)	77
Ilustración 4.2.10. Prueba de calibración (Muestras 2:7 de Cloro Residual Libre)	78
Ilustración 4.2.11. Diagrama de dispersión de mediciones de Cloro Residual Libre de muestras 2, 3 y 4.	79
Ilustración 4.2.12. Diagrama de dispersión de mediciones de Cloro Residual Libre de muestras 5, 6 y 7.	79
Ilustración 4.2.13. Histograma de la muestra 1 (Turbiedad).	80
Ilustración 4.2.14. Diagrama boxplot de la muestra 2 (Turbiedad)	81

Ilustración 4.2.15. Diagrama boxplot de la muestra 3 (Turbiedad)	81
Ilustración 4.2.16. Diagrama de dispersión de mediciones de Turbiedad.	82
Ilustración 4.2.17. Diagrama boxplot de la muestra 1 y 2 (Nitrato)	83
Ilustración 4.2.18. Diagrama boxplot de las muestras 3 y 7 (Nitrato).	83
Ilustración 4.2.19. Diagrama boxplot de las muestras 4 (Nitrato)	83
Ilustración 4.2.20. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrato de muestras 1, 2 y 3.	84
Ilustración 4.2.21. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrato de muestras 4, 5 y 6.	84
Ilustración 4.2.22. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrato de muestras 7 y 8.	85
Ilustración 4.2.23. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrito de muestras 1 y 2.	86
Ilustración 4.2.24. Diagrama de dispersión de las muestras 3 y 4 (Nitrito).	86
Ilustración 4.2.25. Diagrama de dispersión de la muestra 1 (Fosfato).....	87
Ilustración 4.2.26. Diagrama de dispersión de las muestras 2 y 3 (Fosfato).	87
Ilustración 4.2.27. Diagrama de dispersión de mediciones de Hierro de muestras 1, 2 y 3 (Hierro).	88
Ilustración 4.2.28. Diagrama de dispersión de mediciones de Hierro de la muestra 4 (Hierro).	89
Ilustración 4.2.29. Diagrama de dispersión de mediciones de Hierro de muestras 5. ...	89
Ilustración 4.2.30. Notificación Email (Presencia Ecoli)	90
Ilustración 4.2.31. Notificación Email (24 h).....	91
Ilustración 4.2.32. Esterilización del espacio.	91
Ilustración 4.2.33. Esterilización de recipientes con cinta indicadora.	92
Ilustración 4.2.34. Autoclave para la esterilización.	92
Ilustración 4.2.35. Distribución de la muestra en los recipientes.	92
Ilustración 4.2.36. Esterilización de la sección microbiológica con luz UVC.....	93
Ilustración 4.2.37. Plataformas rotatorias de las secciones.	93
Ilustración 4.2.38. Email de la prueba 1	94
Ilustración 4.2.39. Datos de la Prueba 1.....	95
Ilustración 4.2.40. Email de la prueba 2.	96
Ilustración 4.2.41. Datos de la Prueba 1.Prueba 3: Agua potable del laboratorio N°1...	96
Ilustración 4.2.42. Detección de Escherichia Coli en la prueba 3 hora 7.....	97
Ilustración 4.2.43. Comparación de color de la muestra analizada en laboratorio y muestra analizada en el prototipo.....	98
Ilustración 4.2.44. Muestra de laboratorio analizada en el prototipo.....	98
Ilustración 4.2.45. Resultados prueba 6.	99
Ilustración 4.2.46. Email prueba 6.	99
Ilustración 4.2.47. Datos de la prueba 5.	100
Ilustración 4.2.48. Email de la prueba 5	101
Ilustración 4.2.49. Datos de la prueba 6.	102
Ilustración 4.2.50. Email de la prueba 6.	102
Ilustración 4.2.51. Resumen de nivel de riesgo IRCA de las muestras evaluadas.	103

Tablas

Tabla 1.2.1. Normatividad Colombiana para el control de la Calidad de agua.	18
Tabla 1.4.2. Actividades desarrolladas para la implementación del sistema de medición.	19
Tabla 1.4.3. Actividades desarrolladas para la implementación del sistema de procesamiento.	19
<i>Tabla 2.1.1. Puntajes de Riesgo IRCA - Creada a partir de [2].</i>	22
Tabla 2.1.2. Características de mayor impacto en la salud humana de las señaladas por la resolución 2115 de 2007.....	23
Tabla 2.2.3. Características y Standard Methods.....	24
Tabla 2.2.4. Características Manual INS y Standard Methods.....	25
Tabla 2.3.5. Características de la lámpara luz UVC.....	27
Tabla 2.3.6. Ecuación para el cálculo de la dosis.....	28
Tabla 2.3.7. Resumen de configuración de pines de la fase de esterilización.	30
Tabla 2.3.8. Elementos del sistema de calefacción.....	32
Tabla 2.3.9. Tiempo de Reposo de Características Fisicoquímicas.....	37
Tabla 2.4.10. Características Cámara Web Genius.....	42
Tabla 2.4.11. Características Cámara Genius FACECAM 1020.....	43
Tabla 2.6.12. Elementos para la construcción de la estructura física del prototipo.....	51
Tabla 2.7.13. Componentes tecnológicos (i.e. Hardware, Software).....	57
Tabla 3.1.1. Características seleccionadas de Resolución 2115.....	60
Tabla 3.1.2. Técnicas de detección de características Microbiológicas.....	61
Tabla 3.2.3. Características de mayor impacto en la salud humana y máximo permisible normativo.....	62
Tabla 3.4.4. Puntaje de riesgo de los parámetros verificados. Tabla creada a partir de [2].....	63
Tabla 3.4.5. Clasificación de nivel de riesgo IRCA. Creada a partir de [2].....	64
Tabla 4.1.1. Plan de ajustes del prototipo.	65
Tabla 4.1.2. Elementos necesarios para la calibración del prototipo.....	66
Tabla 4.1.3. Resumen de las características fisicoquímicas y tiempo de reposo.....	67
Tabla 4.1.4. Resumen de las características de calibración de los parámetros.....	68
Tabla 4.1.5. Análisis microbiológico de muestras iniciales.....	68
Tabla 4.1.6. Análisis microbiológicos para creación de máscaras iniciales.....	69
Tabla 4.1.7. Análisis microbiológico con monitoreo periódico.....	70
Tabla 4.1.8. Monitoreo periódico de la muestra N°5.....	73
Tabla 4.1.9. Plan de pruebas de funcionalidad del prototipo.....	74
Tabla 4.2.10. Pruebas de Calibración de potencial de Hidrogeno.....	76
Tabla 4.2.11. Mediciones de Cloro Residual Libre (PF-12PLUS VS Prototipo).....	77
Tabla 4.2.12. Mediciones de Turbiedad (Turbidímetro VS Prototipo).....	80
Tabla 4.2.13. Mediciones de Nitrato (Fotómetro VS Prototipo).....	82
Tabla 4.2.14. Mediciones de Nitrito (Fotómetro VS Prototipo).....	85
Tabla 4.2.15. Mediciones de Fosfato (Fotómetro VS Prototipo).....	87
Tabla 4.2.16. Mediciones de Hierro (Fotómetro VS Prototipo).....	88
Tabla 4.2.17. Características de notificación de Email (Prueba 1).....	90
Tabla 4.2.18. Características de notificación de Email (Prueba 2).....	91
Tabla 4.2.19. Características de la Prueba 1 (Rio Ejido N°1).....	94

Tabla 4.2.20. Resultados de análisis de la prueba 1 (Rio Ejido N°1) 94

Tabla 4.2.21. Características de la Prueba 1 (Rio Ejido N°2). 95

Tabla 4.2.22. Resultados de análisis de la prueba 2 (Rio Ejido N°2). 96

Tabla 4.2.23. Resultados de análisis de la prueba 3 (Agua potable N°1)..... 97

Tabla 4.2.24. Características de la Prueba 4..... 98

Tabla 4.2.25. Resultados de análisis de la prueba 4 (Agua potable N°2)..... 99

Tabla 4.2.26. Resultados de análisis de la prueba 5 (Rio Cauca). 100

Tabla 4.2.27. Resultados de análisis de la prueba 6 (Pueblillo). 101

Tabla 4.2.28. Resumen de características de la prueba 6. 102

Tabla 4.2.29. Resumen de la clasificación del nivel de riesgo de cada prueba evaluada.
..... 103

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es susceptible a cambios en cualquier momento, esto debido a algunos factores (e.g. clima); en consecuencia, los sistemas de suministro pueden presentar fallos ocasionales en la potabilización debido a respuestas tardías. Por ejemplo, en tiempos de lluvias el agua podría contener mayor contaminación microbiana esto se ve reflejado en brotes de enfermedades causadas por el agua, esta circunstancia hace que las decisiones oportunas sean vitales en la salud humana[1].

Water Checker es un prototipo electrónico realizado con el fin de verificar la calidad de agua para consumo humano; en este sentido, pretende servir de apoyo en la toma de decisiones oportunas de los sistemas de suministro que no cuentan con un laboratorio de análisis en el lugar, esto con el fin de disminuir considerablemente el tiempo de respuesta ante circunstancias inesperadas y el proceso de potabilización pueda ser llevado a cabo de manera óptima, para lo cual, se hará uso de algunas herramientas electrónicas (e.g. procesamiento digital de imagen).

Teniendo en cuenta lo anterior, con la verificación de la calidad del agua se estimará el Índice de riesgo de calidad de agua (IRCA), esto bajo la normatividad Colombiana Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Índice de Riesgo de la Calidad (IRCA)[2].

A continuación se describe la monografía por capítulos:

Capítulo 1: Contiene la información que describe el contexto general sobre el cual se elabora el prototipo, las condiciones y planteamiento inicial, el marco referencial, objetivos y la estructura metodológica bajo la cual se desarrolló el verificador de calidad de agua.

Capítulo 2: Este capítulo presenta toda la información de la construcción lógica y física del sistema de medición de cada característica del verificador de calidad de agua, también se presenta el procedimiento y componentes tecnológicos necesarios en cada fase.

Capítulo 3: En este capítulo se presenta el procesamiento de los datos, es decir, luego de medir las características (capítulo 2) es necesario realizar un procesamiento para interpretar la información que estas mediciones pueden brindar, cuyo resultado final de la interpretación es el indicador IRCA.

Capítulo 4: Contiene información de los ajustes o calibración necesarios para la medición de las características, además de los resultados de las pruebas realizadas al prototipo para validar su funcionamiento y descripción del espacio y protocolo llevados a cabo en cada prueba.

Capítulo 5: Este capítulo presenta recomendaciones para trabajos futuros y conclusiones de la elaboración del prototipo.

1. CAPÍTULO 1

CONTEXTO GENERAL

Este capítulo describe el contexto general sobre el cual se elabora el prototipo, las condiciones y planteamiento inicial, el marco referencial, objetivos y la estructura metodológica bajo la cual se desarrolló el verificador de calidad de agua.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de la normatividad internacional, el 28 de julio de 2010, a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció específicamente el derecho humano al agua y al saneamiento, ratificando que el acceso al agua potable apta para consumo humano es esencial para la ejecución de todos los derechos humanos, declarando el agua como un recurso vital y crucial en la vida de las personas[3]; por lo tanto, el estado debe ser el principal garante del acceso a agua salubre con el ánimo de evitar enfermedades causadas por su consumo en condiciones no adecuadas. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) “estima que 800.000 personas mueren cada año por causas relacionadas con la falta de agua salubre, más que las víctimas sumadas de conflictos, sismos y epidemias, y 2.000 millones de seres humanos más, carece de este insumo en condiciones seguras”[4]. En este sentido, la Organización Mundial de la Salud OMS, UNICEF y otras entidades, se encuentran actualmente dirigiendo esfuerzos mundiales por prevenir la transmisión de enfermedades transmitidas por el agua, fomentando el uso de mecanismos de gestión de riesgos eficaces e implementando una reglamentación sanitaria[5].

De acuerdo con el Informe nacional de calidad del agua para el consumo humano -Inca 2016-, realizado por la subdirección de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, solo uno de cada tres municipios suministra agua en óptimas condiciones a través de sus sistemas de abastecimiento [6]. En estos, se realiza un proceso de potabilización de agua, en el que además de modificar sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, también se controlan según los parámetros de máximos permisibles establecidos en la resolución 2015 del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; sin embargo, la verificación de estos parámetros no se realiza in situ y solo algunos sistemas de abastecimiento cuentan con laboratorio para el respectivo análisis, afectando de esta manera la toma oportuna de decisiones.

En efecto, la potabilización de agua requiere conocer de las propiedades de calidad de agua de las muestras tomadas; no obstante, su análisis suele ser lento, complejo y costoso, lo que termina por limitar la utilidad de la alerta anticipada y hace que resulte poco asequible. En consecuencia, se afecta la implementación oportuna de alternativas de solución para corregir y controlar la calidad de agua al interior de los sistemas de abastecimiento, especialmente para aquellos que no cuentan con laboratorio de análisis, donde el tiempo transcurrido entre la toma de una muestra y la entrega de resultados por parte de los laboratorios más cercanos puede estar alrededor de 8 a 15 días en promedio. Durante este periodo, el agua es enviada con normalidad a cada hogar sin contar con información que permita tomar una decisión sobre su tratamiento; en ese sentido, el agua suministrada a la población tiene un factor de incertidumbre en la cual esta puede no ser apta para consumo, lo que podría desencadenar que la población contraiga enfermedades a causa del agua no salubre como la diarrea, la fiebre tifoidea o entérica, el cólera, disentería. La primera se presenta como síntoma de una infección del tracto digestivo, ocasionando una deposición frecuente de heces que puede estar ocasionada por diversos organismos bacterianos, víricos y parásitos; la segunda es una enfermedad infecciosa, su reservorio es el humano y el mecanismo de contagio es fecal oral, a través de agua y de alimentos contaminados; la tercera, es una infección bacteriana aguda del intestino que provoca numerosos episodios de diarrea y vómitos intensos, los cuales a su vez pueden generar deshidratación aguda y provocar la muerte; la última, es una enfermedad infecciosa que se caracteriza por la inflamación y ulceración del intestino grueso acompañada de fiebre, dolor abdominal y diarrea con deposiciones de mucosidades y sangre. Estas son solo algunas de las enfermedades causadas con más frecuencia debido al consumo de agua no salubre, en general, la mayoría se puede prevenir con un tratamiento adecuado del agua, antes de consumirla.

Teniendo en cuenta lo anterior, existe una clara necesidad de ofrecer un mecanismo de verificación oportuna, in situ, de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua que permitan la oportuna toma de decisiones en el

control de las características del agua al interior de la planta de tratamiento. ¿Cómo determinar el indicador IRCA de manera efectiva y de rápida obtención en agua para consumo humano?

1.2 MARCO REFERENCIAL

Para establecer el contexto investigativo del proyecto, se ha establecido un marco conceptual y estado del arte como elementos científico-tecnológicos que orientan el objeto de estudio de la propuesta. En ese sentido, el Marco Conceptual describe las áreas o módulos temáticos que cubre la investigación; el Estado del Arte presenta los trabajos relacionados, el estado actual de conocimiento, las tendencias o enfoques futuros, las brechas que existen y el vacío que llenaría el desarrollo del proyecto.

1.2.1 Marco Conceptual

En esta sección se presentan las principales áreas o módulos temáticos que involucran el desarrollo de la propuesta de investigación.

1.2.1.1 Calidad de agua para consumo humano

En los sistemas de abastecimiento se llevan a cabo un conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, orientados a modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas, con el fin de hacerla apta para consumo humano. A este proceso se le conoce como potabilización o tratamiento, del cual depende la calidad del agua en los sistemas de abastecimiento.

En este sentido, la calidad del agua apta para consumo humano es el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia (e.g. Resolución 2115, Decreto 1575)[7], indicando así, que el agua para consumo humano no presenta riesgos conocidos a la salud.

➤ Índices de Calidad de Agua

Un índice de calidad de agua consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad del agua [8]. El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color; su ventaja radica en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información.

Los usuarios de esta información pueden estar estrechamente relacionados o en su defecto personas apenas familiarizadas con la misma; con la cual se puede tener una idea clara de la situación que expresa el índice como contaminación excesiva, media o inexistente, entre otras, de fácil comprensión y abstracción [8].

➤ Índice de Riesgo de Calidad de Agua -IRCA

Para hablar de calidad se debe relacionar el proceso con estándares de calidad; en este sentido, son usados indicadores de calidad de agua, como es el caso del Índice de Riesgo de la Calidad de Agua para Consumo Humano –IRCA- el cual indicará la clasificación del agua con un porcentaje, resultado de la sumatoria de cada característica fuera de los máximos permisibles, según los valores establecidos en la resolución 2115 de la normatividad Colombiana; posteriormente, la clasificación se hace según el nivel de riesgo que determinará la salubridad del agua a consumir por una población. El nivel de riesgo puede ser e.g., sin riesgo, bajo, medio, alto, inviable sanitariamente.

1.2.1.2 Análisis de muestras de vigilancia

Los sistemas de suministro deben tomar muestras con una frecuencia determinada por número de población; se denominada muestra a la toma puntual de agua en los puntos de muestreo concertados, que refleja la composición física, química y microbiológica representativa del momento [7]. La muestra recolectada es analizada en laboratorio con el fin de determinar la salubridad del agua y la eficacia del tratamiento al que fue sometida en el sistema de suministro, y de esta manera, orientar adecuadamente al desarrollo de acciones para el mejoramiento progresivo en el cumplimiento de los estándares óptimos de calidad de los sistemas de suministro, y también para el proceso de

vigilancia de la Autoridad Sanitaria correspondiente; estos análisis son de tipo físico, químico y microbiológico. Dentro de la resolución 2115 de la normatividad Colombiana, se encuentran establecidos los parámetros que regulan los valores de máximos permisibles para cada característica por cada tipo de análisis fisicoquímico y microbiológico, (e.g Alcalinidad total max 200, Nitritos max 0.1, Dureza total max 300) (mg/L) [2].

Para iniciar un muestreo es importante tener definida la modalidad de muestreo, teniendo en cuenta algunas características como presupuesto, personal con que se cuenta y su disponibilidad, transporte, costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, vida útil de los equipos, requerimientos de energía y espacio y disponibilidad de los mismos, entre otros.

➤ **Muestreo Manual**

El muestreo manual es usado cuando se cuenta con sitios de fácil acceso o aquellos que por medio de sus estructuras o adaptaciones puedan facilitar la toma de muestras. La ventaja de éste tipo de muestreo es permite a la persona encargada, observar los cambios del agua en cuanto a sus características físicas (e.g. olor, color, sustancias flotantes, caudal); el muestreo manual es aceptable para los criterios de control y vigilancia cuando la muestra es representativa de la calidad del agua del sitio de muestreo particular, por lo que se debe tener en cuenta que la información obtenida de estas muestras puntuales tomadas en un sitio y tiempo dados, es única para ese lugar y tiempo seleccionado [9].

➤ **Muestreo Automático**

Este tipo de muestreo es recomendable para los sitios de difícil acceso o por otra parte, cuando se justifica y se cuenta con un muestreador automático, la principal ventaja es la precisión en la toma de muestras; sin embargo, presenta complejidad en el montaje y calibración de equipos, además de que requiere revisiones continuas para evitar atascamientos u otras fallas del equipo [9].

➤ **Muestreo Mixto**

En la actualidad también se tiene en los programas de muestreo aquellos que involucran la utilización de los dos tipos de muestreo mencionados anteriormente (i.e muestreo manual y muestro automático), convirtiendo el monitoreo en un sistema integrado que permite la verificación manual de los resultados obtenidos de forma automática. Dicha verificación es realizada aleatoriamente, de tal manera que se pueda realizar la calibración, ajuste y mantenimiento de los equipos automáticos [9].

1.2.1.3 Monitoreo de calidad de agua para consumo humano

Con el fin de llevar a cabo un control, la autoridad sanitaria o las personas prestadoras que suministran o distribuyen agua para el consumo humano, llevan a cabo acciones periódicas de análisis de muestras de agua, que cubre espacio, tiempo y frecuencia en los puntos concertados según la norma; de esta manera, se comprueba y se evalúa el riesgo que representa a la salud pública la calidad del agua distribuida por los sistemas de suministro de agua para consumo humano; de igual manera, se valora el grado de cumplimiento de las buenas prácticas sanitarias, en el cual se llevan registros y se llenan formatos de actas de toma de muestras, registrando todos los datos necesarios para reportar al Sistema de Información de la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano – SIVICAP¹ [10], con la posibilidad de generar reportes en línea de la información de la calidad del agua e incluye el cálculo de los indicadores IRCA, IRABA, BPS Y MAPA DE RIESGO. Además, permite compartir más eficientemente la información generada y actualizada, con los diferentes usuarios directos o indirectos del sector.

La OMS y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia -UNICEF, crearon un programa de monitoreo para el Abastecimiento de Agua, Saneamiento e Higiene –JMP, el cual ha reportado estimaciones nacionales, regionales y globales de progreso en agua potable, saneamiento e higiene (WASH) desde 1990. El JMP mantiene una extensa base de datos global y se ha convertido una fuente importante de estimaciones comparables de progreso a nivel nacional, regional y mundial. La base de datos global JMP incluye casi 5,000 conjuntos de datos nacionales que

1. Desarrollado por el Instituto Nacional de Salud, en cumplimiento del Decreto 1575 de 2007 y sus resoluciones reglamentarias, que permite a todas las Autoridades Sanitarias departamentales, reportar los datos de la vigilancia de la calidad del agua, en función de sus actividades de Inspección, Vigilancia y Control en el país. [20]

permiten la producción de estimaciones para más de 200 países, entre los cuales se encuentra Colombia, como también de áreas y territorios. El JMP monitorea la calidad de agua a nivel de hogar y también en escuelas y centros de salud. Los informes de JMP se centran en las desigualdades en los niveles de servicio entre zonas rurales y urbanas, regiones y otros subgrupos de población donde los datos lo permiten [11], estas estimaciones ya sean nacionales, regionales o mundiales pueden explorarse en línea o descargarse para su posterior análisis.

1.2.1.4 Componente electrónico

Este componente constituye las herramientas y dispositivos electrónicos que son usados actualmente en el análisis de la calidad de agua apta para consumo humano.

Toma y análisis de muestras de agua

Para la aplicación de un sistema de muestreo automático en la toma de muestras se requiere instalar una serie de equipos como antenas, paneles solares, entre otros; y herramientas como licencias de transmisión y software; esto hace que actualmente el costo de operación sea elevado, convirtiéndose en un factor limitante para la implementación de este tipo de muestreo.

De acuerdo con el manual para toma de muestras de agua del Instituto Nacional de Salud [8], entre los equipos automáticos más representativos para determinar la calidad del agua destinada para consumo humano, se destacan los siguientes:

- Muestreadores secuenciales automáticos para proveer muestras compuestas en un período extenso de tiempo.
- Sistemas de monitoreo en línea (sistema SAMOS para detección de pesticidas, y sensores para características fisicoquímicas).
- Sistemas biológicos de alarma temprana que alerten si hay contaminación en la muestra.
- Muestreadores pasivos, así llamados porque simulan captación biológica.

Monitoreo de Muestras

Los resultados del análisis de muestras tienen un registro obligatorio, el cual se puede observar en línea a través del SIVICAP.

1.2.2 Estado actual del conocimiento

La revisión de trabajos relacionados fue realizada para cada una de las áreas o módulos temáticos. La revisión se realizó en bases de datos científicas y libros especializados.

1.2.1.1 Calidad de agua para consumo humano

Son muchas las enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada, por lo tanto, consumir agua potable asegurando sus características físicas, químicas y microbiológicas dentro de los parámetros permitidos, es fundamental en la salud pública ya que reduce significativamente la exposición de las poblaciones a dichas enfermedades y los beneficios en la salud son considerables.

➤ Índices de Calidad de Agua

Los índices de calidad de agua pueden organizarse en 10 categorías dentro de 4 grupos [6]; estas categorías están orientadas de acuerdo con su uso, el índice que será puesto de referencia en la presente investigación, llamado IRCA pertenece al 4 grupo; sobre las consecuencias, en la categoría indicadores del uso del agua, en el cual se evalúa la compatibilidad del agua con usos como abastecimiento y agricultura.

➤ Índice de Riesgo de Calidad de Agua -IRCA

Dentro de la normatividad Colombiana, en el capítulo IV del decreto 1775 de 2007, INSTRUMENTOS BÁSICOS PARA GARANTIZAR LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO, se encuentra establecido en su artículo 12°, el ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO – IRCA-. Grado de riesgo de

ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano [5]; por otra parte, en la resolución 2115 de 2007, capítulo IV, artículo 13°, establece lineamientos para el cálculo del IRCA, en el cual se asignará el puntaje de riesgo contemplado en el cuadro N°.6 de la misma, a cada característica física, química y microbiológica, por no cumplimiento de los valores aceptables establecidos, en los artículos 14°, 15° y 16°, se encuentra el cálculo del IRCA, clasificación del nivel de riesgo y el procedimiento del registro del IRCA, respectivamente [2].

1.2.1.2 Análisis de muestras de vigilancia

La OMS ha elaborado unas Guías para la calidad del agua potable en donde se especifica estándares de frecuencia de la toma de muestras para análisis, así como también puntos estratégicos donde tomarla, es decir puntos representativos o también los llamados puntos concertados [12]. En la normatividad Colombiana también se encuentran establecidos estos parámetros, tanto frecuencia como número de muestras y puntos de muestreo, detallados en los capítulos V y VI de la resolución 2115 de 2007, mencionada anteriormente [2].

➤ Análisis microbiológico

El referente en este punto son las guías para la calidad de agua potable realizadas por la OMS, donde señala que el análisis microbiológico del agua de consumo incluye el análisis de la presencia de *Escherichia coli*, un indicador de contaminación fecal y que no debe haber presencia en el agua de consumo de *E. coli*, ya que constituye una prueba concluyente de contaminación fecal reciente.

Otros referentes internacionales como [13][14], describen con detalle las normas de sanidad que se debe tener para la toma de muestras y para su respectivo análisis, así como el tiempo máximo de análisis luego de la toma, y en el caso de la muestra ser transportada, las condiciones generales bajo las cuales se debe realizar el transporte, estas mismas características y condiciones, están establecidas en la normatividad Colombiana bajo el artículo 27° del decreto 1575, ampliadas en un manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de Laboratorio [7][9].

➤ Análisis Físicoquímico

Además de las especificaciones generales, mencionadas en el análisis microbiológico, en el manual de instrucciones [9], el manual describe algunas de las características físicoquímicas que deben ser analizadas in situ, estas son: la temperatura, el olor, el sabor, el cloro residual libre y el pH del agua para consumo humano.

Para este tipo de análisis se debe conocer y manipular el equipo de medición, por ejemplo, si se trata de un equipo amperimétrico es importante conocer totalmente el funcionamiento y la forma de calibrarlo. Si el procedimiento de análisis para estos dos parámetros (i.e. Físicoquímicos) es por comparación de color (i.e. colorimétrico), se debe seguir instrucciones del Kit de muestreo de campo, utilizando los reactivos, volúmenes a aplicar y los correspondientes recipientes y escalas comparativas de color [9] [15] [16] [17].

➤ Métodos de Análisis de calidad de Agua

Entre los procedimientos más conocidos están los métodos recomendados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) [18] o los Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales publicado por la AWWA, USPH y WPCF de los Estados Unidos de Norteamérica (e.g. método 4500-H para pH, método 2120 B para Color) [19].

Por otra parte, estos métodos de análisis de agua estandarizados que actualmente son usados por las instancias encargadas de vigilar y controlar, deben ser puestos a prueba con las condiciones del contexto a aplicar, esto con el fin de comprobar exactitud y precisión, ya que usar métodos estandarizados no necesariamente aseguran unos resultados precisos ni cien por ciento confiables [20].

1.2.1.3 Monitoreo de Calidad de Agua

Dentro de lo consignado por la Resolución 2115 de 2007 del ministerio de ambiente, se establecen en los artículos del 24 al 27, la frecuencia y número de muestras que se deben tomar para vigilar la calidad físicoquímica y microbiológica del agua para consumo humano y se establecen las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema

de control y vigilancia. Los reportes de vigilancia deben quedar registrados y actualizados con la información mínima requerida por el artículo 31 de la misma resolución [2].

En este sentido, y para facilitar la consulta y consolidación de la información sobre calidad del agua de consumo en el país, con lo establecido en el decreto 1575 y las resoluciones como la Resolución 2115 de 2007, se creó SIVICAP [21], en la cual se consigna todo tipo de datos a nivel nacional, sobre el suministro de datos, desde las prestadoras de servicio, puntos concertados, normatividades, hasta el resultado de los análisis a las muestras; este sistema es operado por el Instituto Nacional de Salud; a través de éste se capturan las variables establecidas en el Decreto 1575 de 2007 y las resoluciones reglamentarias.

El Instituto desarrollo el primer aplicativo del SIVICAP lanzó su primera versión 1.8, en 20108. En 2011 se lanzó la versión WEB del SIVICAP y en el 2012 se implementaron cambios y se agregaron nuevas funcionalidades a la aplicación WEB; este sistema cuenta con un manual para usuarios como prestadores, autoridad sanitaria, analista de SIVICAP, entre otros [10].

El monitoreo es la observación o mediciones de las características generales del sistema de suministro, de acuerdo con un plan establecido, en el que se determina si las medidas de control existentes en un sistema de abastecimiento de agua de consumo funcionan y son adecuadas. En consecuencia, se hace posible establecer parámetros según las medidas de control, monitorear estos parámetros, y adoptar medidas correctivas cuando sea detectada una perturbación en el sistema, antes de que esto lleve a que el agua sea insalubre[12].

Dentro de la literatura y la práctica se encuentra que en la mayoría de los casos, en los sistemas de suministro de zonas alejadas a laboratorio, el monitoreo se basará en observaciones o pruebas sencillas y rápidas, tales como la medición de la turbiedad o la comprobación de la integridad estructural de las instalaciones, en lugar de realizar complicados análisis microbiológicos o químicos; mientras en otros, que cuentan con más recursos y equipamiento, el monitoreo se hace de unas pocas variables que podrían tener consecuencia en la Calidad del agua para consumo humano (e.g. turbiedad, cloro residual, temperatura y pH) como también de variables que afecten la red de distribución, por lo tanto el suministro a cada hogar (e.g. caudal, presión, volumen, etc.) [22].

1.2.1.4 Componente Electrónico

Para la determinación de la calidad de agua apta para consumo humano se han desarrollado diferentes tecnologías, mencionadas y tenidas en cuenta en el manual para la toma de muestras, elaborado por el Instituto Nacional de Salud [9].

- Muestreadores secuenciales automáticos para proveer muestras compuestas en un período extenso de tiempo.
- Sistemas de monitoreo en línea (sistema SAMOS para detección de pesticidas, y nuevos sensores).
- Sistemas biológicos de alarma temprana que alerten si hay contaminación en la muestra.
- Muestreadores pasivos, así llamados porque simulan captación biológica.

Existe en la industria, plataformas como Smart Water Xtreme, esta tecnología se basa en el Plug & Sense de Libelium, cuenta con sensores para medir la profundidad del agua y algunos elementos de las características físico químicas del agua. Por medio de redes del Internet de las Cosas (IOT), envía los datos para comunicarse directamente con una plataforma en la nube Terralytix Portal de Aridea, es catalogada como una de las plataformas más completas y versátiles del mundo [23].

1.2.1.5 Normatividad

A continuación se menciona la normatividad para tener en cuenta en el desarrollo del prototipo con base en las áreas y módulos temáticos (Ver Tabla 1.2.1).

Normatividad	Fuente	Descripción
--------------	--------	-------------

Decreto 1575 de mayo 09 de 2007	Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial[7].	Se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
Resolución 2115 de junio 22 de 2007	Ministerio de Protección social y Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial[2].	Por medio del cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias el sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”. Según lo ordenado en el Decreto 1575 de 2007.
Resolución 0811 de marzo 5 de 2008	Ministerio de Protección social y Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial[24]	Por medio del cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la Autoridad Sanitaria y las Personas Prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución. Según lo ordenado en el Decreto 1575 de 2007.

Tabla 1.2.1. Normatividad Colombiana para el control de la Calidad de agua.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Implementar un prototipo para la verificación de la calidad de agua en los sistemas de abastecimiento de agua potable según resolución 2115 del ministerio de la protección social, ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema para la medición de los parámetros que constituyen la clasificación de calidad del agua apta para el consumo humano.
- Diseñar un sistema para el procesamiento e interpretación de los parámetros de calidad de agua según estándares e indicadores establecidos en la normatividad Colombiana.
- Validar el prototipo en estudio de caso.

1.4 ESTRUCTURA METODOLÓGICA

Para el desarrollo total de la propuesta de investigación se tienen dos fases principales (i.e. sistema de medición, sistema de procesamiento de los datos), estas fases responden a los objetivos específicos planteados en el contexto general.

Para la implementación del sistema de medición de parámetros (i.e. Capítulo 2) se han desarrollado diez de las actividades planteadas dentro del cronograma del proyecto las cuales hacen parte de tres componentes de desarrollo (Ver Tabla 1.4.2); el desarrollo de estas actividades fueron presentadas en cuatro reportes diferentes. Todas estas actividades están encaminadas hacia la elaboración y construcción del prototipo hasta la medición de los parámetros.

ID	ACTIVIDADES
A	COMPONENTE DE CALIDAD DE AGUA
A1	Identificar las características físico químicas y microbiológicas en la calidad de agua apta para consumo humano.
A2	Identificar los métodos más apropiados para el análisis fisicoquímico y microbiológico de las características del agua.
A4	Análisis de los módulos y componentes lógicos del mecanismo de verificación de calidad de agua.
A5	Estructurar los componentes lógicos del mecanismo de verificación de calidad de agua.
B	COMPONENTE DE PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS
B1	Definir las características del agua de mayor impacto en la salud
B3	Medir las características del agua de mayor impacto en la salud.
B4	Almacenar los datos de las características medidas
C	COMPONENTE DE PROTOTIPO
C4	Diseño de la estructura del prototipo
C5	Selección de los componentes tecnológicos
C6	Construcción física del prototipo

Tabla 1.4.2. Actividades desarrolladas para la implementación del sistema de medición.

Para la implementación del sistema de procesamiento de datos (i.e. Capítulo 3) se han desarrollado ocho de las actividades planteadas dentro del cronograma del proyecto las cuales hacen parte de tres componentes de desarrollo (i.e. calidad de agua, procesamiento e interpretación de datos y prototipo); el desarrollo de estas actividades fueron presentadas en tres reportes diferentes. Todas estas actividades están encaminadas hacia la elaboración del sistema de procesamiento e interpretación de los datos a partir de los resultados del sistema de medición. (Ver Tabla 1.4.3)

ID	ACTIVIDADES
A	COMPONENTE DE CALIDAD DE AGUA
A3	Contrastar cada característica y método con la normatividad Colombiana.
B	COMPONENTE DE PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS
B2	Identificar dentro de la normatividad colombiana los parámetros de referencia o máximos permisibles para el agua salubre.
B5	Estructurar los componentes lógicos del mecanismo de comparación de los datos medidos con los máximos permisibles normativos.
B6	Diseñar el mecanismo de cálculo del indicador IRCA.
B7	Diseñar el mecanismo de la Clasificación de riesgo de la calidad del agua.
C	COMPONENTE DE PROTOTIPO
C1	Implementación del mecanismo de comparación
C2	Implementación del mecanismo de cálculo del IRCA
C3	Implementación del mecanismo de clasificación de calidad de agua.

Tabla 1.4.3. Actividades desarrolladas para la implementación del sistema de procesamiento.

El fin principal del prototipo es clasificar el nivel de riesgo del agua de acuerdo con el indicador IRCA; es decir, el capítulo de procesamiento de datos (i.e. capítulo 3) se realiza a partir de los valores medidos de las características resultantes del sistema de medición (i.e capítulo 2), de ahí que la unión de estas fases complementen la funcionalidad total del prototipo (Ver Ilustración 1.4.1).

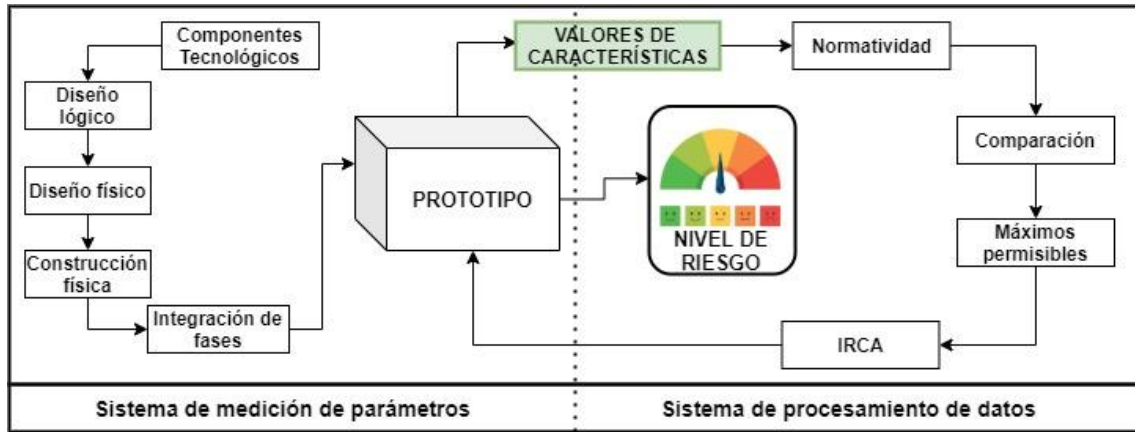


Ilustración 1.4.1. Fases principales del prototipo.

2. CAPÍTULO 2

SISTEMA DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO

Este capítulo presenta toda la información de la construcción lógica y física del sistema de medición de cada característica del verificador de calidad de agua; también se presenta el procedimiento y componentes tecnológicos necesarios en cada fase.

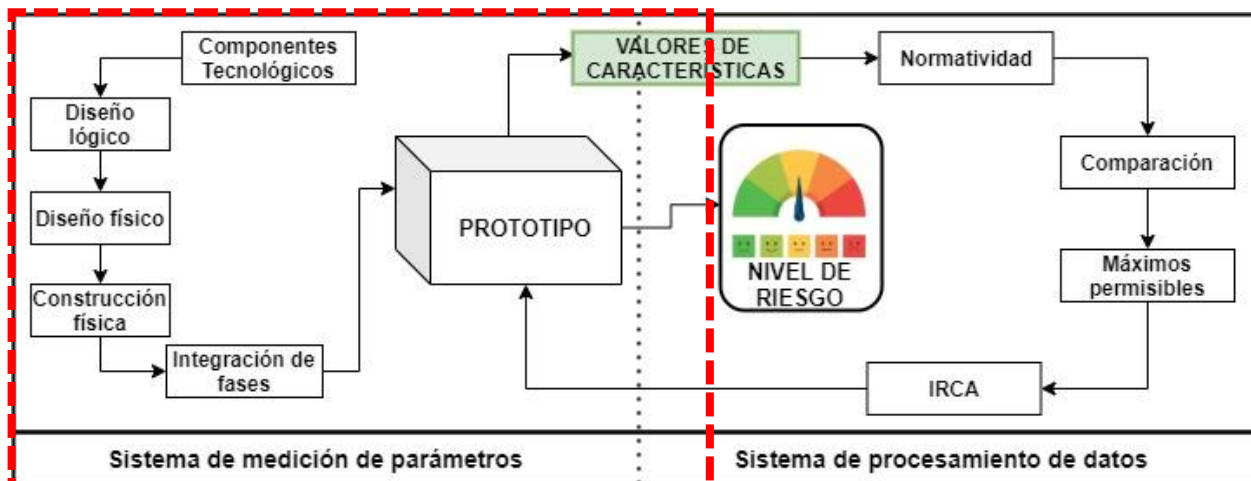


Ilustración 2.1.Fase 1: Sistema de medición de parámetros

2.1 IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS

El agua apta para consumo humano o agua potable, es el agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el Decreto 1575[7] y Resolución 2115 del 2007[2], puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos en la salud.

Para la construcción del prototipo de verificación de calidad de agua para consumo humano, en el componente de calidad de agua se identificará la idoneidad de la calidad del agua de consumo, basada en la comparación de los resultados de los análisis con los valores de referencia; estos valores de referencia de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos se dan por normatividad con base en los efectos dañinos que pueden causar en la salud humana.

2.1.1 Parámetros Físicoquímicos y microbiológicos

Los parámetros de análisis para comprobar la calidad del agua de consumo humano se clasifican en físicos, químicos o microbiológicos.

La Normatividad nacional Colombiana, a través de su Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible bajo la Resolución 2115 de 2007[2] indica los parámetros, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, específicamente en el Capítulo 4, Artículo 13; en esta se encuentran establecidos los parámetros con sus respectivos puntajes de riesgo por no cumplimiento de los valores aceptables o máximos permisibles; además, se establecen 22 características normativas que son verificadas por los sistemas de suministro para el cálculo del Índice de Riesgo de Calidad de Agua para consumo humano (IRCA) (Ver *Tabla 2.1.1*).

Resolución 2115 de 2007	
Características Físicas	Puntaje de Riesgo

Color aparente	6
Turbiedad	15
Características Químicas	
pH	1.5
Cloro Residual Libre	15
Alcalinidad	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza Total	1
Sulfatos	1
Hierro Total	1.5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio	3
Fluoruros	1
COT	3
Características Microbiológicas	
Coliformes Totales	15
Escherichia Coli	25
Sumatoria de puntajes asignados	
100	

Tabla 2.1.1. Puntajes de Riesgo IRCA - Creada a partir de [2]

Por otra parte y haciendo énfasis en los parámetros o características microbiológicas por su alto puntaje de riesgo IRCA, y de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la verificación de la calidad microbiológica del agua de consumo incluye el análisis de la presencia del indicador de contaminación fecal *Escherichia coli*, ya que un resultado positivo de ésta sería prueba de contaminación fecal reciente [1].

Un estudio científico como [13], destaca la importancia de las bacterias, virus; la incidencia de éstas en la calidad del agua y en la salud de las personas, y resaltan la bacteria *Escherichia Coli* como bacteria peligrosa debido a la cantidad de muertes que ha causado en niños menores de 5 años; además, afirma que la bacteria con la que más se ha trabajado ha sido *E. coli*, esto debido a que se cuenta con más conocimiento sobre su bioquímica, fisiología y genética que de cualquier otro ser vivo, incluido el hombre.

2.1.2 Características de mayor impacto en la salud

De acuerdo con la resolución 2115 de 2007 [2] se establecen 22 características normativas que deben verificarse para el cálculo del IRCA; sin embargo, en algunas investigaciones y guías básicas para el control y calidad de agua de

consumo humano como [15], se plantean solo algunos de los parámetros normativos de análisis (i.e. temperatura, conductividad, pH, turbiedad, cloro, Coliformes), al ser considerados de mayor impacto y manifiestan que la escogencia de estos parámetros y cantidad, obedece al programa de trabajo para asegurar una sostenibilidad en su plan de mediciones para el acceso de agua potable.

Por otra parte, el Instituto Nacional de Salud (INS) desde el programa de Vigilancia por Laboratorio de la Calidad de Agua para Consumo Humano, ha realizado algunas publicaciones y manuales como [9], donde enlista las características fisicoquímicas de mayor impacto en la salud humana (i.e., pH, conductividad, turbiedad, cloro residual, acidez, alcalinidad, color, dureza total, fosfatos, cloruro, Hierro, sulfato, nitrito, nitratos) y el método de análisis para cada característica está basado en los Standard Methods.

Otros estudios de índices de riesgo de diferentes lugares de Colombia como el realizado en Boyacá [25] se tomaron las características de las establecidas en la normatividad al considerarse de alta implicación en la salud (i.e., color, turbiedad, pH, cloro residual libre, Coliformes totales y *E. Coli*) para comprobar la calidad de agua de esta población.

De acuerdo con la información anterior y la información que brinda el Instituto Nacional de Salud, a través del SIVICAP[21], cada municipio presenta el análisis de una cantidad diferente de las características normativas; esto puede obedecer a [21][21] que los análisis en la mayor parte del país se realizan de acuerdo con su ubicación geográfica, tamaño y/o los recursos económicos con los que cuenta cada sistema de suministro.

A continuación, se presentan las características de análisis más frecuentes al ser consideradas de alto impacto en la salud humana y que a su vez aseguran una sostenibilidad en un plan de mediciones para el acceso de agua potable (Ver Tabla 2.1.2).

Características
Turbiedad
pH
Cloro residual libre
Coliformes totales
<i>Escherichia Coli</i>

Tabla 2.1.2. Características de mayor impacto en la salud humana de las señaladas por la resolución 2115 de 2007.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS

Actualmente, la normatividad alrededor del mundo para la calidad microbiológica del agua está basada en las pruebas de laboratorio de Coliformes; sin embargo, de acuerdo con Cara Gleeson y Nick Grey en [26], estas pruebas son obsoletas y poco fiables, por lo que existe una gran preocupación entre los científicos acerca de su uso continuado, a pesar de lo anterior, la industria del agua y de los reguladores continúan depositando una confianza casi total en el índice de Coliformes.

En la verificación de calidad de agua se debe identificar los métodos más apropiados para el análisis de cada uno de sus parámetros físicos, químicos y microbiológicos. A continuación, se realizará una revisión de los métodos existentes tanto en normatividad mundial, como en la literatura científica.

Distintos organismos nacionales e internacionales han publicado métodos normalizados para el análisis del agua. Con frecuencia, es común considerar que usando determinados métodos analíticos, los resultados que se logren serán precisos; sin embargo, para conocer la eficacia de estos métodos deben ser puestos a prueba bajo las condiciones y circunstancias del contexto donde serán usados[20].

Primero, es importante aclarar que la eficacia de estos métodos puede deberse a factores como las condiciones climáticas, la disponibilidad de recursos y las dificultades relacionadas con la sostenibilidad económica de los servicios

de agua, su mantenimiento y adecuación de instalaciones, estas condiciones pueden limitar o restringir la implementación de algunas recomendaciones de los países en desarrollo [27]; sin embargo, muchas de estas normas son elaboradas con tales limitaciones en mente y, por ejemplo, pueden permitir alternativas de análisis en el sitio.

De acuerdo con C.A. Severiche et al. en [17] en el que se ha elegido un Standard Methods por característica, los Standard Methods para el examen de agua y aguas residuales son el resultado de un esfuerzo conjunto de tres sociedades técnicas, Asociación Americana de Salud Pública (APHA), Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas (AWWA), Federación del Medio Ambiente del Agua (WEF). A continuación, se presentan las características, el tipo de análisis, y el método estándar que tomaron para cada una (Ver Tabla 2.2.3).

Característica	Standard Methods	Tipo de Análisis
Potencial de Hidrogeno pH	4500-H+	Básico
Color	2120 B	
Olor	2150 A	
Turbiedad	2130 B	
Conductividad	2520	
Temperatura	2550	
Alcalinidad	2320	Volumétricos
Acidez	2310	
Durezas	2340 C - 3500-Ca B	
Cloruros	4500-Cl- B	
Sólidos totales	2540 B	Gravimétricos
Sólidos suspendidos totales	2540 D	
Sólidos fijos y volátiles	2540 E	
Sólidos sedimentables	2540 F	
Sólidos disueltos totales	2540 C	
Aluminio	3500-Al	Colorimétrico
Nitrato	4500-NO3- B	
Sulfato	4500SO42- E	
Cromo hexavalente	3500-Cr B	
Fosfato	4500-P A, C	
Nitrito	3500	

Tabla 2.2.3. Características y Standard Methods.

Por su parte el INS en uno de sus manuales [16], presenta el análisis de algunas características fisicoquímicas bajo la escogencia de un método estándar; todos estos presentados a continuación son algunos de los métodos estándar expuestos por American Public Health Association et al. en [19] (Ver Tabla 2.2.4), donde se exponen los métodos aceptados mundialmente para el análisis de variables fisicoquímicas y microbiológicas del agua.

Característica	Standard Methods	Método
Potencial de Hidrogeno (pH)	4500 H+ B	Electrométrico
Color aparente	2120 A	Comparación visual
Color verdadero	120 C	Espectrofotometría (Longitud de onda simple)
Olor	2150 A	
Turbiedad	2130 B	Turbidimétrico
Conductividad	2510 B	Electrométrico
Cloro residual	4500Cl F	Titulación por volumetría
Acidez	2310 B	Titulación por volumetría
Alcalinidad	2320 B	Titulación por volumetría
Dureza Total	2340 C	Volumétrico
Dureza al Calcio	3500Ca B	Volumétrico
Fosfatos	4500 P D	Colorimetría
Cloruros	4500Cl- C	Volumétrico
Hierro	3500Fe B	Colorimétrico
Sulfatos	4500SO4 E	Turbidimétrico
Nitritos	4500 NO2 B	Colorimétrico
Nitratos	4500 NO3 B	Espectrofotométrico

Tabla 2.2.4. Características Manual INS y Standard Methods

Además de lo anterior, para los análisis de parámetros microbiológicos, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) en [28] expone métodos analíticos aprobados para vigilar el cumplimiento, esto bajo la Regla de Coliformes totales, es decir, para el análisis microbiológico cuenta con métodos enlistados según la técnica utilizada, que puede ser Filtración por membrana (e.g. Método EPA 1604), Enzima sustrato (e.g. 9223 B), entre otras.

2.3 ANÁLISIS DE MÓDULOS Y COMPONENTES LÓGICOS

En esta sección, se realizará el análisis de los módulos y componentes lógicos del mecanismo de verificación de calidad de agua, para lo cual se han definido cuatro fases de funcionamiento (Ver Ilustración 2.3.2).

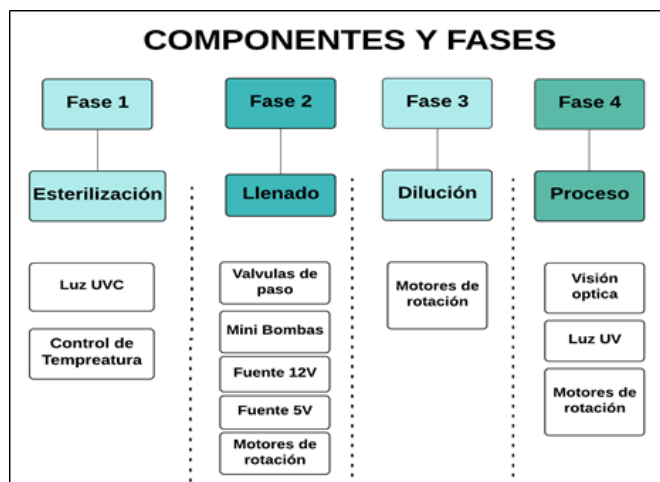


Ilustración 2.3.2. Componentes por fase

2.3.1 Primera fase: Esterilización Microbiológica

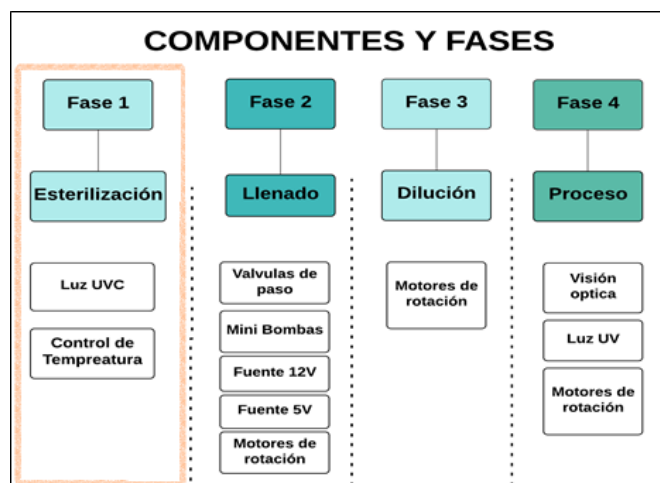


Ilustración 2.3.3. Fase de esterilización.

Se denomina esterilización a la eliminación total de patógenos por debajo de un nivel de medición especificado. La esterilización es definida como una reducción de contaminantes igual o superior a $8 \log_8$, 10^8 , o el 99.999999%[29].

El objetivo de esta fase es garantizarle al usuario que las condiciones iniciales con las que comenzará el proceso son las adecuadas, es decir, el entorno dentro del verificador microbiológico está libre de contaminación microbiana y preparado para el ingreso de la muestra microbiológica.

Esta fase de esterilización solo se realiza en la sección microbiológica debido a que es en el apartado donde los resultados podrían verse alterados por contaminación microbiana, contrario a la sección química.

2.3.1.1 Lámpara de Luz UVC

La luz Ultra Violeta tipo C, tiene una longitud de onda entre 200nm y 280nm, la principal característica de este tipo de luz es su efecto biocida especialmente en la línea espectral de 254nm donde se concentra una mayor cantidad de energía[30]; esto permite la desnaturalización de cualquier microorganismo (e.g. bacterias, virus) que se encuentre en el entorno.

Cuando la luz UV es absorbida por los ácidos nucleicos se produce una ruptura de los enlaces de Timina-Adenina y Uracilo-Adenina promoviendo la creación de moléculas dobles o dímeros moleculares de tipo ciclo butano, lo que genera bloqueo en la replicación, transcripción e incapacidad de reproducción del microorganismo irradiado[31].

Selección: Las características de la lámpara responden a las necesidades de las propiedades físicas y de diseño del verificador de Calidad de agua (Ver Tabla 2.3.5).

Característica	Descripción
Tipo	Fluorescente, Mercurio y construidas en cuarzo
Longitud de onda	254 nm UVC
Presión	Baja presión
Medidas	24 cm de largo (Balasto incluido) 23 mm de Diámetro OD 20 mm de diámetro ID
Potencia	6 Watt
Flujo luminoso	640 Lm

Tabla 2.3.5. Características de la lámpara luz UVC

2.3.1.2 Descripción del diseño UVC

Para el diseño del sistema de esterilización el factor más importante es el cálculo de la dosis UV, la cual describe la capacidad energética en la que un microorganismo puede ser desnaturalizado, es decir, se inactiva e impide su reproducción.

La dosis necesaria es el producto de la intensidad de radiación por el tiempo de exposición, de acuerdo con el estudio [29] donde presenta la dosis UV $\left(\frac{\text{mWs}}{\text{cm}^2}\right)$ para inactivación 1 log y 2 log para población microbiana, concluye que el microorganismo de mayor resistencia (i.e. *Sarcina Lutea*) requiere de $20 \left(\frac{\text{mWs}}{\text{cm}^2}\right)$ y teniendo en cuenta que la esterilización requiere de una reducción mínima de 8 logs entonces la dosis requerida para la esterilización del microorganismo más resistente es $160 \left(\frac{\text{mWs}}{\text{cm}^2}\right)$ (Ver Ilustración 2.3.4).

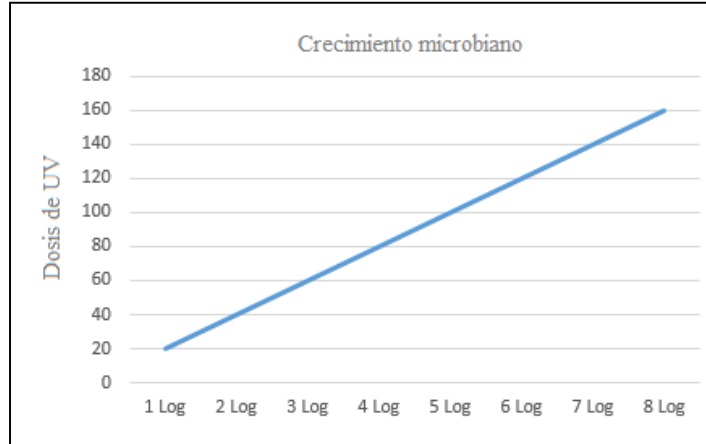


Ilustración 2.3.4. Proyección de la dosis UV para esterilización de la bacteria *Sarcina Lutea*. Fuente creada a partir de [13].

A continuación, se presenta la ecuación que demuestra la cantidad de dosificación de luz ultra violeta del sistema (Ver Tabla 2.3.6).

ECUACIÓN	D : Es la dosis de radiación
	I : Es la intensidad de radiación medida en miliwatt-segundo por centímetro cuadrado ($\frac{mW}{cm^2}$)
$D = I * t$	t : Tiempo en segundos (s)

Tabla 2.3.6. Ecuación para el cálculo de la dosis

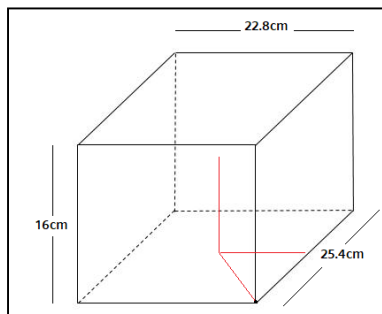


Ilustración 2.3.5. Medidas de la sección microbiológica.

Teniendo que: $I = \frac{mW}{cm^2}$

Donde, las características de la lámpara (Ver Tabla 2.3.5) y longitudes de la sección microbiológica (Ver Ilustración 2.3.5), entonces:

$$I = \frac{6W}{4\pi (16cm^2)}$$

$$I \cong 1.87mW/cm^2$$

Además, la dosis requerida para la esterilización (Ver Ilustración 2.3.4) es $160 \left(\frac{mWs}{cm^2}\right)$

Entonces;

$$t = \frac{D}{I}$$

Por lo tanto, el tiempo requerido para la esterilización es:

$$t = \frac{160 \left(\frac{mWs}{cm^2}\right)}{1.87mW/cm^2}$$

$$t \cong 85.56s$$

2.3.1.3 Procedimiento

El sistema será activado de acuerdo con algunas especificaciones iniciales; teniendo en cuenta el riesgo que representa la exposición de las personas a este tipo de lámparas, el sistema fue programado de acuerdo con las siguientes condiciones (Ver Ilustración 2.3.6):

- Para la activación de la fase de esterilización es necesario que la puerta esté completamente cerrada, de lo contrario la lámpara no encenderá.
- Si la puerta se abre en cualquier momento de la fase activa, la lámpara se apagará inmediatamente.

```
1 Algoritmo Esterilizar
2 Mientras Tiempo < T_prueba Hacer
3     Si B_esterilizar == 1 ^ Puerta == cerrada Entonces
4         LamparaUVC = ON
5     SiNo
6         LamparaUVC = OFF
7     Fin Si
8 Fin Mientras
9 FinAlgoritmo
```

Ilustración 2.3.6. Pseudocódigo Fase Esterilización.

2.3.1.4 Diseño Lógico del circuito de esterilización

➤ Fuente de alimentación

Para la alimentación y buen funcionamiento de la fase de esterilización se utiliza corriente alterna de 120 voltios. La lámpara cuenta con un balastro electrónico, elemento imprescindible para el correcto funcionamiento de una lámpara fluorescente ya que aporta tensión suficiente para que pueda encenderse; además, durante el uso del tubo fluorescente limita la corriente que pasa a través de él para que tanto el funcionamiento como la iluminación sea la adecuada (Ver Ilustración 2.3.7).

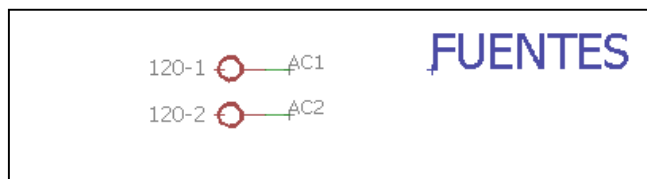


Ilustración 2.3.7. Fuente de alimentación de lámpara UVC.

➤ Control de carga

El control de la carga (i.e. lámpara) se hace a través de un optoacoplador o también llamado optoaislador MOC3021, el cual actúa por emisión y recepción y funciona como un interruptor que se activa gracias a la luz emitida de un diodo LED que a su vez satura un componente opto electrónico.

Desde la Raspberry se envía un voltaje de 3.3 Voltios al pin 1 del MOC (i.e. Ánodo del diodo LED) para la alimentación del diodo LED que a su vez actuará de señal para el interruptor bilateral de silicio (Diac), diseñado para usar como controlador de disparo aislado de Triac (i.e. pin 6, pin 4), lo que permite la conducción de 120V para el encendido de la lámpara o la interrupción para el apagado (Ver Ilustración 2.3.8).

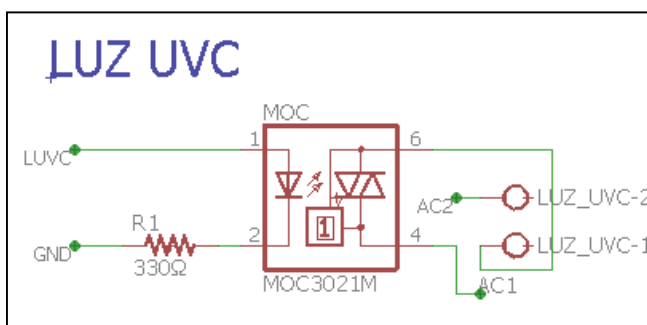


Ilustración 2.3.8. Diagrama eléctrico del control de encendido con MOC3021.

➤ Raspberry PI

El envío de la señal al controlador de carga (i.e. MOC3021) lo hace la Raspberry de acuerdo con lo planteado en la programación donde además se define el tiempo de encendido de la lámpara. El MOC recibe como señal en voltaje, 0 Voltios para apagado o 3.3 Voltios para encendido.

A continuación, se presenta la configuración y de pines la Raspberry (Ver Tabla 2.3.7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y las conexiones de los interruptores (Ver Ilustración 2.3.9).

PIN	CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
Pin 12	Entrada	Switch de esterilización
Pin 14	Entrada	Switch de puerta
Pin 8	Salida	Lámpara UVC

Tabla 2.3.7. Resumen de configuración de pines de la fase de esterilización.



Ilustración 2.3.9. Diagrama eléctrico de la conexión de Interruptores en la fase de esterilización.

2.3.1.5 Temperatura

Esta sección no hace parte de la fase de esterilización; sin embargo, inician al mismo tiempo, esto con el fin de que el sistema se establezca en un rango de temperatura de 35°C a 37 °C en el menor tiempo posible.

La temperatura es una de las condiciones más importantes que afectan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos, estas temperaturas varían mucho dependiendo el tipo de microorganismo, así, para cada uno existe una temperatura mínima, óptima y máxima[32] (Ver Ilustración 2.3.10). El rango de temperatura ideal para el crecimiento se encuentra dentro de la temperatura óptima.

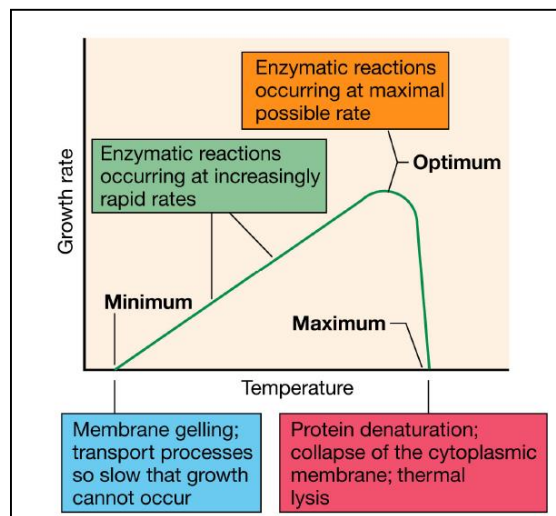


Ilustración 2.3.10. Efecto de la temperatura sobre la velocidad de crecimiento y consecuencias moleculares para la célula. Figura extraída de [16].

De acuerdo con estudios como [33] [32] [34] que presentan temperaturas de 35°C, 37°C, 39°C como temperaturas óptimas de crecimiento de la bacteria *E Coli*; además, se considera que la temperatura óptima de crecimiento de los Coliformes totales y *E coli* al considerarse microorganismos mesófilos se encuentra alrededor de 35-37°C [32][33]. Por lo tanto, para el prototipo se tendrá como referencia un rango de temperatura de 35°C a 37°C.

A través de una resistencia de calentamiento se proporciona el calor necesario y un ventilador distribuye este calor uniformemente o enfría el aire en caso de exceder el límite superior del rango de temperatura necesario en la sección microbiológica (Ver Ilustración 2.3.11 e Ilustración 2.3.16); se realiza un control PWM a la resistencia a través de un control ON/OFF, fue elegido este tipo de control ya que el rango de temperatura a mantener es amplio.

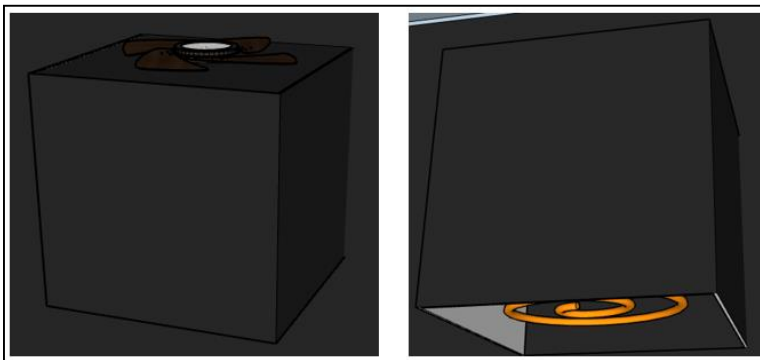


Ilustración 2.3.11. Calentador

El sistema de calefacción mide constantemente el valor de temperatura por medio de un sensor LM35 a través de un microcontrolador ATMEGA328P. La medición no es realizada directamente con la Raspberry PI ya que ésta no permite obtener mediciones analógicas, y la comunicación para el envío de datos entre el microcontrolador ATMEGA328P y la Raspberry se hace por medio del Bus de comunicación I2C (Ver Ilustración 2.3.12).

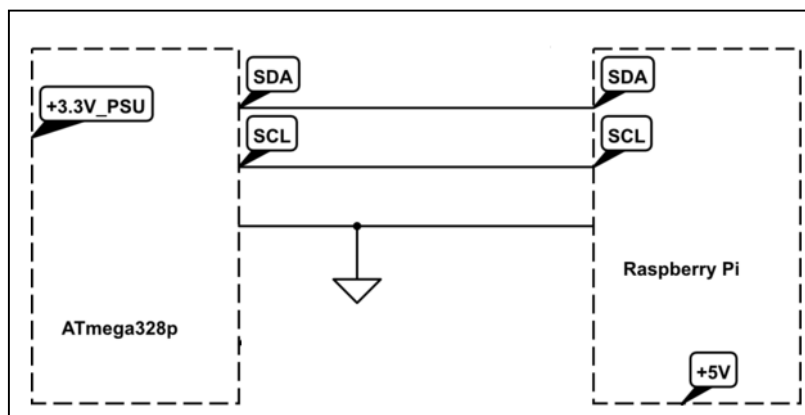


Ilustración 2.3.12. Comunicación I2C (Atmega328p / Raspberry)

A continuación, se presenta una tabla del resumen de los elementos utilizados en el sistema de calefacción (Ver Tabla 2.3.8).

Elementos	Descripción
Resistencia de calentamiento	12V, 6.5A max
Ventilador	5V
Caja protectora	Medidas: 6cm*6cm*6m
Sensor LM35	Sensor de temperatura de alta precisión
Microcontrolador	ATMEGA328P
Bus de comunicación	Circuito inter-integrado (I2C)

Tabla 2.3.8. Elementos del sistema de calefacción.

➤ Diseño lógico del circuito de temperatura

El diagrama del circuito está compuesto por la fuente de alimentación de 12 Voltios que proporciona en su máximo de corriente 10 Amperios (Ver Ilustración 2.3.13).

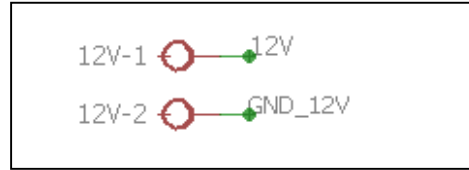


Ilustración 2.3.13. Fuente de alimentación del sistema de calefacción.

Por su parte, el monitoreo de la temperatura se realiza a través de un sensor LM35 que es conectado al microcontrolador ATMEGA328P para la adquisición de la medición analógica y posteriormente enviar esta información a la raspberry a través del bus de comunicación I2C (i.e. SDA, SCLK).

A continuación se presenta el dígrama electrico de conexión del sensor de temperatura en el microcontrolador ATMEGA328P (Ver Ilustración 2.3.14) y la conexión eléctrica del bus de comunicación I2C (Ver Ilustración 2.3.14 Ilustración 2.3.15).

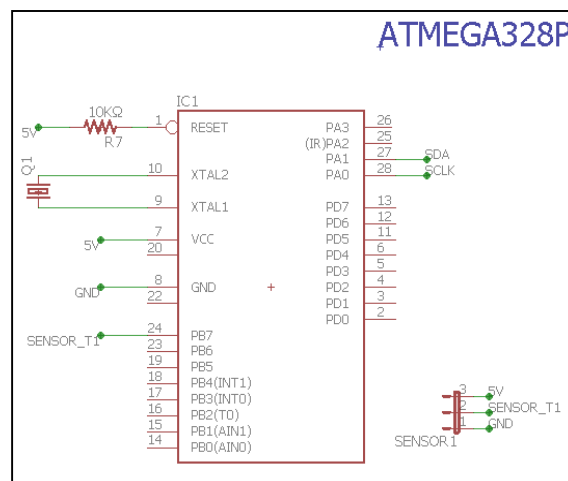


Ilustración 2.3.14. Diagrama eléctrico de la conexión del sensor de temperatura y el microcontrolador ATMEGA320P.

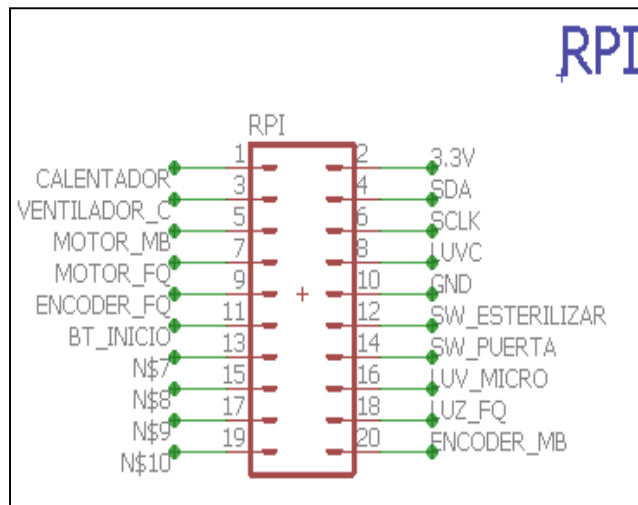


Ilustración 2.3.15. Diagrama eléctrico del conector de la Raspberry.

Lo anterior garantiza el correcto funcionamiento del sistema de calefacción, el cual utiliza un mecanismo de interrupción o switcheo similar al de la fase de esterilización; sin embargo, se ha utilizado una referencia diferente, en este caso un

optoacoplador 4N28, el cual es un optoacoplador de salida de fototransistor de 1 canal y 6 pines con conexión de base, que permite un switcheo a altas frecuencias (Ver Ilustración 2.3.16).

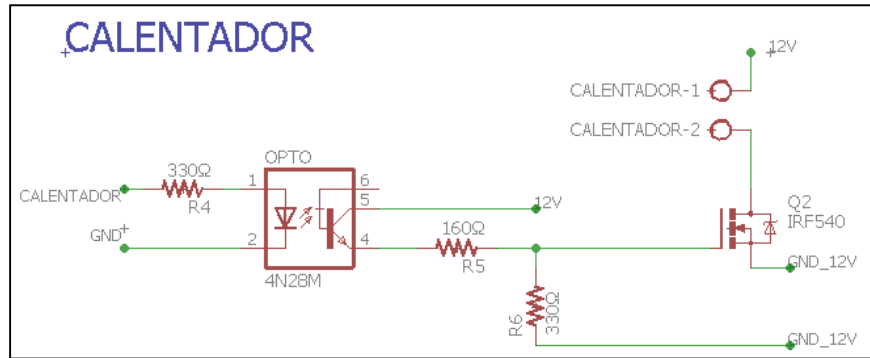


Ilustración 2.3.16. Diagrama eléctrico del sistema de calefacción.

Desde la Raspberry se envía un valor de PWM al optoacoplador (i.e. pin 1) que es traducida como la velocidad con que enciende el diodo LED (i.e. emisor) para la salida fototransistor (i.e. receptor) del optoacoplador, el cual se encarga de proporcionar la tensión necesaria de acuerdo con el voltaje de referencia (i.e. Pin 5) y el PWM; es decir, la salida será un valor de tensión proporcional al PWM.

Cuando se obtiene un valor de tensión proporcional es aplicado a la compuerta del transistor mosfet IRF540, el cual controla el flujo de electrones desde el surtidor hasta el drenador respecto a la tensión de la compuerta, este flujo de electrones o corriente es la que llega a la resistencia y genera calor que se regula con la corriente entregada (Ver Ilustración 2.3.17).

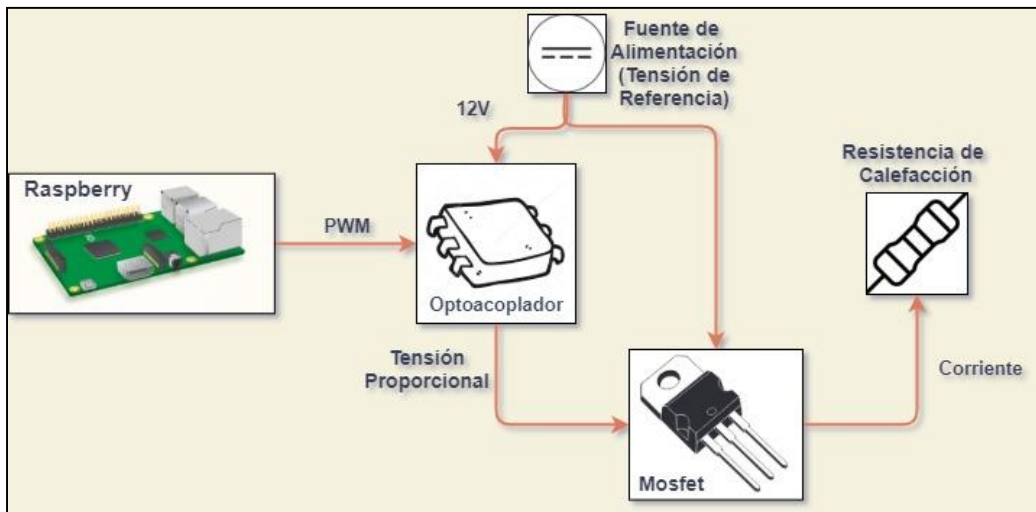


Ilustración 2.3.17. Conexiones lógicas en el sistema de calefacción

2.3.2 Segunda fase: Llenado

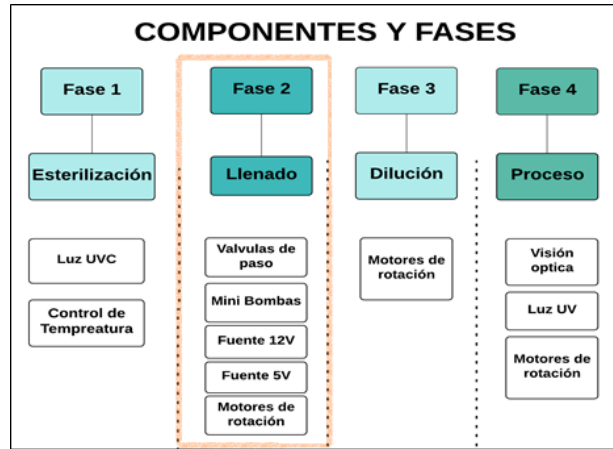


Ilustración 2.3.18. Fase de llenado.

Esta fase se encuentra instrumentalizada, es decir, se tiene un diseño inicial para implementaciones futuras, pero no ha sido implementada en el desarrollo del prototipo; sin embargo, esto no afecta el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados en el anteproyecto.

2.3.2.1 Procedimiento

Para la activación de esta fase se debe verificar el proceso de esterilización, sí y solo sí fue llevado a cabo, entonces se podrá proceder con el llenado automático.

Para los parámetros fisicoquímicos el llenado de los tubos de ensayo se hace por medio de la activación de las mini bombas y electroválvulas que impulsan, permiten o bloquean el paso del agua, cada tubo se llena con 5ml de la muestra problema (Ver Ilustración 2.3.19) así será llamada en adelante la muestra tomada para el análisis.

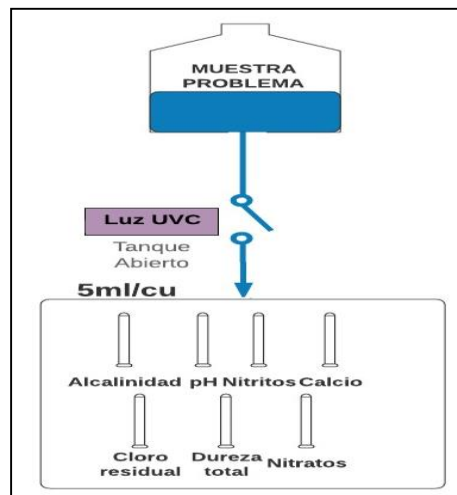


Ilustración 2.3.19. Proceso de llenado sección fisicoquímica.

Para los parámetros microbiológicos el llenado se realiza a través del cierre o apertura de la electroválvula y activación de la mini bomba dispuesta para esta sección. Teniendo en cuenta esto se procede con el llenado del caldo de cultivo, el cual se constituye de 100ml de muestra problema y agar nutritivo (i.e. Colitag) (Ver Ilustración 2.3.20).

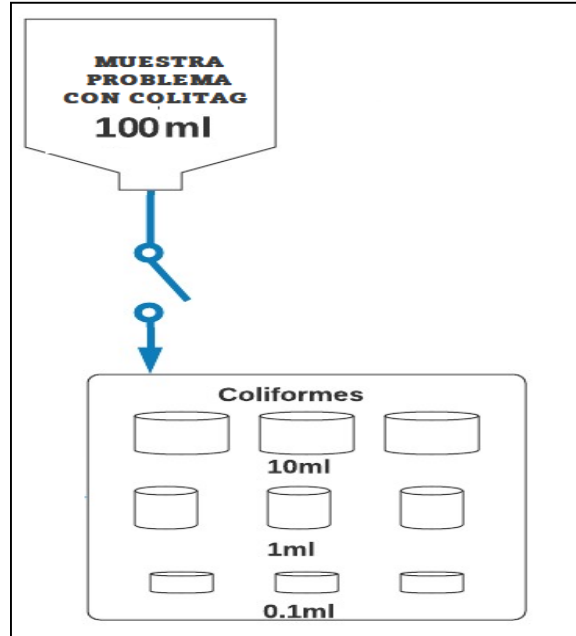


Ilustración 2.3.20. Proceso de llenado de la sección microbiológica.

El volumen contenido en cada uno de los recipientes (Ver Ilustración 2.3.20) está basado en el manual del agar nutritivo de COLITAG[35], la funcionalidad de este está dada por su estandarización donde a través de esta distribución es posible calcular el valor correspondiente del método del Número más Probable, de acuerdo con el número de recipientes de cada tamaño que se encuentren contaminados (Ver Ilustración 2.3.21).

	# of Positive Wells			MPN /100mL	95% Confidence Limit	
	10mL	1.0mL	0.1mL		Lower	Upper
0	0	0	0	<2		
0	0	1	1	2	<0.5	7
0	1	0	2	2	<0.5	7
0	2	0	4	4	<0.5	11
1	0	0	2	2	<0.5	7
1	0	1	4	4	<0.5	11
1	1	0	4	4	<0.5	11
1	1	1	6	6	<0.5	15
1	2	0	6	6	<0.5	15
2	0	0	5	5	<0.5	13
2	0	1	7	7	1	17
2	1	0	7	7	1	17
2	1	1	9	9	2	21
2	2	0	9	9	2	21
2	3	0	12	12	3	28
3	0	0	8	8	1	19
3	0	1	11	11	2	25
3	1	0	11	11	2	25
3	1	1	14	14	4	34
3	2	0	14	14	4	34
3	2	1	17	17	5	46
3	3	0	17	17	5	46

Ilustración 2.3.21. Número más probable. Fuente extraída de [19].

2.3.3 Tercera Fase: Dilución

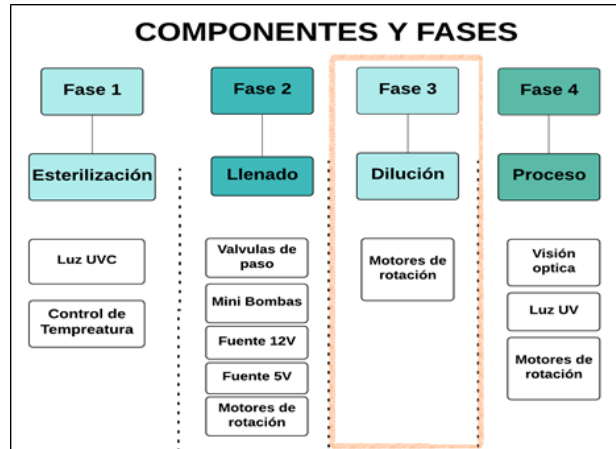


Ilustración 2.3.22. Fase de dilución.

Esta fase se encarga de que los reactivos y caldo de cultivo se encuentren completamente listos en las muestras para el procesamiento de imágenes, esto incluye el tiempo de reposo de cada muestra problema en el caso de la sección fisicoquímica (Ver Tabla 2.3.9).

Característica	Tiempo de Reposo (Minutos)
Turbiedad	1 (Inmediato)
pH	0 (Inmediato)
Cloro residual libre	1
Nitrato	5
Hierro	7
Nitrito	10
Fosfato	10

Tabla 2.3.9. Tiempo de Reposo de Características Fisicoquímicas

Para la activación de esta fase se debe tener en cuenta condiciones anteriores (Ver Ilustración 2.3.23):

- La fase de esterilización debió ser realizada previamente.
- Los recipientes deben tener el contenido de la muestra problema y los reactivos necesarios para la sección fisicoquímica.
- La dilución se hará por medio de movimiento rotatorio de servomotores por un tiempo determinado de acuerdo con las pruebas realizadas.

```

1  Algoritmo Dilución
2      Si Esterilizar = 1 ∧ B_Inicio = 1 Entonces
3          Mientras Tiempo < T_Dilución Hacer
4              ServoMotores = rotar
5          Fin Mientras
6      SiNo
7          B_Inicio = 0
8      Fin Si
9  FinAlgoritmo
    
```

Ilustración 2.3.23. Pseudocódigo Fase de Dilución

2.3.3.1 Diseño Lógico del circuito de Dilución

➤ Fuente de alimentación

La alimentación de los motores encargados del movimiento de la plataforma (i.e. servomotores) se ha realizado desde una fuente independiente con el fin de evitar posibles daños por corrientes inversas hacia la Raspberry (Ver Ilustración 2.3.24).

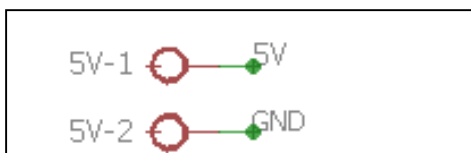


Ilustración 2.3.24. Fuente de alimentación de los servomotores.

➤ Servomotores y control de movimiento

Dentro de la fase de dilución el elemento principal son los motores de movimiento y su respectivo control, para cada sección (i.e. microbiológica, fisicoquímica) se ha dispuesto de un servomotor, la característica principal de estos motores es su giro continuo es decir 360°.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace indispensable el control del movimiento de los servomotores con el fin de conocer la posición en la que se encuentra cada muestra de las plataformas móviles; este control se realiza mediante codificadores rotatorios o sensores Encoder dispuestos en el dispositivo para cada servomotor (Ver Ilustración 2.3.25), el funcionamiento de este tipo de sensores está basado en la emisión y recepción de señales infrarrojas que pueden ser interrumpidas por un disco con ranuras.

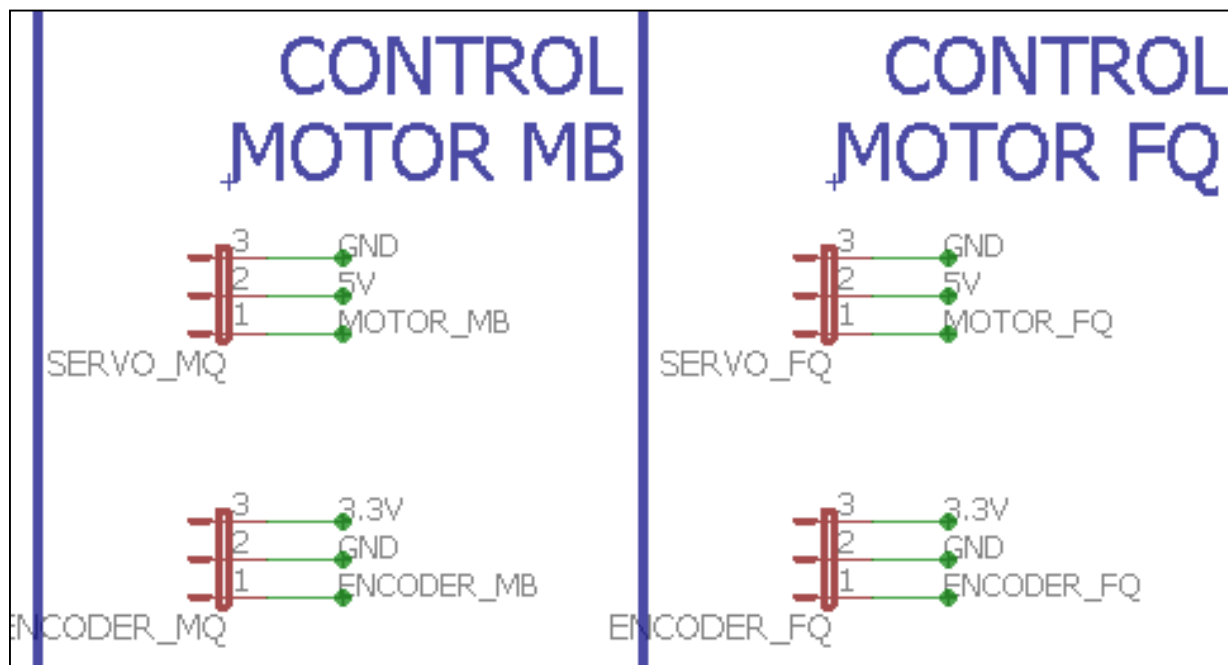


Ilustración 2.3.25. Diagrama de conexión de Servomotores y sensores Encoder.

2.3.4 Cuarta fase: Procesamiento

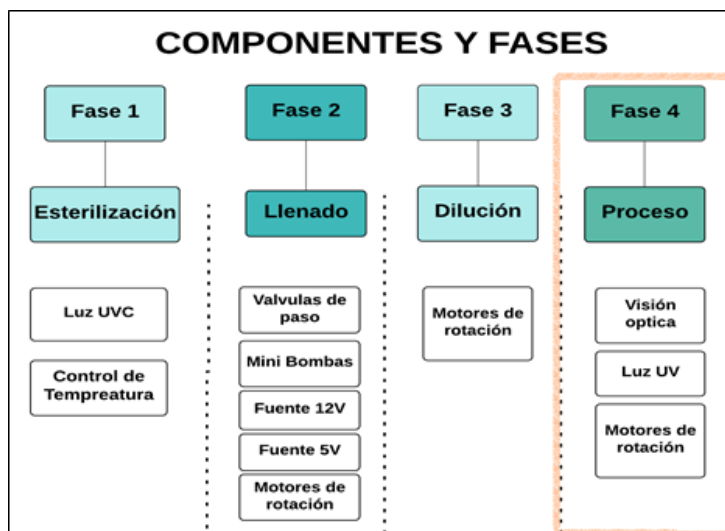


Ilustración 2.3.26. Fase de procesamiento.

Esta fase solo será realizada comprobando el cumplimiento de las tres fases anteriores (i.e. Esterilización, llenado, dilución), en las que el sistema incluye las condiciones necesarias (e.g. temperatura, dilución) para realizar la verificación de los valores de cada parámetro.

En el caso de los parámetros fisicoquímicos se realiza por medio de procesamiento digital de imagen la comparación de color de cada muestra con la tabla de colores con los que cuenta cada reactivo y se verifica el valor de riesgo asignado por el laboratorio fabricante.

Por su parte, para los parámetros microbiológicos se realiza también procesamiento digital de imagen, pero en este caso se hará reconocimiento de color, dónde es detectado un color predefinido por el fabricante y el método usado por el laboratorio el cual determina la ausencia o presencia de bacterias (e.g. *Escherichia Coli*, Coliformes).

A continuación, se presenta el pseudocódigo de la lógica que se usará en la construcción de la fase del procesamiento del prototipo (Ver Ilustración 2.3.27), con las condiciones anteriormente expuestas.

```

1  Algoritmo Procesamiento
2
3      Si Esterilizar == 1 A Dilución == 1 Entonces
4          PDI_FQ = ON
5          Repetir
6              Si Tiempo_MB == T_Prueba Entonces
7                  PDI_MB = ON
8                  Captura = Captura + 1
9              Fin Si
10             Hasta Que Captura == N_Pruebas
11
12         Fin Si
13
14     FinAlgoritmo
    
```

Ilustración 2.3.27. Pseudocódigo Fase de Procesamiento

2.3.4.1 Diseño Lógico del circuito de la fase de procesamiento

En la fase de procesamiento son necesarios 4 elementos descritos a detalle en el TR2 del componente de calidad de agua. Para la captura de la imagen se dispone de 2 periféricos conectados a la Raspberry (i.e. cámaras) ubicando una en cada sección y el tipo de iluminación que utiliza cada sección (i.e. luz UVA, luz LED) cuyo suministro de energía es

obtenido de la fuente independiente de 5 voltios (Ver Ilustración 2.3.28) donde se realiza el switcheo a través de transistores 2N2222.

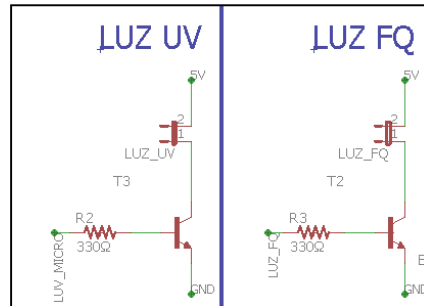


Ilustración 2.3.28. Tipos de iluminación del procesamiento.

A continuación, se muestran los diseños PCB y SCH de la construcción total del prototipo (Ver Ilustración 2.3.29 Ilustración 2.3.30).

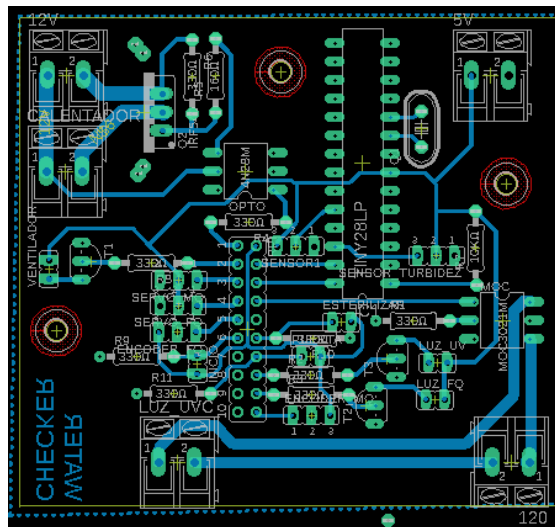


Ilustración 2.3.29. Diseño PCB de todas las fases del prototipo.

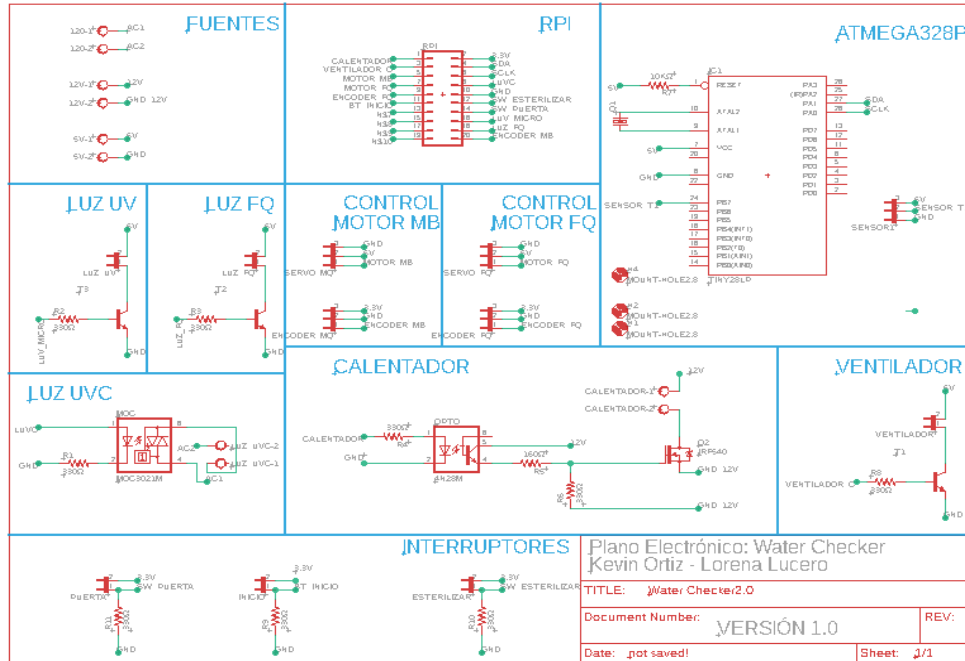


Ilustración 2.3.30. Diseño SCH de todas las fases del prototipo

2.4 ESTRUCTURACIÓN DE COMPONENTES LÓGICOS

Para verificar el estado de la calidad de agua se comprueba el estado de las características físicas, químicas y microbiológicas puestas en estudio; con esto se comprueba si en efecto el sistema de suministro tiene un control pleno sobre cada una de las fases de potabilización y por lo tanto el agua puede ser consumida sin ningún riesgo.

Teniendo en cuenta las fases presentadas en la sección 2.3 (i.e., esterilización, llenado, dilución), las cuales deben ser llevadas a cabo primero para brindar las condiciones necesarias en la verificación de calidad.

2.4.1 Módulos y componentes

Los módulos y componentes que han sido estructurados para verificar el estado de la calidad de agua de consumo humano en el desarrollo del prototipo se han dividido en dos secciones: sección fisicoquímica (Ver Ilustración 2.4.31) y sección microbiología (Ver Ilustración 2.4.32); cada módulo y componente se encuentran desarrollados posteriormente en esta sección.

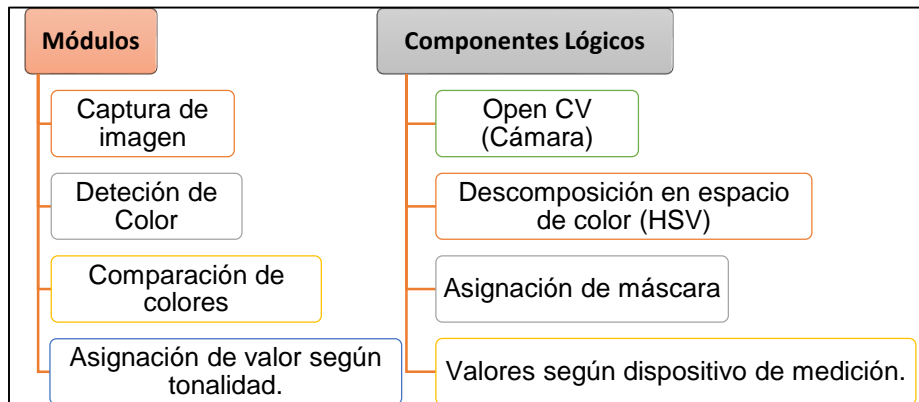


Ilustración 2.4.31. Módulos y componentes (Características Físicoquímicas)

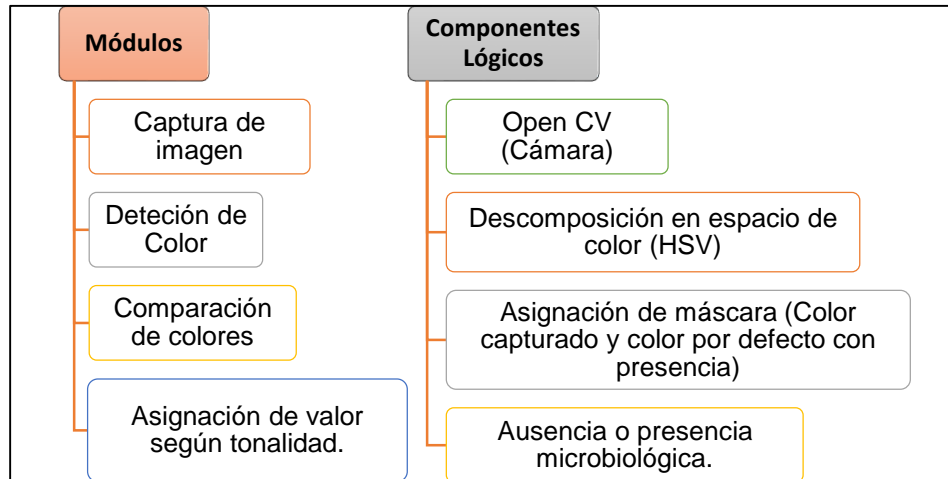


Ilustración 2.4.32. Módulos y componentes lógicos (Características microbiológicas)

2.4.1.1 Captura de imagen

Una imagen es la representación visual de una escena de la realidad en dos dimensiones; la visión artificial puede brindar información para el funcionamiento de un proceso o como resultado de uno. Para el prototipo serán necesarias las capturas de imagen en la comparación de colores de muestras con respecto a escalas de reactivos (i.e. características fisicoquímicas) y agar nutritivo (i.e. características microbiológicas).

➤ Características fisicoquímicas

La captura de imagen en la sección fisicoquímica se hace a través de una cámara web Genius (Ver Tabla 2.4.10).

Características
Color: Gris - Negro
Resolución de pantalla: 8MP
Marca: Genius
Enfoque manual
Pixeles: 640 X 480
Zoom Digital: 3X

Tabla 2.4.10. Características Cámara Web Genius

Por medio de la rotación de un servomotor 1, la plataforma móvil gira y detiene cada muestra frente a la cámara a la vez se enciende la iluminación artificial (i.e. led) por aproximadamente 15 segundos promedio, para crear un entorno controlado (Ver Ilustración 2.4.33), tiempo necesario para la captura de la imagen realizada por comando a través de OpenCV en Python, que se encarga de procesarla y asignarle un valor de acuerdo con su colorimetría.

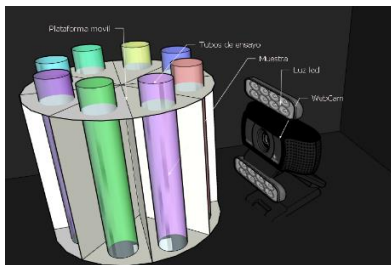


Ilustración 2.4.33. Captura de imagen (sección Físicoquímica). Fuente propia

➤ Características microbiológicas

La captura de imagen en la sección microbiológica se hace a través de una cámara web según especificaciones (Ver Tabla 2.4.11), para cada sección se usa cámaras de características diferentes únicamente por ser recursos ya disponibles.

Características
Color: Negro - Gris
Resolución de pantalla: 8MP
Marca: Genius
Enfoque: Automático
Píxeles: interpolación, 1280 x 1024, 1280 x 720, 640 x 480
Sensor de Imagen: HD720P / CMOS de 1,3 megapíxeles
Conector: USB 2.0

Tabla 2.4.11. Características Cámara Genius FACECAM 1020

Por medio de la rotación del servomotor 2, la plataforma móvil gira y detiene cada muestra bajo la cámara a la vez se enciende la iluminación artificial por aproximadamente 3 segundos (i.e. Luz ultravioleta tipo A) para crear un entorno controlado y que la muestra pueda verse en el color correspondiente (i.e. azul fosforescente) (Ver Ilustración 2.4.34), este proceso se realiza hasta que se detecta en alguna de las muestras Escherichia Coli.

El tiempo se considera oportuno para la captura de la imagen realizada por comando a través de OpenCV en Python, que se encarga de procesar y analizar cada imagen hasta la detección de *E coli*.

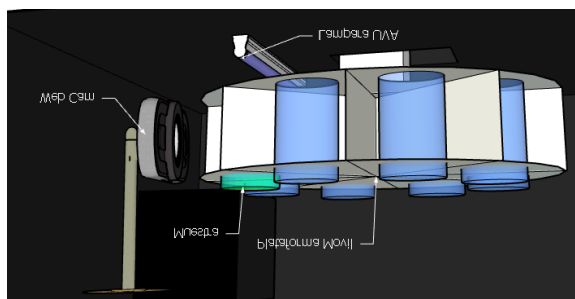


Ilustración 2.4.34. Captura de imagen (sección Microbiológica). Fuente propia

En la sección microbiológica existen 2 momentos de procesamiento de imagen:

- **Momento uno:** Este procesamiento de imagen se realiza 30 segundos luego de iniciar el proceso; es decir, luego del análisis de cloro residual y se realiza con el fin de comprobar una de las características físicas del agua (i.e. turbiedad), para lo cual se requiere de la comparación de dos cuadros de video streaming. El primer cuadro es el 220

luego de encendida la luz led y el segundo cuadro es el 300, de esta manera se detecta movimiento y conteo de las partículas en movimiento (Ver Ilustración 2.4.35).

```
1 Algoritmo V_Turbiedad
2 Si frame==220 Entonces
3     captura1←1
4     Si frame==300 Entonces
5         captura2←1
6         captura_Total← (captura1-captura2)
7         turbiedad←(captura_Total*(V_particula))
8     Fin Si
9 Fin Si
10 FinAlgoritmo
```

Ilustración 2.4.35. Pseudocódigo de la verificación de turbiedad.

- **Momento dos:** Esta captura se realiza con el objetivo de comprobar la ausencia o presencia de Coliformes totales y *Escherichia Coli*, donde primero se compara la captura del momento dos con respecto a una máscara de rangos fluorescentes para comprobar presencia de *Escherichia Coli*. En caso de comprobar presencia de *Escherichia Coli* es correcto afirmar que también se comprueba presencia de Coliformes totales; por el contrario, si se comprueba la ausencia de *Escherichia Coli*, se procede a comparar esta imagen con una máscara de tonos fucsia con el fin de comprobar ausencia o presencia de Coliformes Totales. Este proceso se realiza durante las siguientes 24 horas en intervalos de 1 hora.

2.4.1.2 Detección de color por visión artificial

➤ Iluminación artificial (Sección fisicoquímica)

Dentro de la visión artificial o visión por computadora es necesario tener un entorno controlado para la captura de imágenes, principalmente la iluminación ya que de esto va a depender la calidad, bajo contraste, reflexiones especulares, sombras y destellos, esto a su vez garantiza una imagen adecuada para el procesamiento.

Para obtener una imagen adecuada es necesario la elección de la iluminación que mejor se adapte a los píxeles de la región de interés; es decir, que estos píxeles presenten una luminosidad parecida y se diferencien mucho de los píxeles que no representan la región de interés[36].

- **Tipo de iluminación:** De los tipos de iluminación artificial (i.e. incandescentes, Fluorescentes, Led, Laser, Fibra óptica)[36] por cuestiones de costos y la posibilidad de encender y apagar solamente en el tiempo de captura de la imagen se adecua luz Led para la sección fisicoquímica (Ver Ilustración 2.4.36)
- **Técnicas de iluminación:** En ésta sección, luego de realizar pruebas (e.g ubicación de luz, intensidad), se concluye que la técnica más óptima es la combinación de dos técnicas de iluminación; estas son: iluminación difusa y de anillo.

La iluminación difusa presentó una reducción de sombras y de brillo a través de una iluminación suave, esta se logra por medio del cubrimiento de la luz led con papel parafinado, utilizado como filtro de luz para la iluminación de anillo, en esta última técnica que fue modificada a dos líneas de luz led paralelas en la que la cámara se encuentra en el centro (Ver Ilustración 2.4.36), la luz es direccional con ángulo de incidencia en la misma dirección que el eje de la cámara 1 [36].

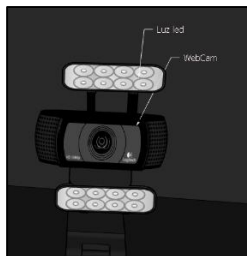


Ilustración 2.4.36. Iluminación (Sección fisicoquímica). Fuente propia

➤ Iluminación artificial (Sección microbiológica)

Anteriormente se menciona la importancia dentro de la visión artificial el control del entorno en la captura de la imagen, en este caso para la sección microbiológica a pesar de que el procedimiento es similar el entorno será controlarlo de diferente manera.

- **Tipo de iluminación:** En esta sección, de los tipos de iluminación artificial [36] es necesario utilizar dos tipos de iluminación, iluminación fluorescente para la detección microbiológica e iluminación led para la verificación de turbiedad, la iluminación led es necesaria para la visualización de partículas en movimiento. Por su parte, el procedimiento de iluminación fluorescente obedece a una reacción química producida por el agar nutritivo o sustrato definido enzimático en la muestra, originando un compuesto fluorescente cuando es expuesto a una fuente luminosa de luz ultravioleta[37], por lo cual el fabricante predetermina el tipo de iluminación para reconocer la presencia o ausencia de Escherichia Coli.

Por medio de diferentes pruebas y utilizando la incidencia de luz como medidor, se concluye que el mismo tipo de iluminación es útil para reconocer la presencia o ausencia de Coliformes por medio de procesamiento digital de imagen (Ver Ilustración 2.4.37 y Ilustración 2.4.38).

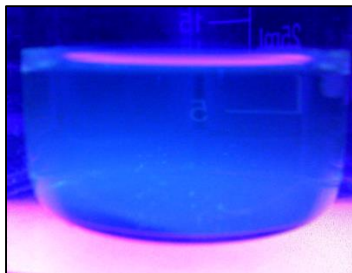


Ilustración 2.4.37. Vista de muestra microbiológica con ausencia de Coliformes totales.

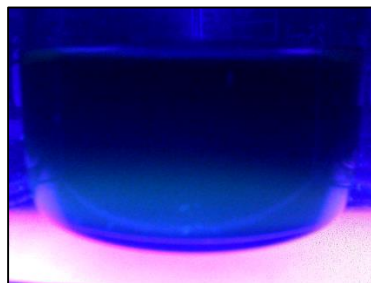


Ilustración 2.4.38. Vista de muestra microbiológica con presencia de Coliformes totales

- **Técnica de iluminación:** Para la visualización correcta de la cámara 2 la técnica de iluminación utilizada es lateral respecto a la cámara y back light o contra luz respecto al objeto, esto quiere decir que el objeto a inspeccionar (i.e. la muestra), se sitúa sobre la fuente de luz y la cámara en un ángulo de 90° respecto a la fuente de luz (Ver Ilustración 2.4.39); además, esta técnica de iluminación hace parte del procedimiento especificado por el fabricante del agar nutritivo colitag[37].

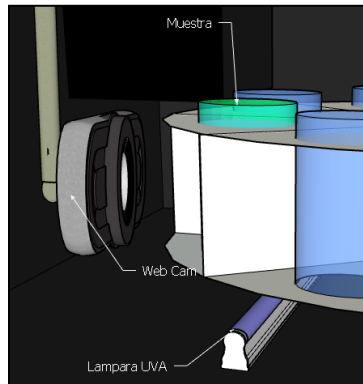


Ilustración 2.4.39. Técnica de iluminación lateral. Fuente propia.

Espacio de Color RGB

El color es una característica por medio de la cual se puede identificar y clasificar objetos. Para el procesamiento de imágenes por computador o visión artificial, es necesario el uso de espacios de color, que son conjuntos de fórmulas matemáticas por medio de los cuales se describen los colores y se descomponen en distintos canales (e.g. RGB, HSV, HSL) [36].

En el espacio de color RGB se varía las cantidades de los colores primarios (Red, Green, Blue), por medio de los cuales se pueden obtener una cantidad considerable de colores por mezcla o suma aritmética de los canales (Ver Ilustración 2.4.40).

$$X = R + G + B$$

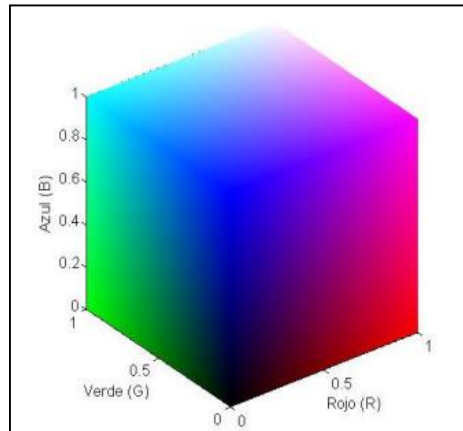


Ilustración 2.4.40. Espacio de color RGB. Ilustración extraída de [36].

RGB es el espacio básico y más común de colores tridimensionales; los archivos digitales de imagen suelen especificar un espacio de color determinado en el cual deben reproducirse si se quiere tener en cuenta la limitación de su gama de colores, el espacio de color habitual o estándar es RGB.

Sin embargo, para el procesamiento digital de imagen en el prototipo fue necesario la conversión de espacio de color RGB a HSV, esto se determinó luego de probar ambos espacios de colores.

- **HSV (Hue, Saturation, Value – Matiz, Saturación, Valor):** Este espacio de color tridimensional (Ver Ilustración 2.4.41) presenta algunas ventajas como la poca perturbación frente al brillo, ventaja principal ya que se busca que el espacio donde se realiza la captura sea totalmente controlado, principalmente la iluminación, usando

técnicas y tipos de iluminación; usando HSV el brillo de la captura no influye de gran manera en el procesamiento por lo que es considerado un complemento al control del entorno.

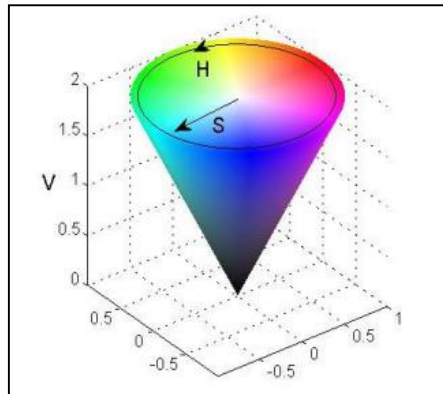


Ilustración 2.4.41. Espacio de Color HSV. Ilustración extraída [36].

Luego de capturada la imagen, el procedimiento para la detección de color empieza por el llamado por comando de la imagen capturada y se selecciona un rango de interés (en terminología inglesa Region Of Interest – ROI) en la imagen. La muestra problema luego de la dilución es homogénea por lo que se escoge la región de interés donde se considera que la captura es de mejor calidad (Ver Ilustración 2.4.42).



Ilustración 2.4.42. ROI de muestra con pH 4.5

2.4.1.3 Comparación de colores

➤ Sección fisicoquímica

Luego de ubicar la región de interés que es ahora una matriz de píxeles de tamaño 10x10, se procede con la descomposición del color de cada píxel en los 3 canales de HSV; a continuación, se umbraliza y se obtiene la ROI como imagen binaria utilizando como valor de corte cada rango establecido en cada una de las máscaras determinadas en la calibración del prototipo para cada parámetro y color (e.g. pH) (Ver Ilustración 2.4.43) de manera que todos aquellos píxeles que tengan un valor fuera de los rangos de corte se convertirán en 0 con color negro y los que estén dentro del rango de corte se convertirán en 255 con color blanco.



Ilustración 2.4.43. Escala de color de pH (HACH). Ilustración extraída de [38]

➤ Sección microbiológica

En la sección microbiológica se realiza dos tipos de comparaciones, además para cada imagen capturada se toma una matriz en la sección central llamada región de interés (Ver Ilustración 2.4.44) y se descompone en los 3 canales del espacio de color HSV.

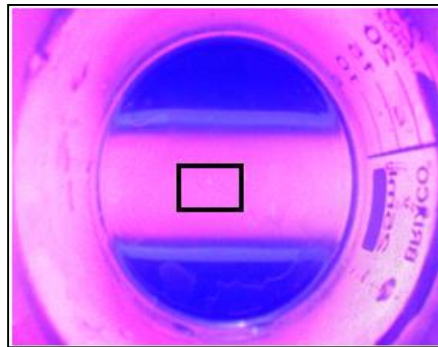


Ilustración 2.4.44. Ubicación de la ROI de la sección microbiológica.

Para la detección de *Escherichia Coli* se ha predeterminado los rangos de una máscara fluorescente la cual se compara con la ROI de la imagen capturada en el momento 2, este proceso es similar al de la comparación en la sección fisicoquímica.

Por su parte, la comparación que se realiza para la detección de Coliformes Totales en caso de ausencia de *Escherichia Coli* se hace con respecto a la cantidad de incidencia de luz reflejada en la descomposición de los tres canales de HSV en la captura del momento 1 comparado con la incidencia de luz de la captura de imagen del momento 2.

2.4.1.4 Asignación de valor

➤ Sección fisicoquímica

Teniendo en cuenta los anteriores módulos y componentes, al verificar el color en el que se encuentra la muestra y contrastarlo con la escala de colores diseñada por los fabricantes (i.e. Macherey Nagel, HACH) el sistema le asigna a cada parámetro el valor correspondiente del color detectado de acuerdo con las tablas o discos de color (Ver Ilustración 15).

El sistema realiza la asignación por medio de la comparación de la región de interés con cada una de las máscaras asignadas a los parámetros, donde una vez binarizada la imagen (i.e. región de interés) (Ver Ilustración 2.4.45) se procede a realizar un conteo de los píxeles que pertenezcan a cada una de las máscara (i.e. píxeles blancos) por lo que de esta manera se deduce el número de píxeles que coinciden en cada rango y se escogerá la máscara en la que

coincidan el mayor número de píxeles, de esta manera se le asignará el número determinado por el disco de color cuyo valor ya fue asignado en la máscara.

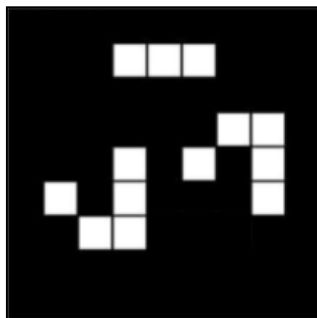


Ilustración 2.4.45. Ejemplo de Imagen binarizada

Por ejemplo pH, si el sistema al detectar y comparar ubica un número mayor de píxeles en la máscara asignada al color verde limón (Ver Ilustración 2.4.46) entonces, se le asigna ese valor de pH, que para efectos del ejemplo es 6.5.

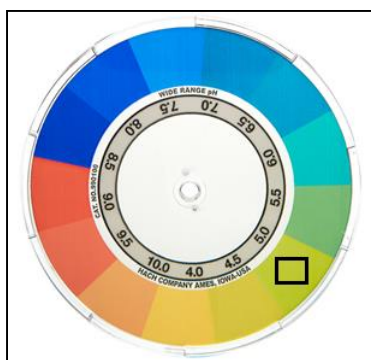


Ilustración 2.4.46. Ejemplo de pH 6.5

A continuación, se presenta un pseudocódigo a manera de resumen de la asignación de valor para la verificación de calidad de agua de las características fisicoquímicas (Ver Ilustración 2.4.47).

```
1  Algoritmo Valor_Fisicoquímicas
2      Si Ubicación_ROI==1 Entonces
3          Para Máscara =1 Hasta X Con Paso [paso] Hacer
4              Si ROI == Máscara Entonces
5                  característica←Valor_Asignado
6              SiNo
7                  Análisis←no_valido
8              Fin Si
9          Fin Para
10     Fin Si
11 FinAlgoritmo
```

Ilustración 2.4.47. Pseudocódigo del proceso de asignación de Valor (Características fisicoquímicas).

➤ Determinación de Ausencia o Presencia (Sección Microbiológica)

En la sección microbiológica por su parte, al pasar por los procesos de detección en la comparación de colores se realiza la determinación de ausencia o presencia tanto de Coliformes Totales como de *Escherichia Coli* (Ver Ilustración 2.4.48). Para la asignación de valor de turbiedad (Ver Ilustración 2.4.35).

```
1  Algoritmo AP_Microbiológicas
2  Si Foto_momento1 == 1 ^^ tiempo == tiempo_establecido Entonces
3  Foto_momento2 ← 1
4  Si ROI_Foto_momento2 == Fluorescente Entonces
5  Asignación_valor1 ← Presencia_ColiformesTotales
6  Asignación_valor2 ← Presencia_EscherichiaColi
7  SiNo
8  Si ROI_Foto_momento1 == ROI_Foto_momento2 Entonces
9  Asignación_valor1 ← Ausencia_ColiformesTotales
10 Asignación_valor2 ← Ausencia_EscherichiaColi
11 SiNo
12 Asignación_valor1 ← Presencia_ColiformesTotales
13 Asignación_valor2 ← Ausencia_EscherichiaColi
14 Fin Si
15
16 Fin Si
17 Fin Si
18 FinAlgoritmo
```

Ilustración 2.4.48. Pseudocódigo del proceso de determinación de ausencia o presencia de parámetros microbiológicos.

2.5 ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS DE CARACTERÍSTICAS MEDIDAS

Los datos serán almacenados en el prototipo únicamente durante el proceso; es decir, hasta el momento en que se muestran o envían los valores de las características y el indicador IRCA al usuario.

La estructura de almacenamiento será de cada variable en un archivo (i.e. RESULTADOS.txt) creado en la raíz del código principal donde se van almacenando de acuerdo con el tiempo de procesamiento, el cual está determinado por el tiempo de medición de cada característica; a continuación, los datos se envían mediante correo electrónico al finalizar el proceso de verificación al usuario, la finalización del proceso se da cuando se cumple una de 2 condiciones, que el prototipo logre la detección de *Escherichia Coli* o haya transcurrido 24 horas desde el inicio del análisis (Ver Ilustración 2.5.49 y Ilustración 2.5.50).

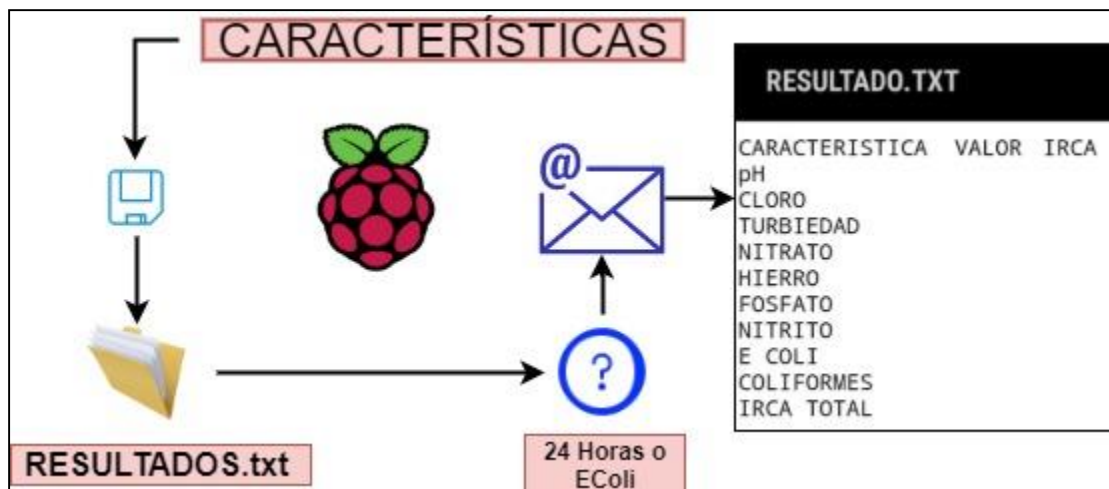


Ilustración 2.5.49. Almacenamiento y envío de datos.

```

1  Algoritmo ALMACENAMIENTO_ENVIO
2      Si Analisis_caractersticaX == Realizado Entonces
3          RESULTADOS.txt ← valor_caracteristicaX
4          RESULTADOS.txt ← Valor_IRCAcarateristicaX
5          Si tiempo==24 o ECOLI==presencia Entonces
6              Envio_email ← 1
7          Fin Si
8      Fin Si
9  FinAlgoritmo
    
```

Ilustración 2.5.50. Pseudocódigo de almacenamiento y envío de datos.

2.5.1 SMTP (Simple Mail Transfer Protocol, O Protocolo Simple De Transferencia De Correo)

Para el envío de los datos almacenados en el archivo «RESULTADOS.txt» es necesario usar un protocolo de comunicación entre la Raspberry y el servidor de correo electrónico, donde a través de SMTP permite el envío de correos electrónicos a los diferentes servidores (e.g. Gmail, Hotmail).

Por su parte, Python proporciona una librería «smtplib» la cual define un objeto cliente SMTP que es utilizado para enviar correos electrónicos al dispositivo y dirección de interés.

2.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO

Los materiales usados para la elaboración de la estructura física del prototipo se pueden observar a continuación (Ver Tabla 2.6.12).

Elemento	Descripción
½ de lámina de acrílico transparente	90cm x 120 cm
Ángulos de aluminio	6m
Soportes de caucho	6 Unidades
Papel para recubrimiento	3 pliegos

Tabla 2.6.12. Elementos para la construcción de la estructura física del prototipo

2.6.1 Medidas

Las medidas de cada sección (i.e. fisicoquímica, microbiológica) se ajustan al tamaño de los recipientes y el espacio justo para los elementos necesarios (e.g cámara, lámparas), pesa aproximadamente 4 kilogramos con 6 soportes de caucho para mejorar estabilidad en el prototipo.

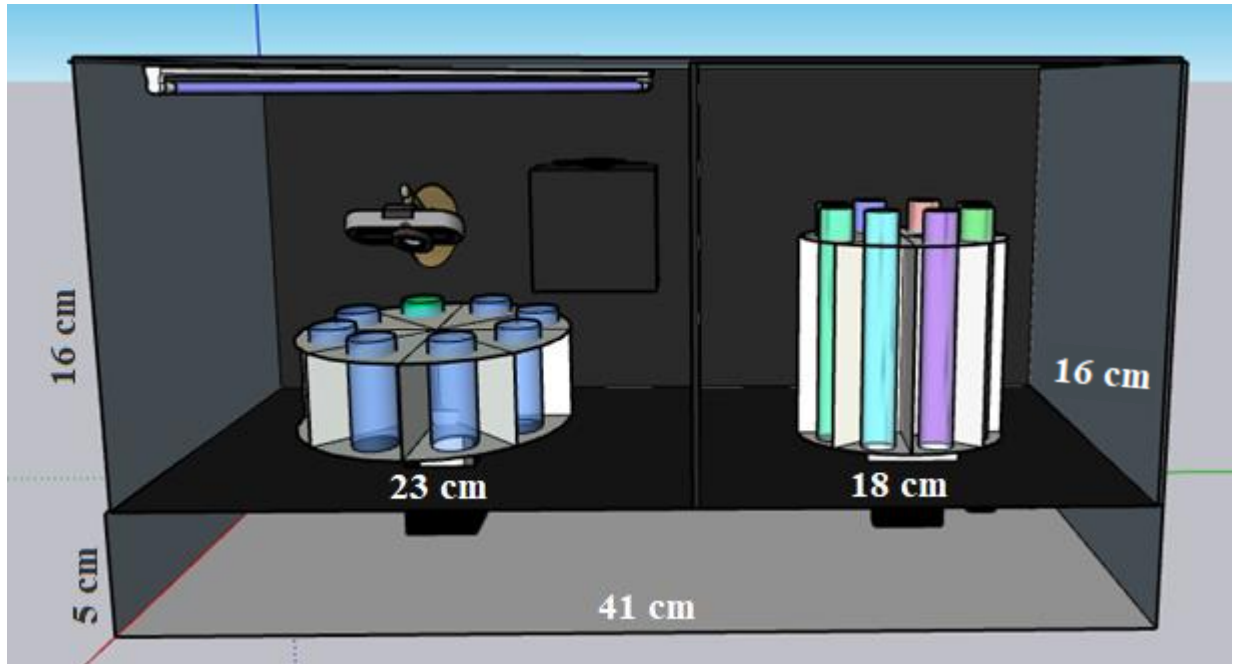


Ilustración 2.6.51. Diseño y medidas del prototipo.

La estructura fue dividida en dos secciones, esto con el fin de controlar el entorno tanto para la captura de imagen como para efectos del proceso (e.g. iluminación, crecimiento microbiológico).

2.6.2 Sección Físicoquímica

La sección físicoquímica cuenta con el espacio suficiente para la plataforma móvil o rotatoria y la cámara para la captura de imagen. La plataforma tiene un diámetro de 12 cm y está dividida en 7 compartimientos los cuales cuentan con perforaciones de 1.5 cm de diámetro para sujetar y separar un recipiente de otro (Ver Ilustración 2.6.52).

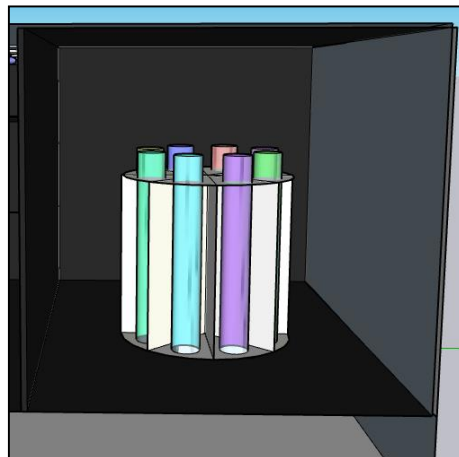


Ilustración 2.6.52. Diseño sección físicoquímica

2.6.3 Sección microbiológica

La sección microbiológica está diseñada con el espacio suficiente para los diferentes elementos (i.e. plataforma móvil, calentador, lámpara UVC, luz LED, lámpara UVA, cámara) (Ver Ilustración 2.6.53).

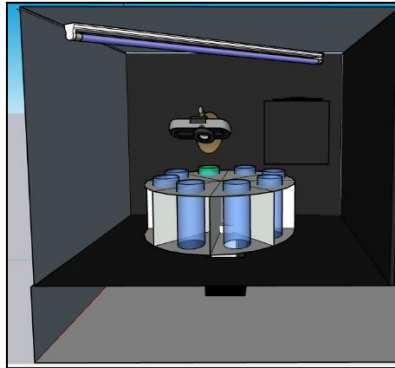


Ilustración 2.6.53. Diseño Sección microbiológica

2.6.3.1 Plataforma rotatoria

En una plataforma móvil de 17 centímetros de diámetro (Ver Ilustración 2.6.54) se ingresan las muestras microbiológicas; está dividida en compartimentos los cuales cuentan con perforaciones de 3.7 cm de diámetro para sujetar y separar un recipiente de otro.

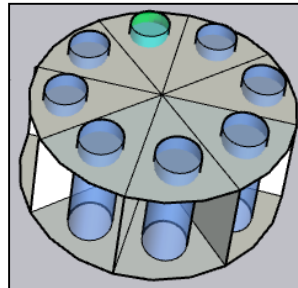


Ilustración 2.6.54. Plataforma para las muestras microbiológicas

2.6.3.2 Calentador

El calentador cuenta con una caja protectora, un ventilador de distribución de calor y una resistencia para generar temperaturas altas. La ubicación y dirección se debe principalmente a que se tiene en cuenta la presión atmosférica del aire caliente, donde al caer al suelo gracias a su peso sube y de esta manera se distribuye uniformemente en el resto de la sección microbiológica (Ver Ilustración 2.6.55).

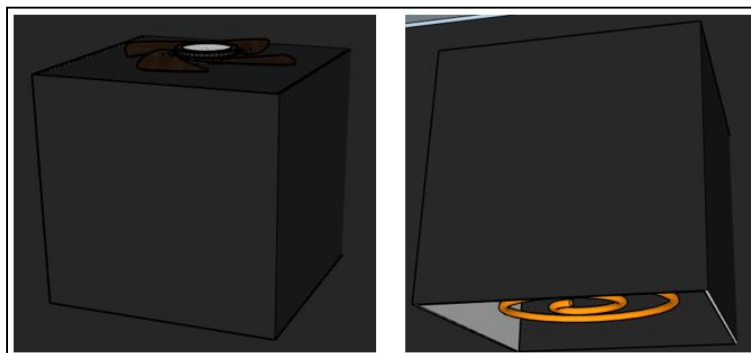


Ilustración 2.6.55. Vista superior e inferior del calentador.

2.7 COMPONENTES TECNOLÓGICOS

Los componentes tecnológicos fueron seleccionados de acuerdo con la necesidad en el desarrollo de cada fase. A continuación, se presenta un resumen de los componentes tanto de hardware como software (Ver Tabla 2.7.13).

Componentes tecnológicos		
Componente	Descripción	Características
Hardware		
Raspberry	Raspberry Pi 4 Model B de 2GB, es un miniordenador de bajo coste y tamaño reducido, utiliza un sistema de instrucciones realmente simple lo que le permite ejecutar tareas con un mínimo consumo de energía.	<ul style="list-style-type: none"> • Broadcom BCM2711, SoC de 64 bits Cortex-A72 de cuatro núcleos (ARM v8) a 1,5 GHz • SDRAM LPDDR4-3200 de 2GB • 2.4 GHz y 5.0 GHz IEEE 802.11ac inalámbrica, Bluetooth 5.0, BLE • Gigabit Ethernet • 2 puertos USB 3.0; 2 puertos USB 2.0. • Cabecera GPIO estándar de 40 pines Raspberry Pi (totalmente compatible con las placas anteriores) • 2 × puertos micro-HDMI (hasta 4kp60 compatible) • Puerto de pantalla MIPI DSI de 2 carriles • Puerto de cámara MIPI CSI de 2 carriles • Puerto de video compuesto y audio estéreo de 4 polos • H.265 (decodificación 4kp60), H264 (decodificación 1080p60, codificación 1080p30) • Gráficos OpenGL ES 3.0 • Ranura para tarjeta micro-SD para cargar el sistema operativo y el almacenamiento de datos • 5 V CC a través del conector USB-C (mínimo 3 A *) • 5 V CC a través del encabezado GPIO (mínimo 3 A *) • Power over Ethernet (PoE) habilitado (requiere PoE HAT separado) • Temperatura de funcionamiento: 0 - 50 grados C ambiente[39]
Luz UVC	La luz Ultra Violeta tipo C, tiene una longitud de onda entre 200nm y 280nm, la principal característica de este tipo de luz es su efecto biocida especialmente en la línea espectral de 254nm donde se concentra una mayor cantidad de energía.[30]	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Fluorescente, Mercurio y construidas en cuarzo • Longitud de onda: 254 nm UVC • Presión: Baja presión • Medidas: 24 cm de largo (Balasto incluido), 23 mm de Diámetro OD, 20 mm de diámetro ID • Potencia: 6 Watt • Flujo luminoso: 640 Lm
Luz UVA	La luz Ultra Violeta tipo A, tiene una longitud de onda entre 315 y 400nm.	Tipo: A (onda larga) Potencia: 4W Medidas: 5V
Cámaras web	Cámaras que conectadas a un ordenador puede capturar imágenes.	<ul style="list-style-type: none"> • Color: Negro - Gris • Resolución de pantalla: 8MP • Marca: Genius

- Enfoque: Automático - manual
- Píxeles: interpolación, 1280 x 1024, 1280 x 720, 640 x 480
- Sensor de Imagen: HD720P / CMOS de 1,3 megapíxeles
- Conector: USB 2.0

Servomotores	Motores de movimiento que permiten el giro continuo de las plataformas móviles.	<p>Tipo: 360 grados</p> <p>Dimensión: 5.4 cm x 4.4 cm x 2.0 cm.</p> <p>Torque: (4.8V):5.5kg/cm</p> <p>Voltage de operación: 4.8-6V.</p> <p>Rango de temperatura: 0-60C.</p> <p>Peso: 38g.</p>
Luz led	Un arreglo de leds para la iluminación en la captura de imagen.	<p>Color: Blanco</p> <p>Voltaje: 5V</p> <p>Corriente: 400mA</p>
Resistencia calefacción	de Resistencia para generar calor en la sección microbiológica y facilitar la proliferación de las bacterias.	<p>Corriente: 6.5A</p> <p>Voltaje: 12V</p>
Sensor de temperatura	Sensor de precisión para monitorear la temperatura real de la sección microbiológica.	<p>Sensor: LM35</p> <p>Voltaje:</p> <p>Corriente:</p>
Codificador Rotatorio / Sensor encoder	Permite el control de posición de los servomotores.	<p>Sensor Encoder Velocidad Herradura Lm393 Para Arduino</p> <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de trabajo: 3.3V-5V • Salida: Digital 0 y 1 • Anchura de la ranura: 5mm • Encoder: 20 pulsos por RPM • Comparador de voltaje: LM393 • Peso: 3g • Dimensiones: 32x14x11mm • Pulsos por vuelta: 20
Atmega328p	El ATmega328p es un chip microcontrolador creado por Atmel y pertenece a la serie megaAVR	Microcontroladores serie AVR IC 8 bits 16MHz 32KB (16K x 16) Memoria flash 28-PDIP.
Switch/Pulsador	Un pulsador funciona como switch pero dejando pasar corriente momentáneamente, es decir, mientras se tenga oprimido.	Dos tipos de pulsadores, de botón y de palanca y un interruptor final de carrera con palanca

Fuentes (5V 12V 120V) Las diferentes fuentes de alimentación distribuyen y energizan los dispositivos y elementos del prototipo.

Software		
Python	Lenguaje de programación	Sistema operativo Multiplataforma Información general Extensiones comunes: .py, .pyc, .pyd, .pyo, .pyw, .pyz
Open CV	Es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel.	OpenCV significa Open Computer Vision <ul style="list-style-type: none"> • Programado en: C++ • Desarrollador: Intel • Sistema operativo: GNU/Linux, Mac OS X, Microsoft Windows, Android • Lanzamiento: junio de 2000 • Lenguajes de programación: C++, C
SketchUP	Es un software de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones basado en caras.	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de programa: 3D modeling software • Sistema operativo: Windows, Mac OS X • Desarrollador: Trimble Navigation
Arduino	Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar.	Sistema operativo: Microsoft Windows; GNU/Linux; macOS Plataforma: AVR Tipo: Single-Board Computer (SBC) Procesador: Atmel AVR (8bit), ARM Cortex-M0+ (32-bit), ARM Cortex-M3 (32bit), Intel Quark (x86) (32-bit) Soporte: Placas de expansión (shields) Memoria: SRAM
Raspberry OS/Raspbian	Pi Raspberry Pi OS/ Raspbian es el sistema operativo recomendado para Raspberry Pi (al estar optimizado para su hardware) y se basa en una distribución de GNU/Linux llamada Debian.	El sistema operativo Raspberry Pi viene preinstalado con una gran cantidad de software para educación, programación y uso general. Tiene Python, Scratch, Sonic Pi, Java y más.
Bus de comunicación I2C	I2C basa la comunicación en la transmisión de señales por dos hilos denominados SCL y SDA. SCL es la línea por donde se transmite la señal de reloj del sistema. Se utiliza para sincronizar la transferencia de datos a través	La tasa de transmisión es de 100 kbps en el modo estándar (denominado inicialmente low-speed mode aunque posteriormente se omite este nombre), 400 kbps en el modo rápido (Fast-mode) y de 3.4 Mbps en el modo de alta velocidad (High-speed mode, o Hs-mode).

del bus. SDA es la línea por la que se transmite la señal de datos.

Tabla 2.7.13. Componentes tecnológicos (i.e. Hardware, Software)

2.8 CONSTRUCCIÓN FÍSICA DEL PROTOTIPO

Para la construcción del prototipo se tuvo en cuenta los materiales, adoptando un material resistente donde se logre conservar la temperatura en la sección microbiológica; en el tamaño por su parte, se logra unas dimensiones considerables, esto hace que mejore su portabilidad para desplazamientos.

2.8.1 Medidas y materiales

Se adoptaron dimensiones en el prototipo donde cada sección cuenta con el espacio necesario para realiza las mediciones de las características, de esta manera el prototipo se ajusta a un tamaño compacto sin que esto afecte el cumplimiento de su objetivo principal. El prototipo fue elaborado con ángulos de aluminio para la estructura y acrílico para su interior, se opta el uso de estos materiales debido a sus características de peso, resistencia a golpes y conservación de temperatura; el dispositivo tiene un peso aproximado de 4 kilos, la sección inferior de 5cm está diseñada para contener todo el material electrónico (i.e. Circuito impreso o PCB, cables, actuadores, Raspberry) (Ver Ilustración 2.8.56).



Ilustración 2.8.56. Dimensiones externas del prototipo.

2.8.2 Sección fisicoquímica

Esta sección posee el espacio necesario para el conjunto de elementos de verificación (i.e. plataforma rotatoria, cámara, motor, encoder, luz de iluminación); la plataforma posee cabinas para 7 muestras y tiene un diámetro de 12 cm, cada muestra posee un espacio de 9.5 cm de alto, 4.3 cm de ancho y 4 cm de fondo (Ver Ilustración 2.8.57 Ilustración 2.8.58).



Ilustración 2.8.57. Plataforma rotativa fisicoquímica.



Ilustración 2.8.58. Vista interna de la sección fisicoquímica

2.8.3 Sección microbiológica

Esta sección se construye teniendo en cuenta las necesidades (e.g. temperatura, iluminación) y componentes (i.e. calentador, cámara, lámparas Ultra Violeta, motor, encoder, sensor de temperatura, plataforma móvil, luz LED) para la verificación de las características microbiológicas y turbiedad (Ver Ilustración 2.8.59).



Ilustración 2.8.59. Vista interna de la sección microbiológica.

2.8.3.1 Plataforma rotatoria

La plataforma rotatoria posee medidas de 19 cm de diámetro y 3.5 cm de alto, fue diseñada para contener 8 muestras del cultivo microbiológico y 1 muestra para medición de turbiedad (Ver Ilustración 2.8.60).



Ilustración 2.8.60. Plataforma rotatoria de la sección microbiológica.

2.8.3.2 Calentador

El calentador es el sistema mediante el cual se va generar y mantener la temperatura necesaria para la aceleración de proliferación de las bacterias (i.e entre 35 y 37 °C); cuenta con un ventilador que hace circular el aire caliente dentro de toda la sección y una resistencia para generar calor (Ver Ilustración 2.8.61).



Ilustración 2.8.61. Calentador

3. CAPÍTULO 3

SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS PARA LA GENERACIÓN DEL IRCA

En este capítulo se presenta el procesamiento de los datos, es decir, luego de medir las características (capítulo 2) es necesario realizar un procesamiento para interpretar la información que estas mediciones pueden brindar, cuyo resultado final de la interpretación es el indicador IRCA (Ver Ilustración 3.1).

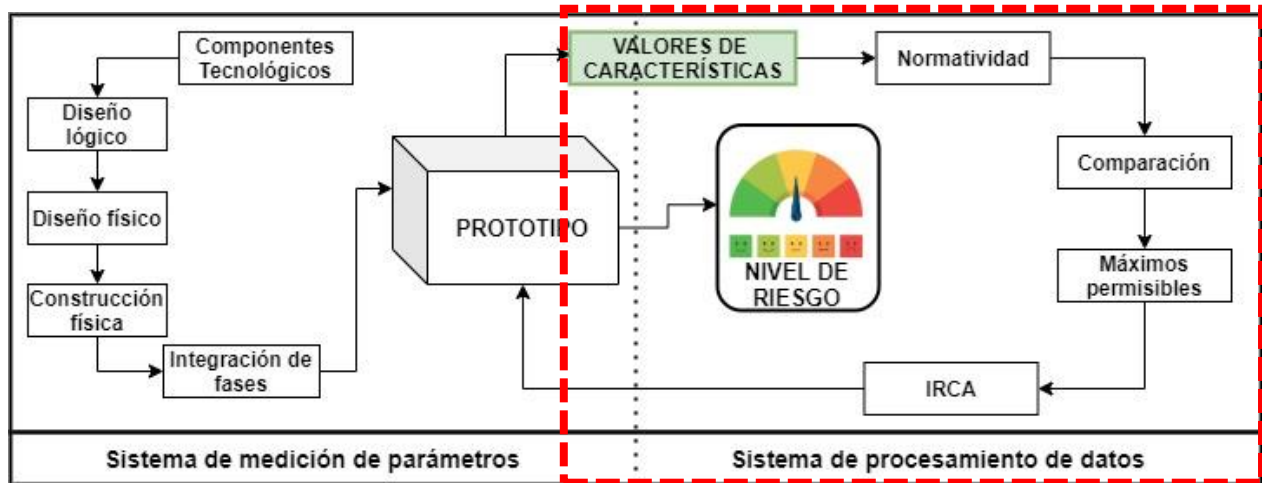


Ilustración 3.1. Fase 2: Sistema de procesamiento de datos.

3.1 PARAMETROS Y METODOS NORMATIVOS

Con miras en realizar la construcción del prototipo bajo el marco legal colombiano, específicamente bajo la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; a continuación, se realizará el contraste de cada característica y métodos con la normatividad Colombiana.

3.1.1 Parámetros

En la Resolución 2115, Capítulo 4, artículo 13 [8], se encuentran enlistadas 22 características en cumplimiento con el artículo 12 del Decreto 1575 de 2006, con su respectivo puntaje de riesgo para el cálculo del IRCA, se tendrán en cuenta 9 de las características establecidas, al ser consideradas de mayor impacto (Ver Tabla 3.1.1).

Características	
Escherichia Coli	pH
Hierro	Cloro residual libre
Color	Coliformes totales
Nitritos	Nitratos
Fosfato	

Tabla 3.1.1. Características seleccionadas de Resolución 2115

3.1.2 Métodos

El artículo 7 del decreto 1575 de 2006[7], enumera las responsabilidades del Instituto Nacional de Salud, entre ellas, decreta que establecerá los requisitos necesarios para la realización de la validación o revalidación de métodos analíticos, que se comercialicen en el mercado o nuevas tecnologías introducidas, solicitados por las entidades que lo

requieran. Estos métodos validados o revalidados por el Instituto Nacional de Salud serán adoptados por el Ministerio de la Protección Social mediante acto administrativo, los cuales serán publicados cuando así se proceda.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta la información de la identificación de parámetros, en la que el INS adoptaba para los análisis fisicoquímicos los Standard Methods se puede concluir que estos están basados en la normatividad internacional, por lo tanto para el análisis fisicoquímico en la construcción del prototipo se hará uso de los métodos de colorimetría visual, y fotométrico, gracias a la tecnología de procesamiento digital de imagen; sin embargo, el método estándar se definirá en la elaboración de las pruebas, ya que estos dependen del laboratorio que produce los reactivos con los que se realiza el análisis.

Por su parte, para el análisis microbiológico, en la Resolución 2115, capítulo III, artículo 11 [2] se presenta cuatro técnicas utilizadas (Ver Tabla 3.1.2), de las cuales se usará la técnica Presencia – Ausencia, medido en un tamaño de muestra de 100 cm³.

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	<i>Escherichia Coli</i>
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm ³	0 UFC/100 cm ³
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm ³	< de 1 microorganismo en 100 cm ³
Sustrato Definido	0 microorganismos en 100 cm ³	0 microorganismos en 100 cm ³
Presencia - Ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

Tabla 3.1.2. Técnicas de detección de características Microbiológicas

La determinación de *E.coli* y coliformes totales en el prototipo se realizará por medio del medio de cultivo COLITAG, el cual dictamina la presencia o la ausencia de estos, este método se encuentra amparado por el Ministerio de la Protección Social Resolución número 01303 de 2008 por la cual se adopta un método para análisis microbiológico de aguas para consumo humano validado por el Instituto Nacional de Salud, para la determinación simultánea de Coliformes totales y *Escherichia coli* en aguas para consumo humano de acuerdo a los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007 [15].

De acuerdo con las especificaciones, este medio de cultivo asegura condiciones óptimas para el desarrollo de los Coliformes e incluyen dos sustratos que serán degradados por las enzimas propias de los géneros conformantes de los Coliformes (i.e. *Escherichia*, *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*) y la *Escherichia Coli*. Los sustratos involucrados en la formulación son el orto-nitrofenil-β-D-galactopiranosido (ONPG) que permite que la enzima β-Galactosidasa presente en los Coliformes se exprese hidrolizando el sustrato y generando una coloración amarilla. El segundo sustrato 4-metil-umbeliferil-β-D-Glucuronido (4-MUG) permite la expresión de la enzima β-D-Glucuronidasa hidrolizando de igual manera el sustrato, produciendo un compuesto fluorescente cuando es expuesto a una fuente luminosa de luz ultravioleta de 366 nm [37].

3.2 MÁXIMOS PERMISIBLES NORMATIVOS.

La normatividad colombiana exige a los sistemas de suministro que las características de calidad de agua de consumo se encuentren dentro de los rangos o valores máximos permisibles, esto debido a que por cada característica fuera de los máximos permisibles aumenta el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades vehiculizadas por el agua (EVA), por lo que se le asignará un puntaje de riesgo (Ver *Tabla 2.1.1*)

La resolución 2115 del 2007 del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece en los artículos 2, 6 y 7 los máximos permisibles para las características que serán evaluadas en el prototipo (Ver *Tabla 3.2.3*).

Característica	Valor máximo permisible
Turbiedad	2
pH	Entre 6,5 y 9,0
Cloro Residual Libre	Entre 0,3 y 2,0 mg/L
Alcalinidad Total	200 (mg/L)
Calcio	60 (mg/L)
Dureza Total	300 (mg/L)
Nitratos	10 (mg/L)
Nitritos	0.1 (mg/L)
Coliformes Totales	Ausencia en 100 cm^3
Escherichia Coli	Ausencia en 100 cm^3

Tabla 3.2.3. Características de mayor impacto en la salud humana y máximo permisible normativo.

3.3 MECANISMO DE COMPARACIÓN DE LOS DATOS MEDIDOS CON MÁXIMOS PERMISIBLES

Una vez se obtiene los datos de la verificación del estado de la calidad de agua se procede a comparar cada uno de estos valores con los máximos permisibles establecidos en la resolución 2115 (Ver Tabla 3.2.3) para cada característica, con lo cual se comprueba si cada parámetro se encuentra dentro o fuera de los máximos permisibles (Ver Ilustración 3.3.2).

```

1  Algoritmo COMPARACIÓN
2      Si Caracteristica_X ≤ Máximo_normativo Entonces
3          ..... IRCA_X←0
4      SiNo
5          ..... IRCA_X← Puntaje_Riesgo
6      Fin Si
7  FinAlgoritmo
    
```

Ilustración 3.3.2. Pseudocódigo de la comparación de características con los máximos permisibles.

3.4 DISEÑO DEL INDICADOR IRCA

Cuando se realiza la comparación entre los datos verificados y los rangos de los máximos permisibles, por cada parámetro fuera de estos rangos de acuerdo con la resolución 2115 se le debe asignar un valor de riesgo según resolución (Ver Tabla 3.4.4) (Ver Ilustración 3.4.3).

Característica	Valor máximo permisible	Puntaje de riesgo
Turbiedad	<2 (NTU)	15
Ph	Entre 6,5 y 9,0	1.5
Cloro Residual Libre	Entre 0,3 y 2,0 mg/L	15
Nitratos	10 (mg/L)	1
Nitritos	0.1 (mg/L)	3
Fosfatos	0.5 (mg/L)	1

Hierro	0.3 (mg/L)	1.5
Coliformes Totales	Ausencia en 100 cm ³	15
Escherichia Coli	Ausencia en 100 cm ³	25
Total IRCA de características medidas		78

Tabla 3.4.4. Puntaje de riesgo de los parámetros verificados. Tabla creada a partir de [2]

El valor del IRCA es cero (0) puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas en la presente Resolución y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos [2].

3.4.1 MECANISMO DEL CÁLCULO DEL IRCA POR MUESTRA

Para realizar el cálculo del indicador IRCA se suma los puntajes de riesgo de cada característica que luego de la verificación y comparación se constató que se encuentran fuera de los máximos permisibles, y se divide entre la sumatoria de todos los puntajes de riesgo de las 9 características analizadas y esto multiplicado por 100 (Ver Ilustración 3.4.3), como se puede observar en la siguiente Ecuación.

$$IRCA(\%) = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a todas las características analizadas}} * 100 \quad (1)$$

```

1  Algoritmo CALCULO_IRCA
2  Para X←1 Hasta 9 Con Paso 1 Hacer
3  |
4  |     Si Caracteristica_X ≤ Máximo_normativo Entonces
5  | |     IRCA_X←0
6  | |     SiNo
7  | | |     IRCA_X← Puntaje_Riesgo
8  | | |     Total_IRCA← IRCA_X+Total_IRCA
9  | |     Fin Si
10 |     Fin Para
11 |     IRCA← (Total_IRCA/78)*100
12 FinAlgoritmo
    
```

Ilustración 3.4.3. Pseudocódigo del cálculo del IRCA total.

3.4.2 MECANISMO DE CLASIFICACIÓN DE RIESGO IRCA

De acuerdo con el puntaje IRCA el cual se calculó tomando del producto resultante de la verificación y comparación de la muestra con los máximos permisibles, tal como se puede ver en la ecuación anterior (Ecuación No (1)) y el proceso (Ver Ilustración 3.4.4) se clasifica la calidad del agua en niveles de riesgo (Ver Tabla 3.4.5) para posteriormente ser mostrado al usuario.

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo
80.1 -100	INVIABLE SANITARIA MENTE
35.1 – 80	ALTO

14.1 – 35	MEDIO
5.1 – 14	BAJO
0 – 5	SIN RIESGO

Tabla 3.4.5. Clasificación de nivel de riesgo IRCA. Creada a partir de [2]

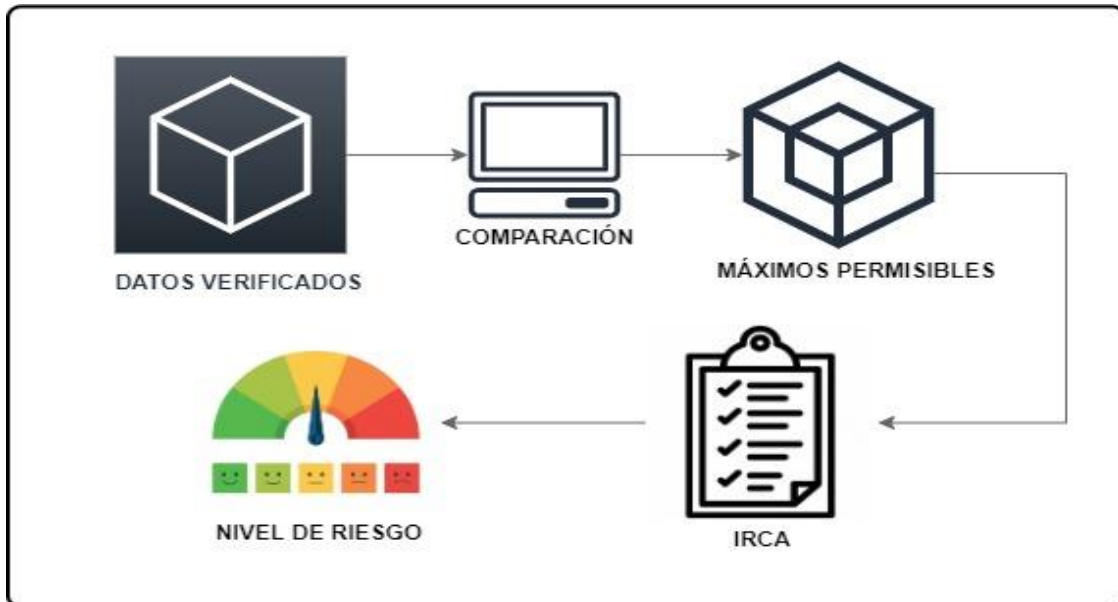


Ilustración 3.4.4. Proceso de creación de nivel de riesgo.

La Ilustración 3.4.4 da cuenta de todo el proceso que se realiza con los datos luego de su obtención a través del proceso de verificación, hasta presentar un nivel de riesgo IRCA, en cada uno de sus niveles.

Por lo tanto, la clasificación IRCA se realizará basando la lógica del código en la resolución 2115 (Ver Ilustración 3.4.5).

```

1  Algoritmo Clasificación_IRCA
2      Si (IRCA ≥ 80.1) ∧ (IRCA ≤ 100) Entonces
3          NIVEL_RIESGO = "Inviabile sanitariamente"
4      Fin Si
5      Si (IRCA ≥ 35.1) & (IRCA ≤ 80) Entonces
6          NIVEL_RIESGO = "Alto"
7      Fin Si
8      Si (IRCA ≥ 14.1) & (IRCA ≤ 35) Entonces
9          NIVEL_RIESGO = "Medio"
10     Fin Si
11     Si (IRCA ≥ 5.1) & (IRCA ≤ 14) Entonces
12         NIVEL_RIESGO = "Bajo"
13     Fin Si
14     Si (IRCA ≥ 0) & (IRCA ≤ 5) Entonces
15         NIVEL_RIESGO = "Sin Riesgo"
16     Fin Si
17 FinAlgoritmo
    
```

Ilustración 3.4.5. Pseudocódigo de la clasificación IRCA

4. CAPITULO 4 AJUSTES Y EVALUACIÓN

Este capítulo trata acerca de los ajustes o calibración necesarios para la medición de las características, además de los resultados de las pruebas realizadas al prototipo para validar su funcionamiento total y descripción del espacio y protocolo llevados a cabo en cada prueba.

4.1 PLAN DE AJUSTES

Dentro del desarrollo del prototipo y de acuerdo con el plan de trabajo se debe realizar calibración de las mediciones de cada característica, esto se realiza con base en métodos de medición y técnicas de modificación de muestras. Para lo cual se ha dispuesto un plan de trabajo a fin con las fases de desarrollo (Ver Tabla 4.1.1).

Fase de ajustes	Tiempo	Descripción	Recursos
Act 1. Reconocimiento de Reactivos y escalas de colores.	2 Horas	Observar los reactivos con los que cuenta el laboratorio y parámetros que se miden en la calidad de agua para consumo humano por colorimetría.	Reactivos, escala de colores.
Act 2. Comprobación de tiempo para la dilución y reposo de las muestras.	2 horas	Pruebas de tiempo de dilución de sustrato definido enzimático, pruebas de reposo en tubos de ensayo de 10ml en el prototipo.	Reactivos seleccionados de acuerdo a la Act 1.
Act 3. Calibración de rangos de colores de parámetros fisicoquímicos en el prototipo.	7 horas por característica.	Realizar pruebas con reactivos para cada característica en todos sus rangos.	Reactivos seleccionados de acuerdo con la Act 1.
Act 4. Verificación de colores (parámetros microbiológicos)	2 hora:1er día 1 hora : 2do día	Prueba de análisis microbiológico en muestras de agua para toma fotográfica.	Agar nutritivo y demás recursos necesarios para la prueba microbiológica.
Act 5. Calibración de rangos de colores de parámetros microbiológicos en el prototipo.	7 Horas por característica.	Realizar pruebas con Colitag para detección de Coliformes Totales y Escherichia Coli.	Agar nutritivo y demás recursos necesarios para la prueba microbiológica.

Tabla 4.1.1. Plan de ajustes del prototipo.

4.1.1 Reconocimiento de espacio y materiales

El reconocimiento de espacios y materiales se realiza en el laboratorio de química de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, el cual cuenta con los siguientes elementos para los análisis por colorimetría tanto fisicoquímico como microbiológico (Ver Tabla 4.1.2).

ELEMENTOS			
REACTIVO	CARACTERISTICA	EMPRESA	METODO
Indicator Solution pH Cat. 2329332	pH	HACH	
NO ₃ -1 / NO ₃ -2	Nitrato	Macherey-Nagel	VISOCOLOR - 541
NO ₂ -1 / NO ₂ -2	Nitritos	Macherey-Nagel	VISOCOLOR - 544

Fe-1 / Fe-2	Hierro	Macherey-Nagel	VISOCOLOR - 526
	Fosfato	Macherey-Nagel	
Cl-1 / Cl2	Cloro residual libre	Macherey-Nagel	VISOCOLOR - 515
Colitag MPNplate	Escherichia Coli –Coliformes totales	Environmental express	Standard Method 9221 (SM9221)B & SM9222 G

OTROS ELEMENTOS

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	EMPRESA
Fotómetro	PF-12PLUS	Macherey - Nagel
Probetas	100ml	Brixco
Balanza semi analítica	Traveler TA1501	OHSUS CORPORATION
Tubo de ensayo	---	Macherey – Nagel / HACH
Vasos de precipitado (Beakers)	250ml / 300ml / 400ml	PHYSIS
Discos de color	pH, Cloro, Color, Fosfato	Macherey - Nagel
Caja comparadora	---	HACH
Tiras indicadoras de pH	pH indicator strips	McolorpHast
Otros reactivos	Ammonium, sulfato ferroso, acido de sodio.	---
Incubadora o nevera	RI-53 UL	RED LINE
Lámpara 365nm	UVP UVL-56	Analytik Jena
Recipientes microbiológicos	---	MPNplate
Agua destilada	---	---
Tubos de medición	---	Macherey – Nagel / HACH
Gafas de protección	---	Analytik Jena
Turbidímetro	2100Q	HACH
Vidrio reloj	---	OHSUS CORPORATION
Cinta indicadora de esterilización	---	---
Autoclave esterilizadora	SA-232	GEMMY
Pipeta	1ml	Silber Brand
Pro pipeta	---	Silber Brand
Cuchara medidora	---	OHSUS CORPORATION
Jeringas	3ml, 5ml y 10ml	Dispocol

Tabla 4.1.2. Elementos necesarios para la calibración del prototipo.

4.1.2 Prueba e identificación de tiempo de dilución y reposo

En la identificación del tiempo de dilución y de reposo es necesario contar con la información de los manuales de cada uno de los reactivos, ya que la reacción para la precisión en la medición depende de factores como el tiempo para dilución y reposo (Ver Tabla 4.1.3).

Característica	Método	Tiempo de mezcla estimado	Tiempo de reposo
Nitratos	Visocolor 541	20 s	5 min
Nitritos	Visocolor 544	20 s	10 min
pH	No descrito	20 s	No aplica
Cloro Residual Libre	Visocolor 516 / Colorimetric DPD	20 s	1 min
Hierro	Visocolor 526	20 s	7 min
Fosfato	Método del ácido ascórbico PhosVer® 3 HACH 8048 - Visocolor 584	20 s	10 min
Turbiedad	EPA 180.1	10 s	40s

Tabla 4.1.3. Resumen de las características fisicoquímicas y tiempo de reposo.

4.1.3 CALIBRACIÓN DE COLORES DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS.

En la calibración de cada característica se usan métodos o técnicas diferentes para modificar las muestras; sin embargo, el mecanismo para identificar los rangos de colores es similar. Para la calibración de color se captura la imagen dentro de la sección fisicoquímica del prototipo, a continuación, se analiza cada píxel de la región de interés para encontrar los máximos y mínimos dentro del espacio de color HSV, se toma estos números como rangos en la creación de las máscaras. Este procedimiento se hace para cada color de cada característica para lo cual se deben modificar muestras para la variación de su valor.

Nota: La descripción del proceso detallado de calibración de cada característica se encuentra en el anexo A, donde se describe cada método estándar, cantidad de reactivos o sustancias necesarias para la alteración o modificación de las características, entre otras.

4.1.3.1 Métodos de medición colorimétrica

Los métodos de medición están dados de acuerdo con los métodos estándar implementados por la compañía de fabricación de los reactivos; por ejemplo, para el método Visocolor 516 implementado por la empresa Macherey Nagel en la medición de cloro residual libre, se realiza la medición por medio de un fotómetro PF-12 PLUS. En la calibración también son usados otros dispositivos o equipos de apoyo con los que cuenta el laboratorio (e.g. pH indicator strips, caja comparadora).

4.1.3.2 Técnicas de modificación

Con el fin de obtener variaciones en los valores de las características, especialmente ubicar los valores límites de los máximos permisibles según la normatividad (i.e. Resolución 2115) y observar su colorimetría, se decide modificar intencionalmente las muestras con reactivos o sustancias que pueden afectar la concentración de cada característica (e.g. Ammonium Nitrate para nitrito y nitrato).

4.1.3.3 Procedimiento de calibración

Se mide las características de una muestra de 5 ml agua destilada luego se crea soluciones agregando cantidades diferentes de reactivos o sustancias para la modificación de cada parámetro, si la medición es menor al máximo permisible se aumenta la cantidad de reactivo en la solución, por el contrario, si la medición es mayor al máximo permisible, se disminuye la cantidad de reactivo.

A continuación se presenta una tabla de resumen de las características de calibración de cada parámetro (Ver Tabla 4.1.4).

Características de calibración	Cloro Residual Libre	pH	Turbiedad	Nitrato	Nitrito	Fosfato	Hierro
Método	Visocolor ECO 516	No descrito	EPA 180.1	Visocolor ECO 541	Visocolor ECO 544	Visocolor ECO 584 - Hach 8048	Visocolor ECO 526
Reactivo o sustancia de modificación de muestra	Hipoclorito de sodio	Ácido nítrico – Cloruro de amonio	No aplica	Ammonium Nitrate for analysis	Ammonium Nitrate for análisis	Detergente en polvo	Sulfato ferroso
Rango permitido por la normatividad	0.3 - 2 mg/L Cl	6.5 – 9	2 UNT	10 mg/L NO ₃	0.1 mg/L NO ₂	0.5mg/L PO ₄ -P	0.3mg/L Fe
Equipo calibrador	PF 12PLUS	Caja comparadora	Turbidímetro	PF 12PLUS	PF 12PLUS	PF 12PLUS	0.04 – 1mg/L Fe
Rango de medición del equipo calibrador	0.05 - 2mg/L Cl	4 – 10	0,01 – 1.000 UNT	2 – 28 mg/L NO ₃	0.02 – 0.5 mg/L NO ₂	0.2 – 5 mg/L PO ₄ -P	0.04 – 0.32 mg/L Fe
Rango de calibración en el prototipo	0.2 - 2 mg/L Cl	4 – 9.5	0 - 5	2.2 – 11 mg/L NO ₃	0.03 – 0.122 mg/L NO ₂	<0.5 / =0.5 / >0.5 PO ₄ -P	

Tabla 4.1.4. Resumen de las características de calibración de los parámetros.

4.1.4 Verificación de colores de las características microbiológicas

De acuerdo con el manual del Colitag si una muestra contiene *Escherichia Coli*, su tinción a la exposición de luz UVA será de un color azul fluorescente (Ver Ilustración 4.1.1); si contiene Coliformes totales y ausencia de *Escherichia Coli*, la muestra se torna de color amarillo vista con luz normal y azul oscuro visto con la luz UVA (Ver Ilustración 4.1.2).

Paso 1:

Se realizan 2 prueba en el laboratorio, asegurando que una de las muestras se encuentre contaminada y otra completamente purificada, esto con el fin de comprobar la tinción de las muestras, sus diferencias (Ver Tabla 4.1.5) y observar el procedimiento que deberá ser llevado a cabo en el prototipo.

ANÁLISIS DE MUESTRAS INICIALES						
N°	Volumen	Lugar de toma de la muestra	Hora de toma de muestra	Hora de Análisis	Tiempo para toma de resultado (Horas)	Resultado
1	100ml	Agua residual (Hogar)	9:00 a.m.	9:30 a.m.	24	Presencia <i>Escherichia Coli</i> y Coliformes totales
2	100ml	Agua destilada	10:00 a.m.	10:15 a.m.	24	Ausencia <i>Escherichia Coli</i> y Coliformes totales

Tabla 4.1.5. Análisis microbiológico de muestras iniciales

Las diferencias entre los resultados de las muestras fueron visualmente notorias, los colores correspondieron a lo estipulado en el manual [37] y los resultados fueron los esperados; es decir, en la muestra N° 1 hubo presencia para *Escherichia Coli* y presencia para Coliformes totales; por su parte, la muestra N° 2 tuvo ausencia de *Escherichia Coli* y ausencia de Coliformes totales

Paso 2:

Una vez observado los resultados de los análisis de las muestras N° 1 y 2, los cuales sirven como base para la lógica en el procesamiento digital de imagen; se procede a realizar análisis en el prototipo con muestras tomadas en los mismos lugares (Ver Tabla 4.1.6), con el fin de obtener capturas de imagen con la cámara dispuesta en esa sección y abordar el procesamiento de manera óptima en el prototipo, de donde se toman mascarar iniciales de acuerdo con los rangos mínimos y máximos de cada toma.

ANÁLISIS DE MUESTRAS INICIALES						
N°	Volumen	Lugar de toma de la muestra	Hora de toma de muestra	Hora de Análisis	Tiempo para toma de resultado (Horas)	Resultado
3	100ml	Agua residual (Hogar)	8:00 a.m.	8:10 a.m.	7	Presencia <i>Escherichia Coli</i> y Coliformes totales
4	100ml	Agua destilada	9:00 a.m.	9:15 a.m.	24	Ausencia <i>Escherichia Coli</i> y Coliformes totales

Tabla 4.1.6. Análisis microbiológicos para creación de mascarar iniciales.

El análisis de estas muestras reveló la presencia y ausencia de *Escherichia Coli* y Coliformes Totales (Ver Ilustración 4.1.1, Ilustración 4.1.2, Ilustración 4.1.3). Estas capturas de imágenes se toman como base para crear las mascarar iniciales de detección en el procesamiento digital de imagen.

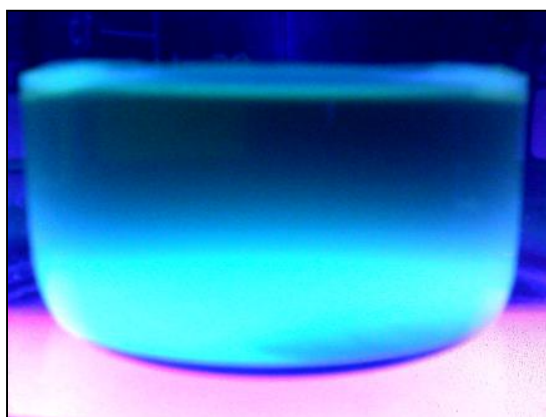


Ilustración 4.1.1. Imagen con presencia de *Escherichia Coli* y Coliformes totales

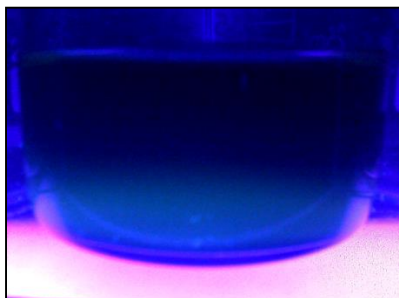


Ilustración 4.1.2. Presencia de Coliformes totales y ausencia de *Escherichia Coli*.

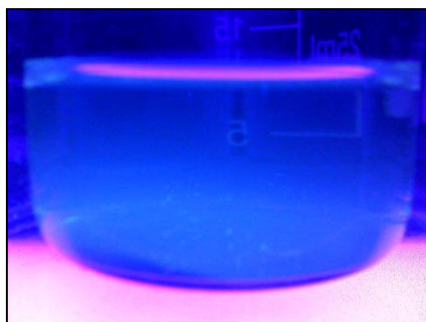


Ilustración 4.1.3. Imagen solo con agar Colitag.

Paso 3:

Con la creación de las máscaras iniciales, a continuación es necesario encontrar el tiempo mínimo de detección de *Escherichia Coli* y Coliformes totales y el rango mínimos de cada máscara de acuerdo con el tiempo mínimo de detección, por lo que se realiza un análisis microbiológico en el prototipo donde se realizará capturas de imagen en intervalos de tiempo (Ver Tabla 4.1.7), para efectos de toma de datos se asegura que la muestra esté contaminada.

ANÁLISIS DE MUESTRAS INICIALES						
N°	Volumen	Lugar de toma de la muestra	Hora de toma de muestra	Hora de Análisis	Tiempo para toma de resultado (Horas)	Resultado
5	100ml	Agua residual (Hogar)	8:00 a.m.	8:10 a.m.	5	Presencia <i>Escherichia Coli</i> y Coliformes totales
					7	Presencia <i>Escherichia Coli</i> y Coliformes totales

Tabla 4.1.7. Análisis microbiológico con monitoreo periódico.

4.1.5 Calibración de colores de las características microbiológicas

Con la verificación de los colores en los análisis microbiológicos se pudo crear máscaras de detección, el paso 3 permitió ampliar estos rangos y como consecuencia mermer el tiempo de detección.

4.1.5.1 Coliformes Totales

Los resultados arrojados en la verificación de colores, donde la muestra no presentaba *Escherichia Coli* ni Coliformes Totales (Ver Ilustración 4.1.5) se puede observar que la luz UVA atraviesa toda la muestra creando una capa superior color fucsia, por su parte la muestra donde hay presencia de Coliformes Totales y ausencia de *Escherichia Coli* no

presenta esta capa (Ver Ilustración 4.1.4), se procede a comprobar la máscara creada para descartar la existencia de la capa fucsia, es decir, la región de luz UVA que atravesaría en caso de ausencia de Coliformes Totales.

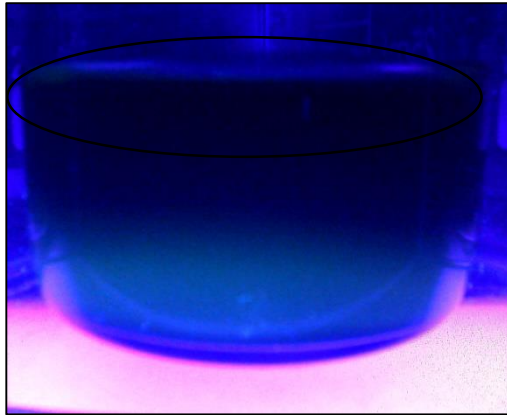


Ilustración 4.1.4. Región de capa superior en presencia de Coliformes Totales.

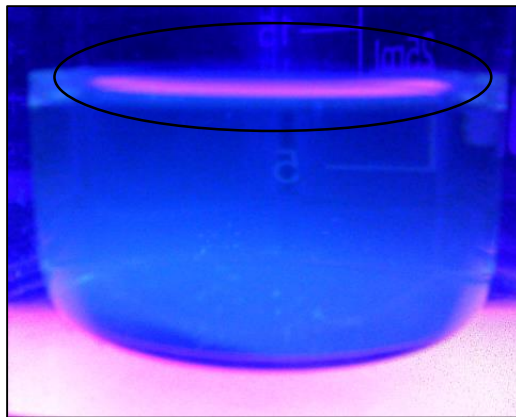


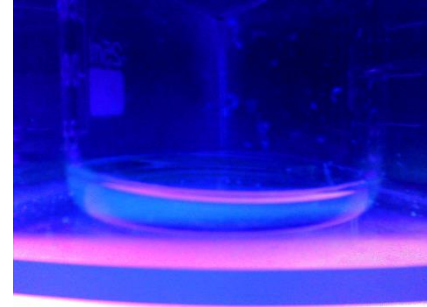
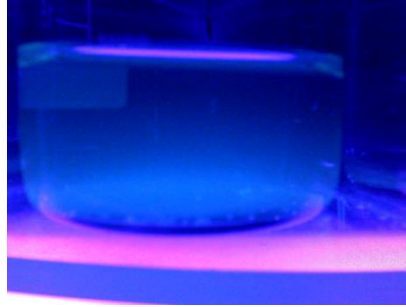
Ilustración 4.1.5. Región de capa superior en ausencia de Coliformes Totales.

4.1.5.2 *Escherichia Coli*

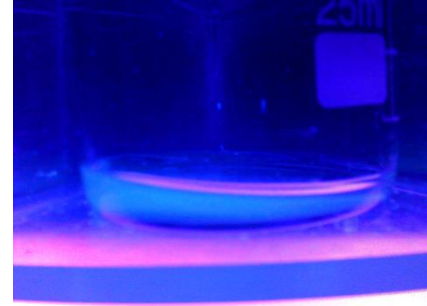
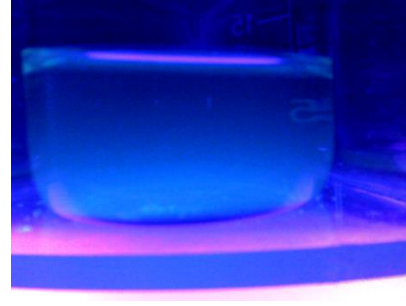
Los resultados arrojados en la verificación de colores, más exactamente en la muestra N°5 donde se realiza un monitoreo periódico con el fin de comprobar el color fluorescente mínimo que debe reconocer el prototipo y lograr la detección de *Escherichia Coli* en el menor tiempo posible (Ver Tabla 4.1.8).

MONITOREO PERIODICO DE LA MUESTRA N° 5		
TIEMPO TRANSCURRIDO (h)	MUESTRA (10 ml)	MUESTRA (1 ml)
0 Horas		

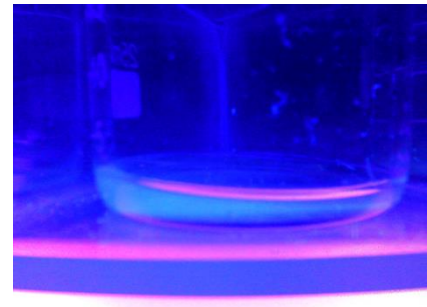
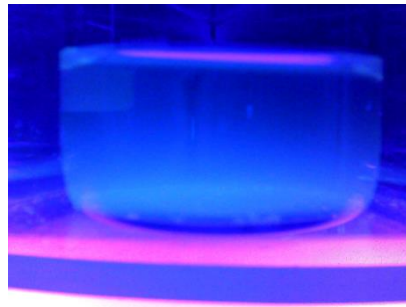
1 Horas



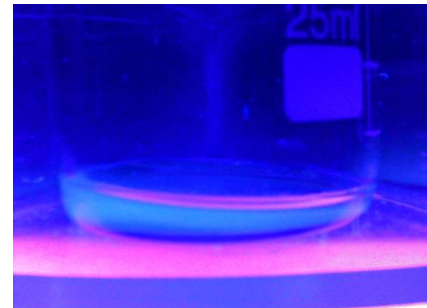
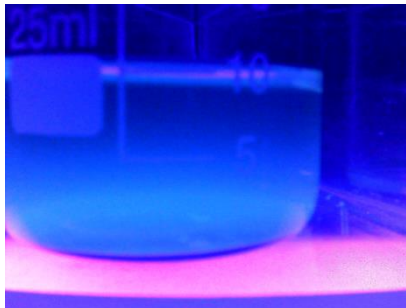
2 Horas



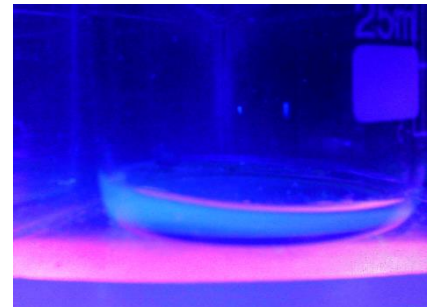
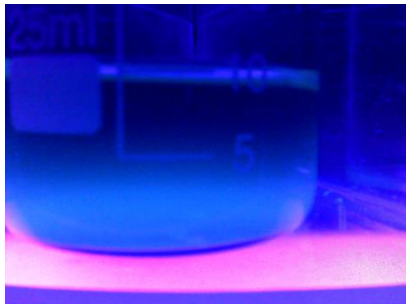
3 Horas



4 Horas



6 Horas



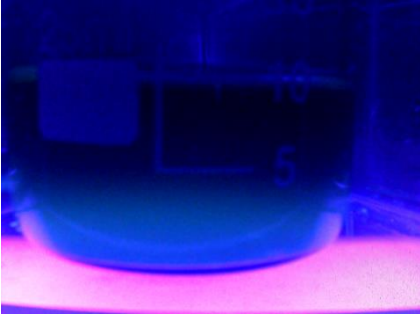
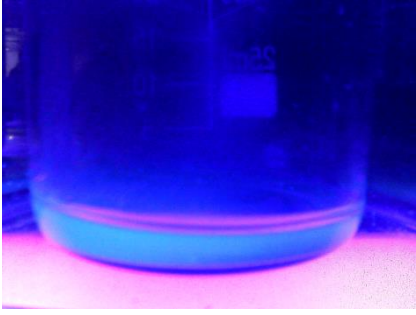
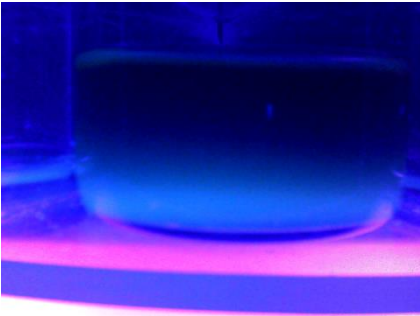
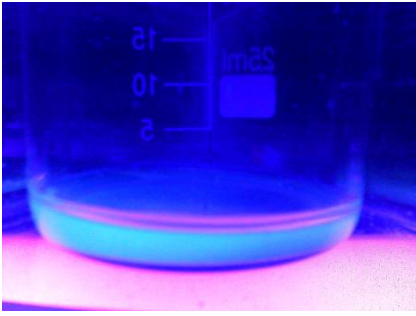
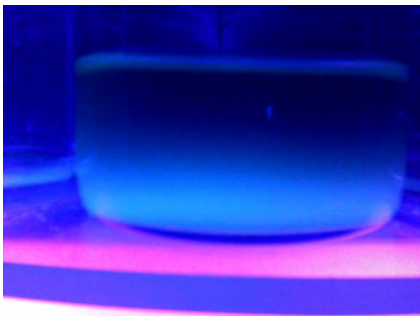
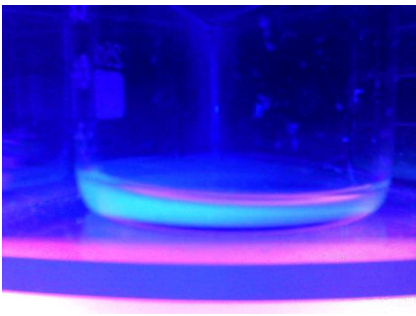
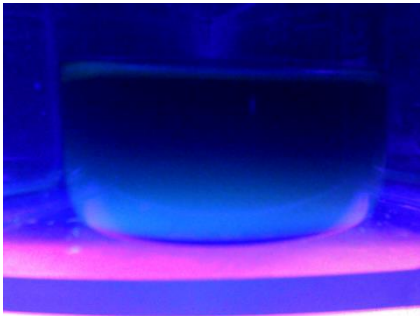
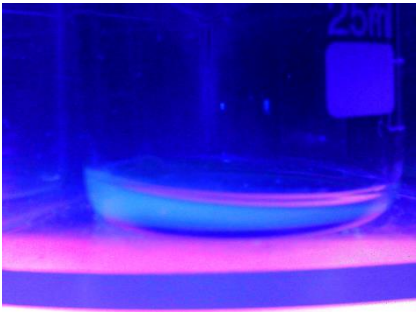
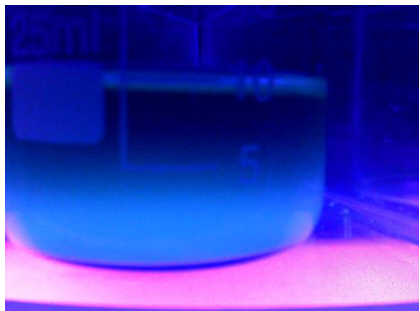
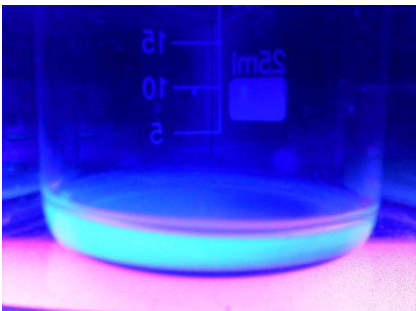
8 Horas		
9 Horas		
10 Horas		
11 Horas		
12 Horas		

Tabla 4.1.8. Monitoreo periódico de la muestra N°5.

Del análisis realizado en la muestra N°5 (Ver Tabla 4.1.8), el crecimiento bacteriano fue rápido, resultado que era de esperarse por el lugar de toma de la muestra. El prototipo pudo reconocer presencia de *Escherichia Coli* después de una hora de colocada la muestra, se comprobó el resultado visualmente y en efecto, ya presentaba un color fluorescente. Con los datos arrojados por el monitoreo periódico se logra ampliar las máscaras de detección.

Nota: Es importante resaltar que de acuerdo con el manual de Colitag [37], si se comprueba presencia de *Escherichia Coli*, es indicativo de que también hay presencia de Coliformes Totales, por lo cual únicamente en este caso no se realizará un análisis a la imagen para comprobar presencia de Coliformes totales.

4.2 PLAN DE PRUEBAS

Dentro del plan de pruebas del prototipo, se tienen las pruebas de validación en las que se evaluará la funcionalidad del prototipo realizando varias mediciones de cada característica y las pruebas de evaluación donde se evaluará todo el procedimiento que debe realizar el prototipo; es decir, desde la esterilización de la sección microbiológica, medición de las características químicas, detección de presencia o ausencia de características microbiológicas hasta el envío de los datos al usuario final (Ver Tabla 4.1.9).

Fase de pruebas	Tiempo	Descripción	Recursos
Act 5. Pruebas de calibración de características fisicoquímicas del prototipo.	2 horas por característica.	Realizar pruebas de cada característica con diferentes valores y contrastar valores del prototipo con el equipo de calibración.	Reactivos y equipo de calibración (i.e .Fotómetro).
Act 6. Análisis de muestras de agua en laboratorio y prueba del prototipo.	(2 horas: 1er día 2 hora: 2do día) por cada muestra	Realizar análisis fisicoquímicos y microbiológicos de muestras de agua en el laboratorio y en el prototipo.	Reactivos, agar nutritivo y demás recursos necesarios para los análisis de calidad de agua para consumo humano.

Tabla 4.1.9. Plan de pruebas de funcionalidad del prototipo.

4.2.1 Pruebas de validación

Las pruebas de validación están dirigidas hacia la funcionalidad de la fase de procesamiento, como el envío de los datos y la detección o verificación de las características del agua.

4.2.1.1 Prueba verificación de características

Para la verificación del valor de las características fisicoquímicas se realizan varias mediciones de cada característica, paralelo a esto se realiza la medición de la misma muestra tomando el dispositivo de calibración detallado en el método de calibración y las técnicas de modificación de cada característica.

➤ Potencial de Hidrogeno (pH)

Para verificar si el dispositivo presenta mediciones correctas, se toman 8 muestras de valores diferentes de pH (Ver Ilustración 4.2.6) y de cada una se realizan mediciones en el prototipo y se realiza comparación con las medidas de acuerdo con el personal profesional encargado (e.g. laboratorista).

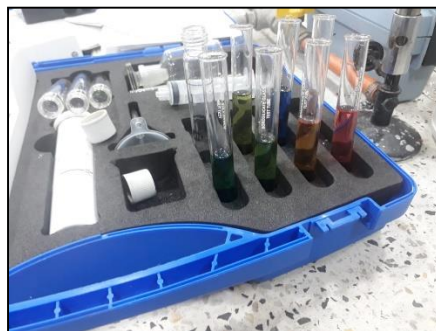


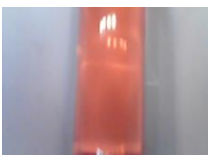

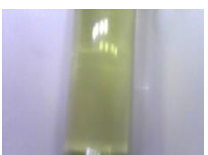



Ilustración 4.2.6. Muestras para evaluación de pH.

Se realizan 3 mediciones de cada muestra, todas arrojaron el mismo resultado tanto en el prototipo como las mediciones del personal encargado en el laboratorio; como método de medición para calibración se ha usado la caja comparadora de color y para mayor exactitud en 3 de los análisis se ha usado Buffer Solution (i.e. pH 9.5 ± 0.02 , pH 7.0 ± 0.02 , pH 4.01 ± 0.02), soluciones creadas por HACH con un pH casi exacto cuyo margen de error es mínimo y el resultado en el prototipo fue el correspondiente a la calibración de cada solución (Ver Tabla 4.2.10).

N°	Muestra	Color	Valor Laboratorio	Valor prototipo	Imagen
1	Agua de llave – cloruro de amonio	Verde	7.5	7.5	
2	Ácido nítrico (HNO ₃) – Agua destilada	Verde claro	6.5	7	
3	Buffer Solución	Naranja - Rojo	4	4	
4	Buffer Solución	Azul Morado	9.5	9.5	
5	Agua llave	Verde - Amarillo	6.5	6.5	
6	Ácido nítrico (HNO ₃) – Agua destilada	Amarillo - Rojo	5	4.5	



7	Ácido nítrico (HNO ₃) – Agua destilada	Amarillo	5	5	
8	Buffer Solution	Verde claro	6.5	7	

Tabla 4.2.10. Pruebas de Calibración de potencial de Hidrogeno.

De acuerdo con las mediciones de laboratorio, existen tres errores o diferencias en las mediciones del prototipo con respecto a las mediciones con la caja comparadora, en las muestra 2, 6 y 8; sin embargo, luego de realizar un análisis visual a las muestras del mismo valor o tonalidad (Ver Tabla 4.2.10) (i.e. 5, 7) se logra concluir que la diferencia puede deberse a la subjetividad visual a la que está expuesta la verificación por parte del personal encargado, ya que como se puede observar, en realidad sí existe diferencia entre la tonalidad de las muestras (Ver Ilustración 4.2.7) lo que quiere decir que existe diferencia en su valor.

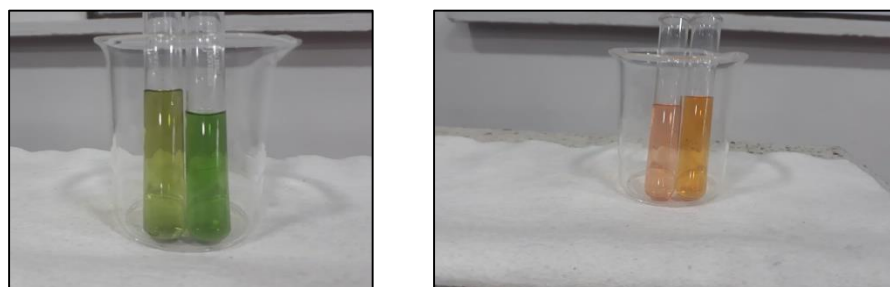


Ilustración 4.2.7. Muestras 2 y 5 (pH: 6.5) 6 y 7 (pH: 5).

Por otra parte, la tonalidad de la muestra 2 se asemeja más a la muestra 8 que a la muestra 5, cabe mencionar que es una muestra realizada con el Buffer Solution por lo que confirma que el error se debe a la subjetividad visual y no al procesamiento (Ver Ilustración 4.2.8).



Ilustración 4.2.8. Comparación de muestras de Ph.

➤ Cloro Residual Libre

Se realizan siete muestras de calibración o verificación del cloro residual libre, usando como método de medición el fotómetro y las técnicas de modificación descritas en la sección de calibración.

De cada muestra se realizan distintas mediciones (Ver Tabla 4.2.11), esto con el fin de observar sus similitudes; sin embargo, al ser el cloro un gas en cada medida realiza concentración a punto máximo y posteriormente se evapora, esto quiere decir que las medidas pueden variar de un instante a otro; teniendo en cuenta este suceso y de acuerdo con el manual de uso, el cloro residual libre debe medirse al minuto de la mezcla, siendo este el valor de la medición correcta.

Mediciones	Valores por N° Muestra (mg/L Cl)													
	1		2		3		4		5		6		7	
1	>2	>2	1,85	1,76	1,27	1,31	0,9	0,97	0,07	0,08	1,55	1,67	0,78	0,83
2	>2	>2	1,56	1,59	1,23	1,31	0,88	0,9	0,1	0,09	1,47	1,67	0,76	0,82
3	>2	>2	1,44	1,45	1,18	1,22	0,82	0,86	0,11	0,09	1,41	1,67	0,74	0,82
4	1,7	1,6	1,33	1,32	1,09	1,16	0,81	0,77	0,13	0,07	1,35	1,56	0,73	0,82
5			1,2	1,28	1,06	1,15	0,8	0,75	0,15	0,07	1,3	1,56	0,73	0,75
6							0,79	0,74	0,17	0,1			0,74	0,74
PF-12PLUS														
PROTOTIPO														

Tabla 4.2.11. Mediciones de Cloro Residual Libre (PF-12PLUS VS Prototipo)

Las mediciones que se encuentran dentro del tiempo adecuado establecido por el manual de uso, son las mediciones 1 y 2 de cada muestra.

En la muestra número uno (Ver Ilustración 4.2.9), específicamente las mediciones 1, 2 y 3 se observa que el nivel de cloro residual libre es mayor al rango de medición tanto en el fotómetro como en el prototipo y por ende es mayor al máximo permisible (i.e. 2mg/L); la medición 4 por su parte se encuentra fuera del tiempo recomendado por lo que su valor refleja la evaporación del cloro.

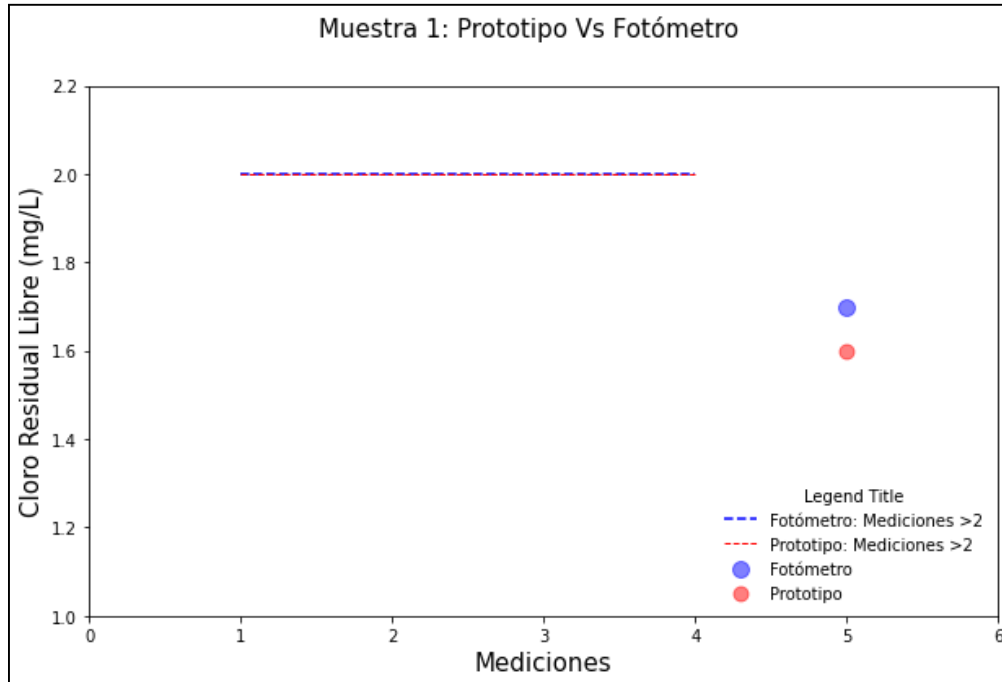


Ilustración 4.2.9. Prueba de calibración (Muestra 1: Cloro Residual Libre)

De acuerdo con los diagramas box plot (Ver Ilustración 4.2.10) las muestra número 2, 3, 4 y 5 tienen una mediana muy cercana entre el prototipo y fotómetro lo que quiere decir que la dispersión de sus datos es uniforme y son cercanos entre cada medición.

Por su parte los datos de las mediciones de la muestra 6 difieren en cuanto a dispersión por lo que la gráfica en el prototipo solo presenta dos valores de mediciones y se representa de esta manera ya que no contiene datos en el cuartil superior o inferior, por el contrario, el fotómetro presenta mayor dispersión de datos y su mediana es aproximadamente 1.4. En la muestra número 7 quien presenta mayor dispersión en los datos es el prototipo, teniendo una mediana cercana a 0.82 y el fotómetro una mediana cercana a 0.74.

Con el fin de presentar los datos, se tiene además de los diagramas boxplot, diagramas de dispersión de cada muestra, donde se comparan los resultados del prototipo con el dispositivo que se usó para la calibración (i.e. PF-12 PLUS o fotómetro) (Ver Ilustración 4.2.11) (Ver Ilustración 4.2.12).

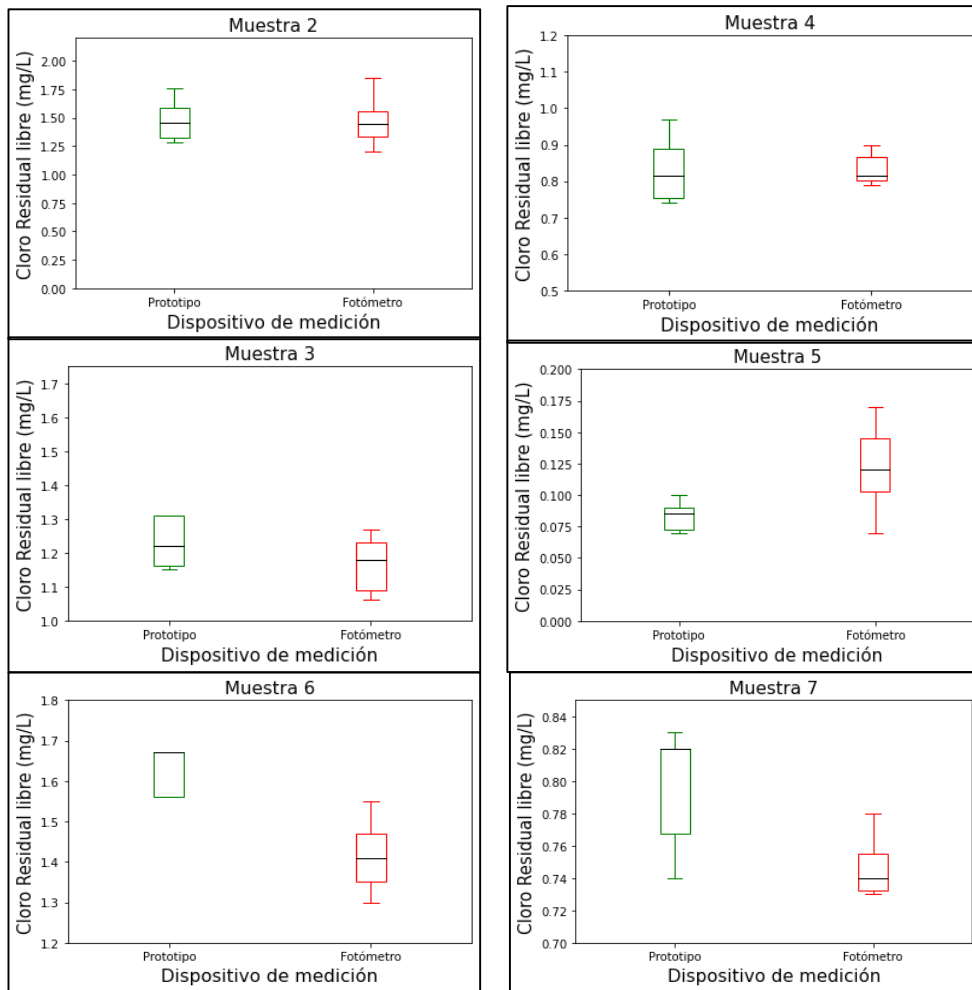


Ilustración 4.2.10. Prueba de calibración (Muestras 2:7 de Cloro Residual Libre)

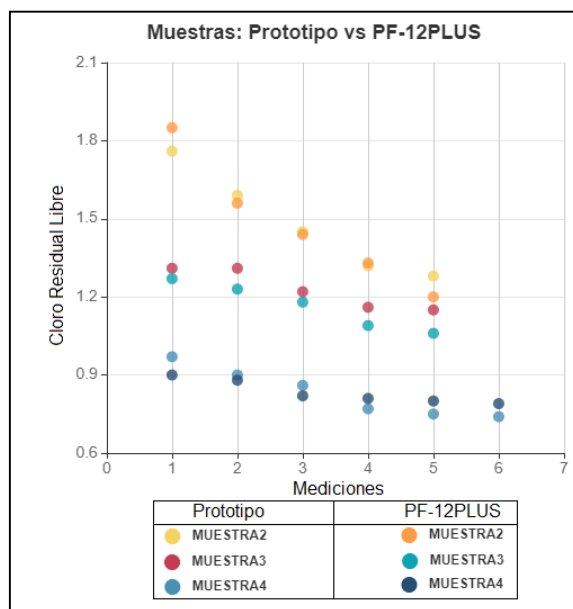


Ilustración 4.2.11. Diagrama de dispersión de mediciones de Cloro Residual Libre de muestras 2, 3 y 4.

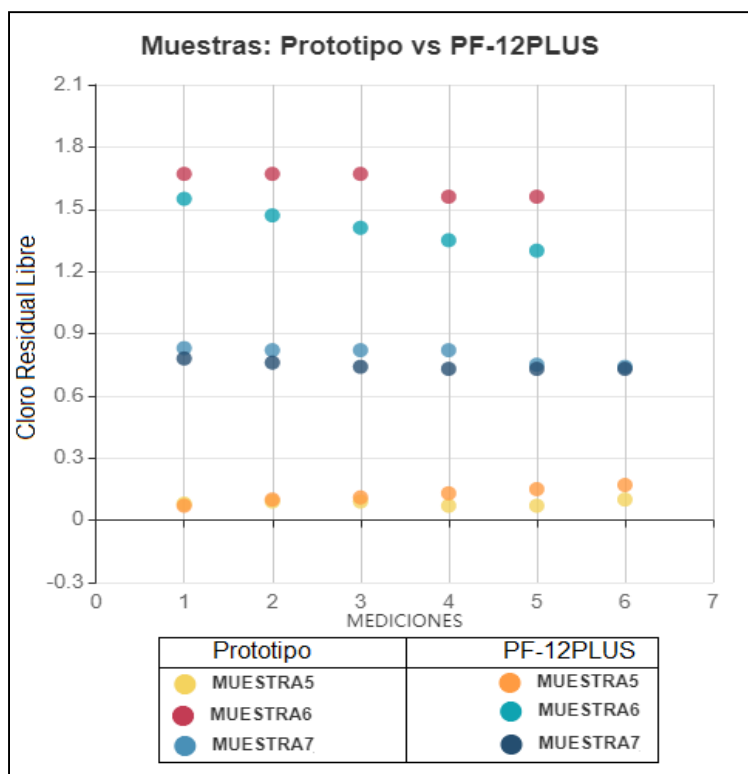


Ilustración 4.2.12. Diagrama de dispersión de mediciones de Cloro Residual Libre de muestras 5, 6 y 7.

De los diagramas se puede decir que la muestra con mayor diferencia de mediciones entre dispositivos es la muestra número seis; además, la muestra dos es la que más cambios tiene respecto al valor del cloro en cada medición en ambos dispositivos, por lo que aunque el valor cambie considerablemente con el paso del tiempo, las mediciones entre ambos dispositivos se mantienen cercanas, lo que quiere decir que entre más cerca al límite permisible mayor es el

cambio de color que se ve reflejado a causa de la evaporación del cloro esto hace que la medición en el tiempo correcto sea vital.

➤ **Turbiedad**

Para la verificación de la calibración de la turbiedad se realizan mediciones a 3 muestras la primera es agua potable, la segunda es una muestra alterada y la tercera es una muestra diluida de la muestra número dos.

Algunos de los datos presentan mediciones diferentes para la misma muestra (Ver Tabla 4.2.12), esto puede deberse a la cantidad de partículas detectadas en ese momento, cabe recordar que el principio usado en el Turbidímetro es la nefelometría donde se mide la luz dispersada en dirección distinta a la luz emitida, por lo que la homogeneidad de la muestra puede cambiar en algunos lugares del recipiente debido al movimiento de las partículas.

MEDICIÓN	Valor por N° de muestra (UNT)					
	MUESTRA1	MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA2	MUESTRA3	MUESTRA3
1	0.20	0.19	5.32	5.82	2.30	2.63
2	0.20	0.19	3.30	4.55	2.37	2.23
3	0.20	0.18	4.03	4.38	1.70	1.60
4	0.20	0.19	3.39	9.97	1.10	1.70
5	0.20	0.20	2.56	3.57	1.25	1.64
6			2.1	3.85		
Medidas Prototipo						
Medidas Turbidímetro						

Tabla 4.2.12. Mediciones de Turbiedad (Turbidímetro VS Prototipo)

En la muestra 1 de la verificación de turbiedad (Ver Ilustración 4.2.13) se puede observar que la dispersión de valores en el Turbidímetro es mayor a la dispersión de valores en el prototipo, esto se ve reflejado en la frecuencia y número de intervalos, siendo menor el número de intervalos y mayor la frecuencia en el prototipo que en el Turbidímetro.

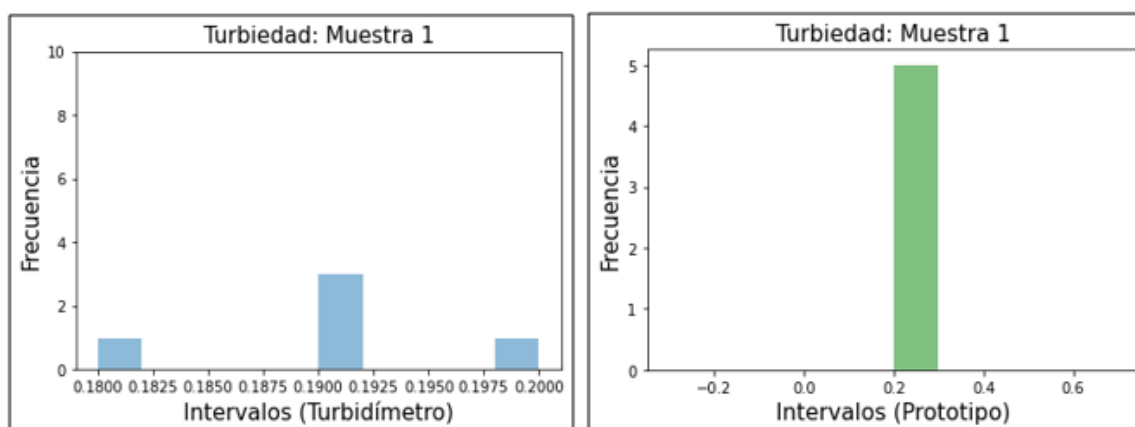


Ilustración 4.2.13. Histograma de la muestra 1 (Turbiedad).

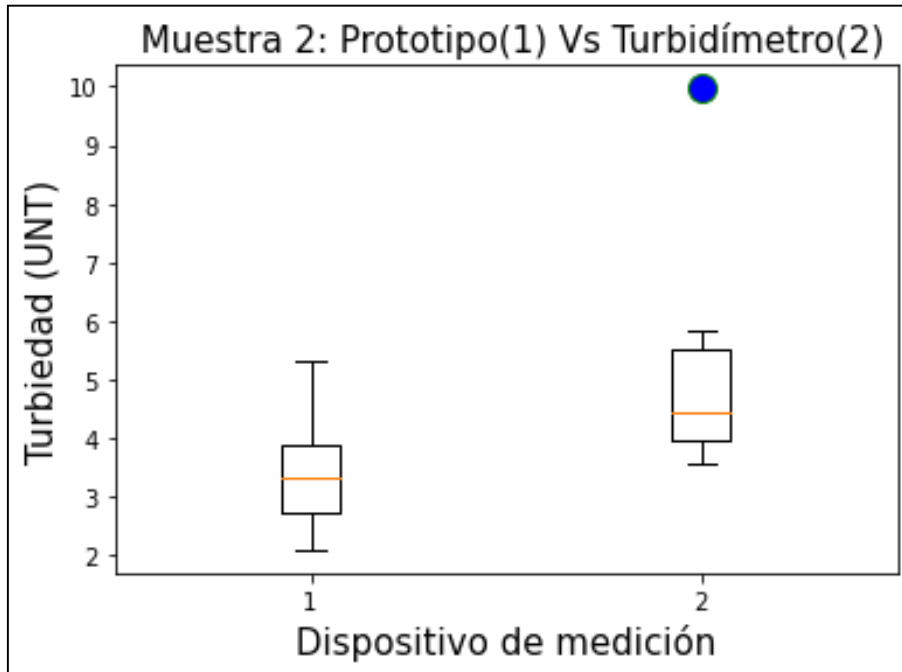


Ilustración 4.2.14. Diagrama boxplot de la muestra 2 (Turbiedad)

La muestra 2 de turbiedad presenta una mediana cercana entre Turbidímetro y prototipo (Ver Ilustración 4.2.14), se puede observar también mayor uniformidad en los datos del prototipo y menor dispersión en la mayoría de los datos del turbidímetro; sin embargo existe un valor atípico entre las mediciones del turbidímetro.

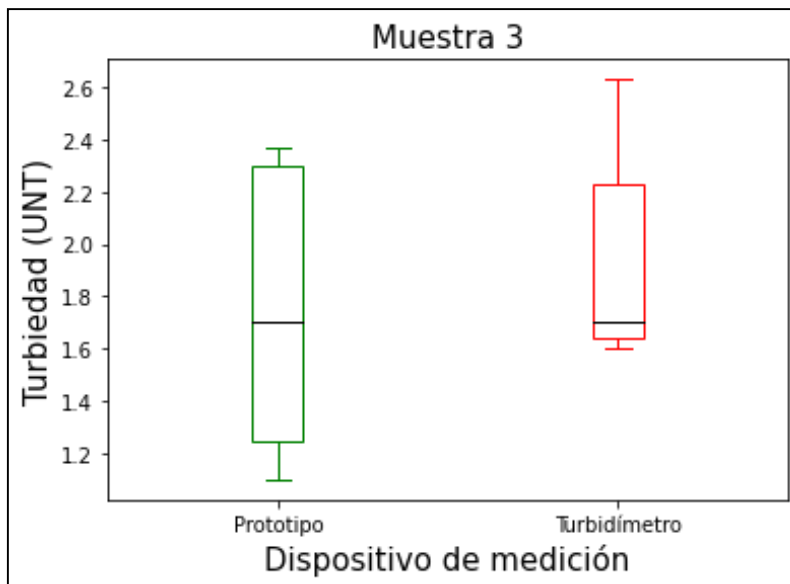


Ilustración 4.2.15. Diagrama boxplot de la muestra 3 (Turbiedad)

La muestra 3 de verificación de turbiedad presenta una mediana próxima entre prototipo y turbidímetro, 1.7 UNT aproximadamente (Ver Ilustración 4.2.15) es decir, en el cuartil Q2 se encuentra el 50% de los datos. Se puede observar la uniformidad de los datos en el prototipo de acuerdo con la distancia de los cuartiles Q1 y Q3 (i.e. rango intercuartílico) respecto a la mediana.

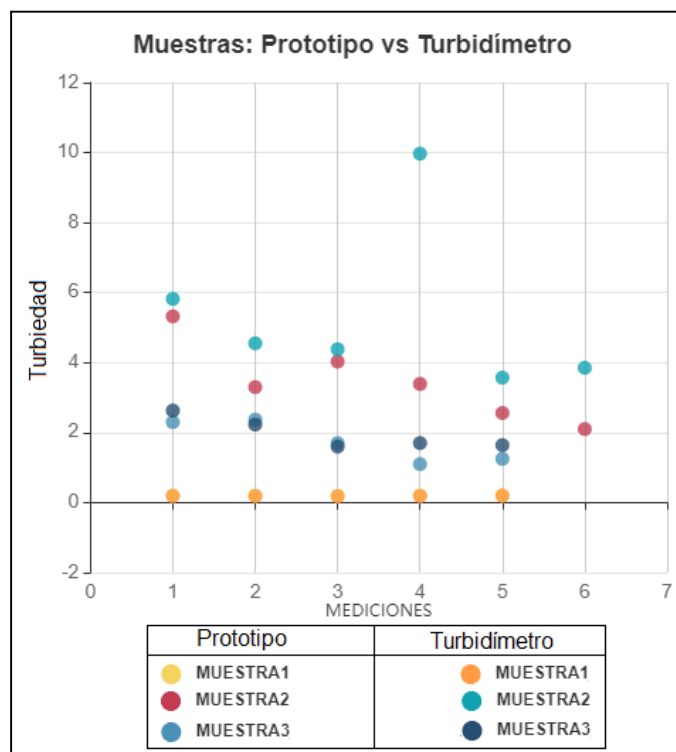


Ilustración 4.2.16. Diagrama de dispersión de mediciones de Turbiedad.

Del diagrama de dispersión (Ver Ilustración 4.2.16), se puede concluir que la toma de datos más similar es de la medición número 1 y 3, donde los datos del prototipo son más cercanos al turbidímetro; por otra parte, se puede observar como el turbidímetro tuvo un valor abrupto (i.e. valor atípico) en la medición 4 de la muestra número 2, mientras en el resto de mediciones tanto del prototipo como turbidímetro continuó con mediciones más homogéneas.

➤ Nitrato

La verificación de medición de Nitrato se realiza por medio del análisis de ocho muestras, cada una cuenta con cinco mediciones (Ver Tabla 4.2.13). El método de medición y las técnicas de modificación son los mismos descritos en la sección de calibración, se realizan las modificaciones de nitrato en las muestras estratégicamente para obtener valores en distintos niveles de concentración.

MEDICIÓN	Valor por N° de MUESTRA (mg/L NO ₃)															
	1		2		3		4		5		6		7		8	
1	8	8.6	4.8	6.24	<2	2.3	11	10.56	9.1	8.7	5.6	7.1	<2	2.2	10.8	10.87
2	8.1	8.7	4.5	6.12	<2	2.39	10.9	10.64	9	9.2	5.3	7.14	<2	2.1	10.8	10.9
3	8.4	8.7	4.6	6.3	<2	2.26	10.8	10.72	9.1	8.87	5.4	6.6	<2	2.18	10.8	10.7
4	8.5	9	4.8	6.12	<2	2.12	10.6	10.8	9.1	8.8	5.4	6.38	<2	2.06	10.7	10.92
5	8.6	8.84	4.8	6.16	<2	2	10.5	10.66	9	8.9	5.4	6.63	<2	2	10.8	10.92
Medidas PF-12PLUS																
Medidas Prototipo																

Tabla 4.2.13. Mediciones de Nitrato (Fotómetro VS Prototipo)

La muestra 1 de verificación de nitrato muestra datos no asimétricos (Ver Ilustración 4.2.17), por lo cual la mediana de ambos dispositivos no se encuentran en el centro de los cuartiles Q1 y Q3, además, no presenta valores atípicos y considerando el rango de medición del prototipo (i.e. 2 – 11 mg/L NO₃N) se puede decir que la diferencia entre los dispositivo es baja. Por su parte, la muestra número 2 presenta mayor asimetría en las mediciones del prototipo; sin embargo, la diferencia entre mediciones de los dispositivos es alta.

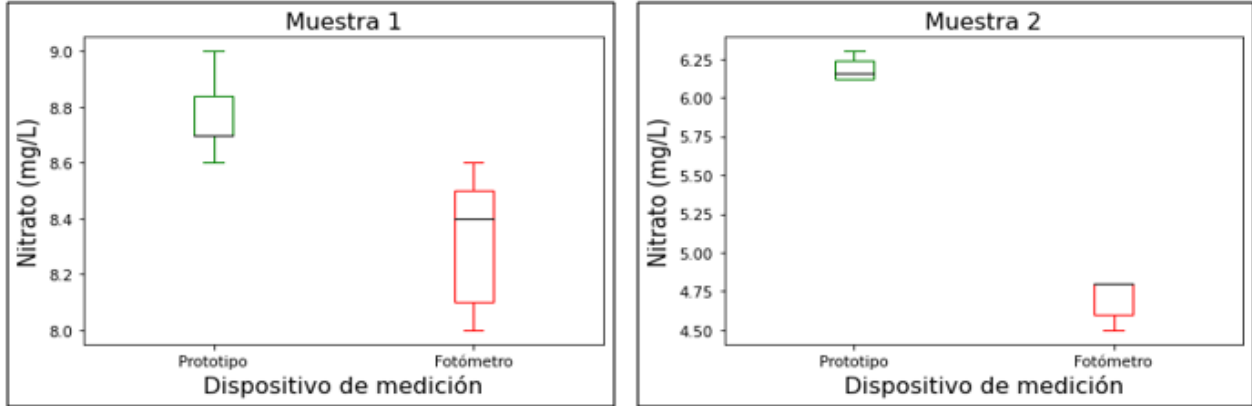


Ilustración 4.2.17. Diagrama boxplot de la muestra 1 y 2 (Nitrato)

La verificación de nitrato en las muestras 3 y 7 para el fotometro todas las mediciones son menores a 2, mientras que para el prototipo todas las mediciones están sobre el limite inferior de calibración (Ver Ilustración 4.2.18).

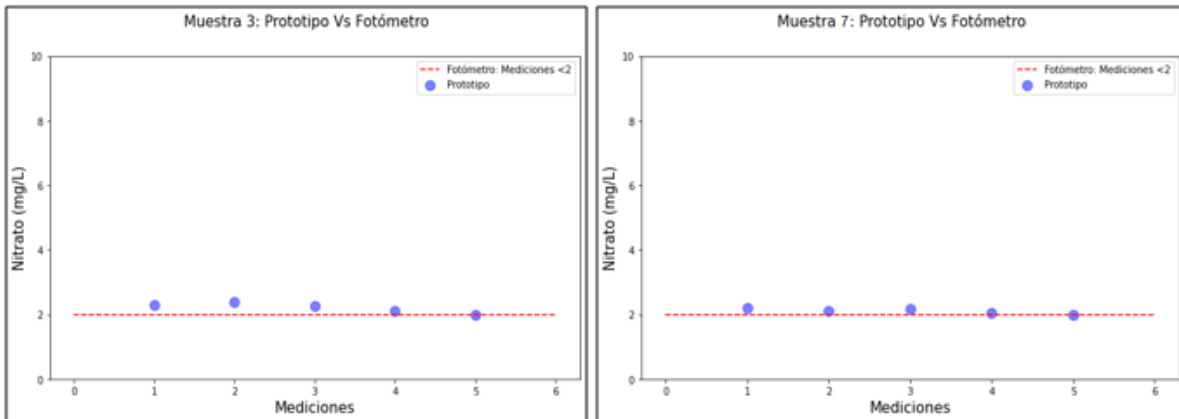


Ilustración 4.2.18. Diagrama boxplot de las muestras 3 y 7 (Nitrato).

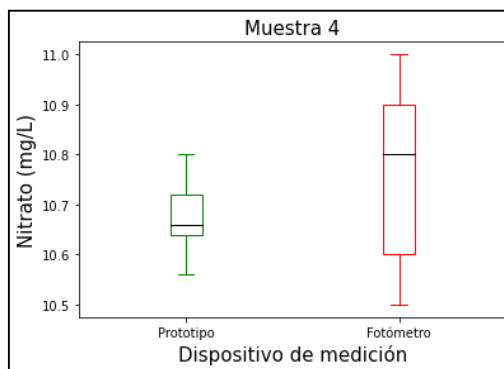


Ilustración 4.2.19. Diagrama boxplot de las muestras 4 (Nitrato)

El análisis de la muestra 4, 5 y 8 (Ver Ilustración 4.2.19) (Ver Ilustración 4.2.21) (Ver Ilustración 4.2.22) es importante ya que se encuentran cerca del máximo permisible (i.e. 10 mg/L NO₃) y son las muestras donde mayor proximidad se presentó entre las mediciones del prototipo y del fotómetro.

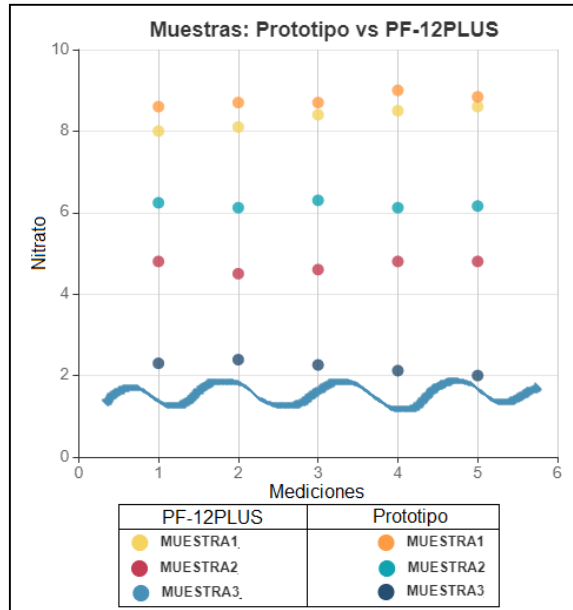


Ilustración 4.2.20. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrato de muestras 1, 2 y 3.

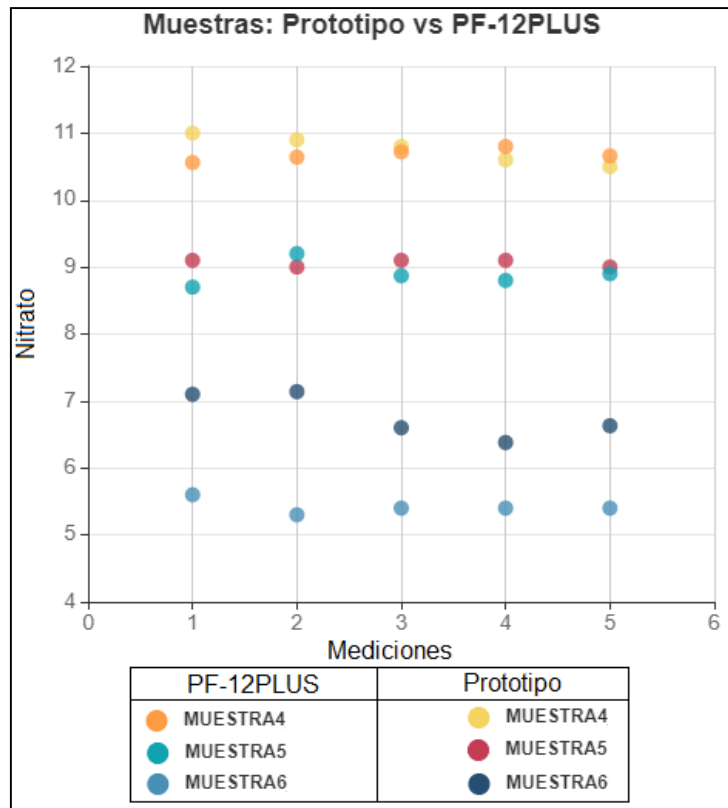


Ilustración 4.2.21. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrato de muestras 4, 5 y 6.

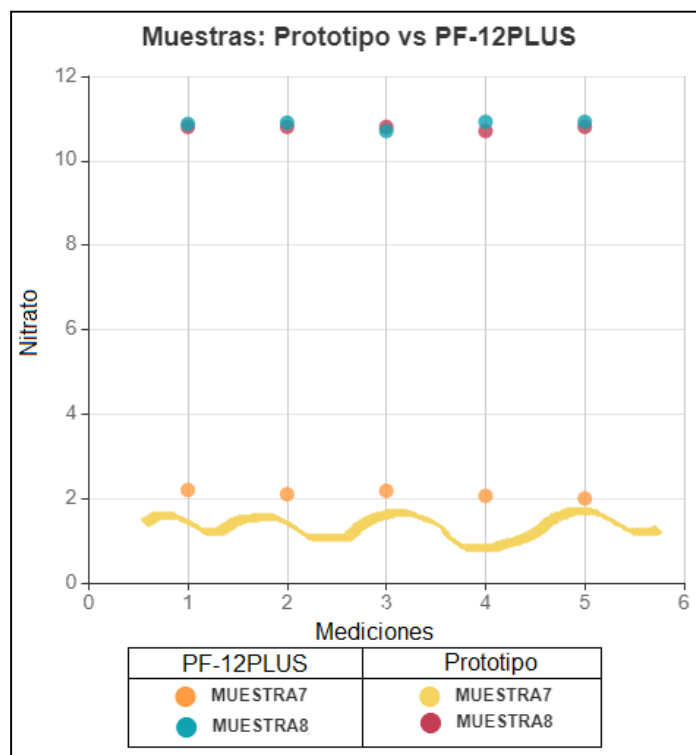


Ilustración 4.2.22. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrato de muestras 7 y 8.

Con los diagramas de dispersión (Ver Ilustraciones Ilustración 4.2.20, Ilustración 4.2.21 e Ilustración 4.2.22) se puede corroborar que la mayor proximidad entre los datos del prototipo y los datos del fotómetro se da cuando nitrato es cercano a 10 mg/L NO₃, como se menciona anteriormente, esto es importante ya que este es el límite máximo permisible de la normatividad por lo que es donde mayor sensibilidad deben presentar las mediciones en el prototipo para calcular el valor del IRCA con mayor exactitud.

➤ **Nitrito**

La verificación de medición de Nitrito se realiza por medio del análisis de cuatro muestras, cada una cuenta con cinco mediciones (Ver Tabla 4.2.14). El método de medición y las técnicas de modificación son los mismos descritos en la sección de calibración.

MEDICIÓN	Valor por N° de muestra (mg/L NO ₂)							
	MUESTRA 1	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 4
1	0.092	0.08	0.059	0.06	<0.023	<0.02	>0.122	0.14
2	0.1	0.09	0.059	0.06	<0.023	<0.02	>0.122	0.14
3	0.092	0.09	0.067	0.06	<0.023	<0.02	>0.122	0.14
4	0.07	0.09	0.068	0.06	<0.023	<0.02	>0.122	0.14
5	0.095	0.09	0.059	0.06	<0.023	<0.02	>0.122	0.14
Medidas Prototipo								
Medidas PF-12PLUS								

Tabla 4.2.14. Mediciones de Nitrito (Fotómetro VS Prototipo).

Los valores de las mediciones de nitrito son muy pequeños (Ver Ilustración 4.2.23), sin embargo el prototipo presenta gran sensibilidad, se debe tener en cuenta que la escala del diagrama es muy pequeña y una variación mínima puede representar una dispersión mayor; sin embargo las mediciones tienen gran precisión y en los rangos menores o mayores a los de la calibración (e.g. muestra 3 y 4) (Ver Ilustración 4.2.24) el prototipo realiza una asignación a todas las mediciones como mayor que o menor que, según corresponda y sin excepción.

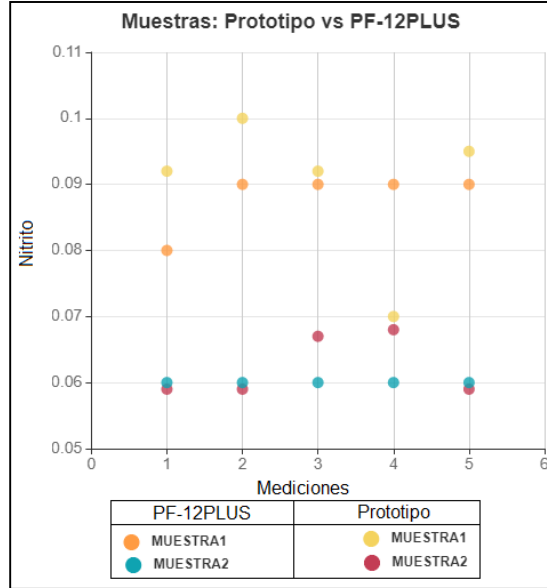


Ilustración 4.2.23. Diagrama de dispersión de mediciones de Nitrito de muestras 1 y 2.

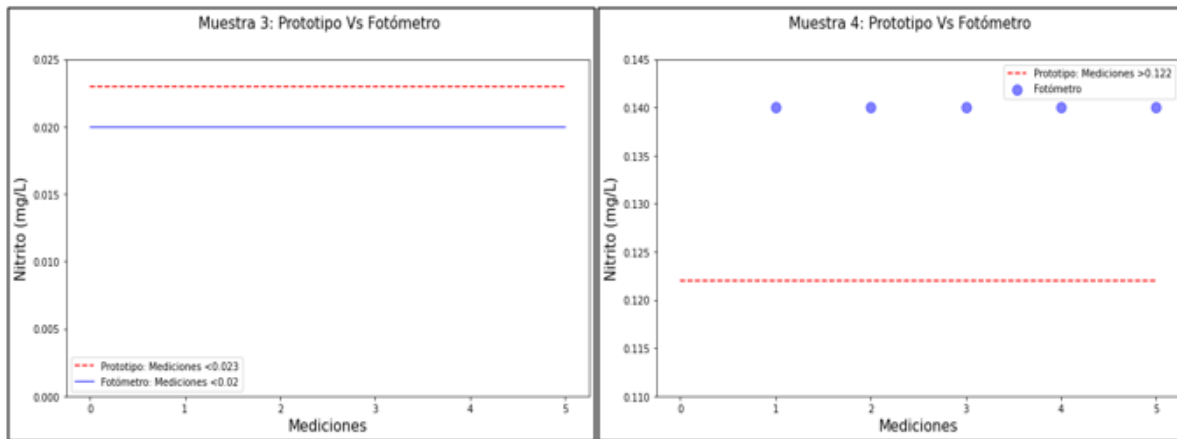


Ilustración 4.2.24. Diagrama de dispersión de las muestras 3 y 4 (Nitrito).

➤ Fosfato

La verificación de la calibración de fosfato se hace por medio de tres muestras, donde se evalúa si el valor del fosfato es mayor, menor o igual al máximo permisible (i.e. 0.5 mg/L PO₄-P) en cinco mediciones (Ver Tabla 4.2.15). Los métodos y técnicas de modificación de concentración de fosfato son los mismos detallados en la sección de calibración.

MEDICIÓN	Valor por N° de muestra (mg/L PO ₄ -P)					
	MUESTRA1	MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA2	MUESTRA3	MUESTRA3
1	<0.5	0.4	>0.5	0.9	>0.5	0.6

2	<0.5	0.4	>0.5	0.9	>0.5	0.7
3	<0.5	0.3	>0.5	0.9	>0.5	0.6
4	<0.5	0.4	>0.5	1	>0.5	0.7
5	0.5	0.5	>0.5	0.9	>0.5	0.6
Medidas Prototipo						
Medidas PF-12PLUS						

Tabla 4.2.15. Mediciones de Fosfato (Fotómetro VS Prototipo).

La muestra número uno consta de cinco mediciones realizadas por el prototipo y contrastadas con el fotómetro (i.e. PF-12^{PLUS})(Ver Ilustración 4.2.25), donde cuatro de ellas son menores a 0.5, como efectivamente lo comprueba el prototipo y una medición indica que es igual a 0.5 en ambos dispositivos.

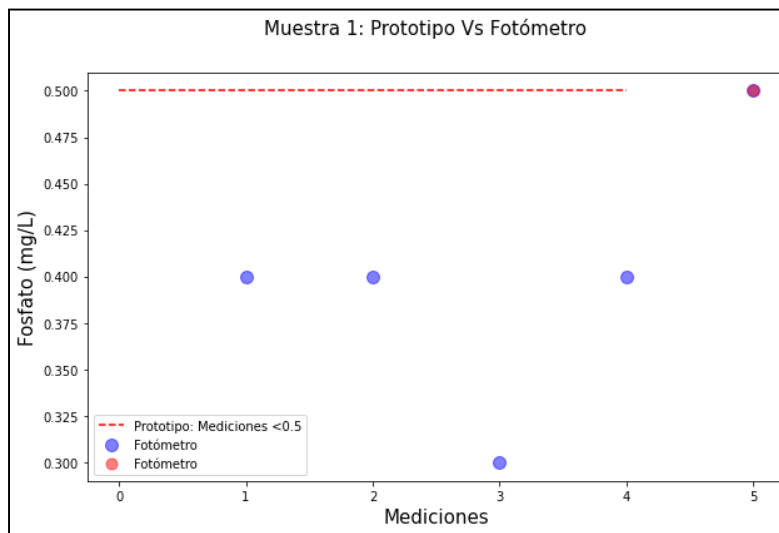


Ilustración 4.2.25. Diagrama de dispersión de la muestra 1 (Fosfato)

En la muestra número dos y tres, tanto el fotómetro como el prototipo presenta medidas de concentración de fosfato mayor a 0.5 (Ver Ilustración 4.2.26).

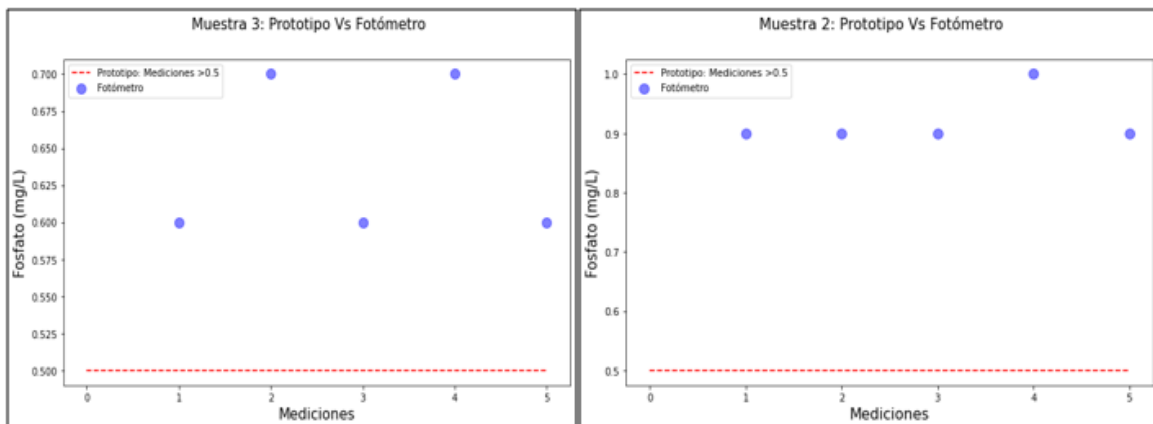


Ilustración 4.2.26. Diagrama de dispersión de las muestras 2 y 3 (Fosfato).

➤ **Hierro**

La verificación de la calibración del Hierro se hace por medio de 5 muestras, cada una con 5 mediciones distintas (Ver Tabla 4.2.16), los métodos de medición y técnicas de modificación de concentración de hierro son las mismas detalladas en la sección de calibración. El rango de medición de hierro en el prototipo es de 0 – 0.307 mg/L Fe, por lo que se buscarán valores dentro y fuera del máximo permisible (i.e. 0.3 mg/L Fe).

MEDICIÓN	Valor por N° de muestra (mg/L Fe)									
	1		2		3		4		5	
1	0.24	0.21	0.14	0.17	0.08	0.09	0.04	0.05	>0.3	0.35
2	0.22	0.21	0.18	0.17	0.08	0.1	0.04	0.06	>0.3	0.35
3	0.24	0.21	0.18	0.17	0.07	0.1	0.05	0.05	>0.3	0.35
4	0.2	0.21	0.18	0.17	0.09	0.1	0.05	0.05	>0.3	0.35
5	0.23	0.21	0.18	0.17	0.08	0.08	0.04	0.05	>0.3	0.35
Medidas Prototipo										
Medidas PF-12PLUS										

Tabla 4.2.16. Mediciones de Hierro (Fotómetro VS Prototipo).

Los diagramas de dispersión (Ver Ilustración 4.2.27) (Ver Ilustración 4.2.28) dan cuenta de la distribución de los datos en las mediciones del fotómetro y del prototipo en la concentración de hierro, en la muestra número 2 y 4 se presenta la mayor proximidad entre las mediciones y en la muestra número 1 y 3 las que tienen mayor diferencia entre sí.

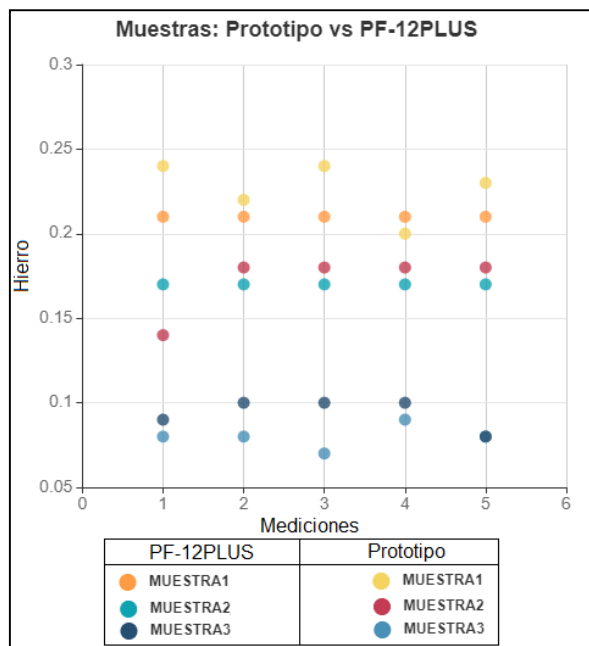


Ilustración 4.2.27. Diagrama de dispersión de mediciones de Hierro de muestras 1, 2 y 3 (Hierro).

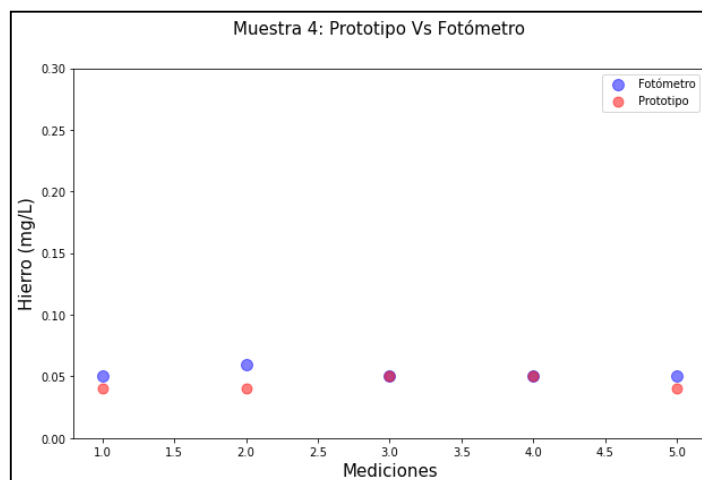


Ilustración 4.2.28. Diagrama de dispersión de mediciones de Hierro de la muestra 4 (Hierro).

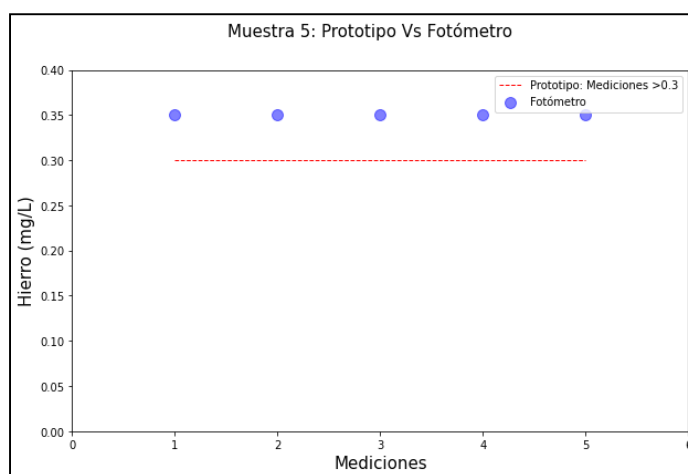


Ilustración 4.2.29. Diagrama de dispersión de mediciones de Hierro de muestras 5.

Por su parte, las mediciones de la muestra número cinco son clasificadas como mayores al máximo permisible por parte del prototipo (Ver Ilustración 4.2.29), esto es importante ya que el valor de mayor importancia es cuando se reconoce que la muestra se encuentra fuera del máximo permisible, lo que quiere decir que representa un riesgo dentro del IRCA el consumo de agua.

4.2.1.2 Prueba de notificación del prototipo

El prototipo se ha diseñado para realizar apagado automático de acuerdo con dos condiciones, primero, la verificación de presencia de *Escherichia Coli* y segundo, transcurso de 24 horas luego de iniciado el proceso; de acuerdo con lo anterior, se envían los datos al usuario por medio del protocolo SMTP al correo electrónico con la condición que ocurra primero.

Para realizar las pruebas de notificación o envío de información no se requiere del análisis de las características fisicoquímicas, por lo tanto, no son necesarios reactivos a excepción de agar Colitag para realizar el análisis de las características microbiológicas, tampoco se tendrá en cuenta el indicador IRCA.

➤ Notificación de presencia de *Escherichia Coli*

Para la prueba de notificación de presencia de *Escherichia Coli* se toma una muestra de agua posiblemente contaminada, se realiza el análisis correspondiente de donde se obtiene los resultados esperados y la notificación de aviso después de una hora de cultivo (Ver Tabla 4.2.17).

Características	Descripción
Muestra	Agua residual hogar
Hora	3:59 p.m.
Resultados	4:59 p.m. Completo
<i>Escherichia Coli</i>	Presencia
Coliformes Totales	Presencia
Estado de correo	Enviado

Tabla 4.2.17. Características de notificación de Email (Prueba 1)

El envío de datos se lleva a cabo después de aproximadamente una hora, se presentó en poco tiempo debido a la contaminación elevada de la muestra (Ver Ilustración 4.2.30).

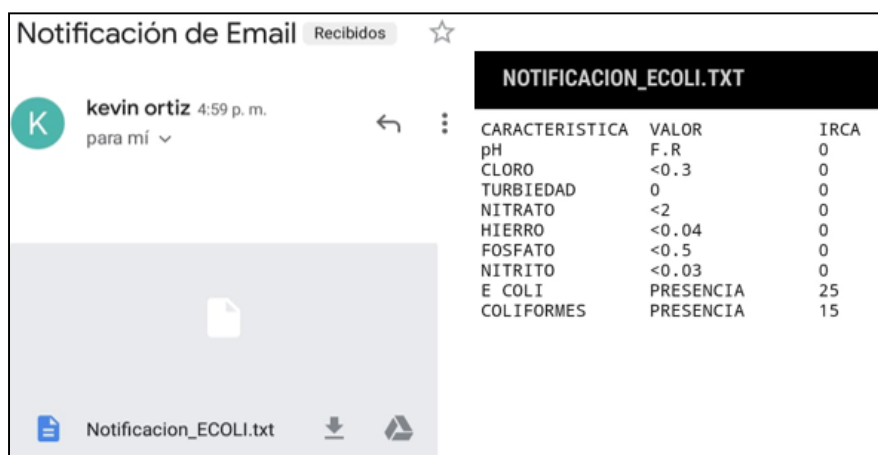


Ilustración 4.2.30. Notificación Email (Presencia Ecoli)

➤ Notificación por transcurso de 24 horas

Para la prueba de notificación por transcurso de 24 horas se toma una muestra de agua destilada y se esteriliza la sección microbiológica del prototipo, esto con el fin de que la muestra no esté contaminada y poder asegurar un tiempo de 24 horas sin reconocer *Escherichia Coli* (Ver Tabla 4.2.18).

Características	Descripción
Muestra	Agua destilada
Hora	5:36 p.m.
Resultados	5:36 p.m. Completo
<i>Escherichia Coli</i>	Ausencia
Coliformes Totales	Ausencia
Estado de correo	Enviado

Tabla 4.2.18. Características de notificación de Email (Prueba 2).

El envío de correo respondió al transcurso de 24 horas, esto quiere decir que no se detecta en ese periodo de tiempo la presencia de Escherichia Coli (Ver Ilustración 4.2.31).

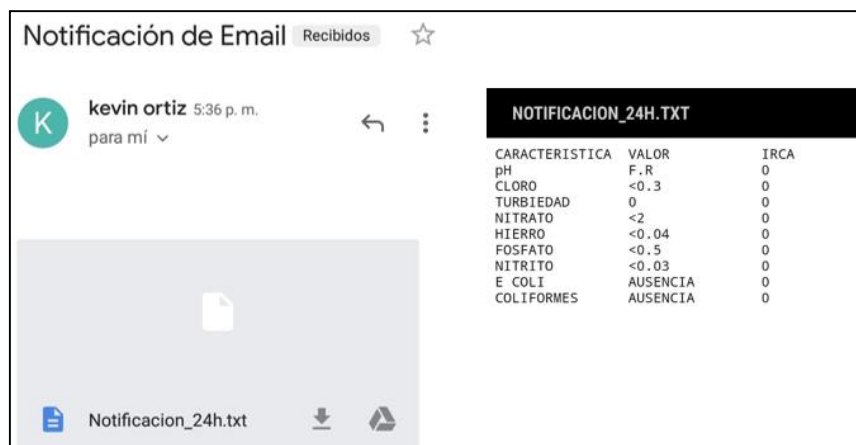


Ilustración 4.2.31. Notificación Email (24 h)

4.2.2 Pruebas de evaluación

Con el propósito de evaluar la funcionalidad del prototipo en situaciones reales, se realizan 5 pruebas con muestras tomadas en distintos momentos y lugares, los lugares son estratégicamente escogidos con el propósito de encontrar variaciones en el indicador IRCA.

4.2.2.1 Protocolo de pruebas de evaluación

Las pruebas deben cumplir con un protocolo para toma de muestra que garantice que las características de la muestra no se verán alterados por factores externos para lo cual se debe:

- Para la toma de muestra del agua potable es necesario esterilizar con fuego la llave de paso, luego abrirla por 3 min y tomar 100 ml de agua, para esto se debe esterilizar el medio con mecheros de gas cerca de la toma de la muestra, limpiar el espacio donde se prepara la muestra con cloro y alcohol (Ver Ilustración 4.2.32).
- Uso de elementos como guantes, bata, tapabocas.



Ilustración 4.2.32. Esterilización del espacio.

- Esterilización del material que se va a usar en cada uno de los análisis tanto del laboratorio como del prototipo (e.g. recipientes, vasos de precipitado) todos con cinta indicadora de esterilización en el autoclave a 134°C por 30 min (Ver Ilustración 4.2.33 y Ilustración 4.2.34).



Ilustración 4.2.33. Esterilización de recipientes con cinta indicadora.



Ilustración 4.2.34. Autoclave para la esterilización.

- Distribución de la muestra con las cantidades necesarias en los diferentes recipientes dispuestos para los análisis, para la muestra microbiológica se toma todo el contenido de la muestras (i.e. 100ml) y se diluirá el agar nutritivo Colitag antes de la distribución en cada recipiente (Ver Ilustración 4.2.35).



Ilustración 4.2.35. Distribución de la muestra en los recipientes.

- Esterilizar la sección microbiológica antes de ingresar la plataforma rotatoria con las muestras (Ver Ilustración 4.2.36).

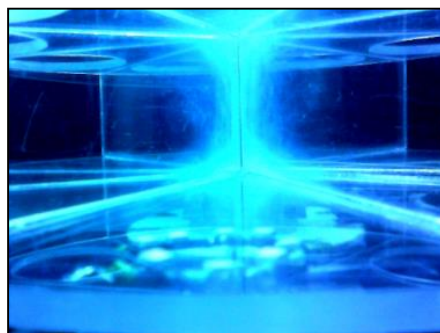


Ilustración 4.2.36. Esterilización de la sección microbiológica con luz UVC

- Paralelo a la esterilización se realiza la mezcla de reactivos en los recipientes según corresponda a cada característica.
- Luego de la esterilización del espacio de la sección microbiológica se deben ingresar las plataformas rotatorias a las secciones correspondientes (i.e. fisicoquímica, microbiológica) (Ver Ilustración 4.2.37).



Ilustración 4.2.37. Plataformas rotatorias de las secciones.

- El proceso podrá ser iniciado una vez se cumplan las instrucciones anteriores, luego de esto se tiene un tiempo de máximo 24 horas para enviar resultados al usuario.

4.2.2.2 Prueba 1: Rio Ejido N°1

La muestra fue tomada el día 4 de noviembre a las 8:20 a.m. horas, en el rio Ejido ubicado en el barrio Retiro Alto, se traslada la muestra hasta el laboratorio y se realiza los respectivos análisis a las 9:08 a.m. en el prototipo y en el laboratorio.

El envío de los datos de las características fisicoquímicas se realiza automáticamente a los 10 minutos con 10 segundos y los resultados finales con el respectivo IRCA se realizan a las 12:08 p.m. (Ver Tabla 4.2.19).

Características de la muestra prueba 1

Hora de toma	8:20 a.m.
Hora de Análisis	9:08 a.m.

Hora de Resultados 12:08 p.m.
 Estado de Email Enviado

Tabla 4.2.19. Características de la Prueba 1 (Rio Ejido N°1).

Para el respectivo análisis se realiza con anterioridad el protocolo de evaluación, una vez se tienen los análisis, los resultados fueron los siguientes (Ver Tabla 4.2.20).

Muestra: Rio Ejido N°1				
Característica	Valores Laboratorio	Valores Prototipo	Puntaje de riesgo Laboratorio	Puntaje de riesgo Prototipo
Cloro Residual Libre	0.05 mg/L	<0.3 mg/L	15	15
pH	7	7.5	0	0
Nitrito	0.19 mg/L	>0.122 mg/L	3	3
Fosfato	>5 mg/L	>0.5 mg/L	1	1
Nitrato	3.4 mg/L	3.1 mg/L	0	0
Hierro	<0.04 mg/L	<0.04 mg/L	0	0
Turbiedad	55.4 UNT	>5.5 UNT	15	15
Escherichia Coli	PRESENCIA	PRESENCIA	25	25
Coliformes Totales	PRESENCIA	PRESENCIA	15	15
IRCA	INVIABLE	INVIABLE	94.87	94.87

Tabla 4.2.20. Resultados de análisis de la prueba 1 (Rio Ejido N°1)

Se puede observar que, aunque los valores difieren en algunas de las características, el valor IRCA no cambia para ninguna, esto se debe a que en ambas mediciones los valores verificados se mantienen fuera o dentro de los rangos máximos permisibles por la normatividad por lo que su puntaje de riesgo es el mismo en ambos casos.



Ilustración 4.2.38. Email de la prueba 1

PRUEBAS_EJIDO.TXT		
CARACTERISTICA	VALOR	IRCA
pH	7.5	0
CLORO:	<0.3	15
TURBIEDAD	>5.5	15
NITRATO	3.1	0
HIERRO	<0.04	0
FOSFATO	>0.5	1
NITRITO	>0.122	3
E COLI	PRESENCIA	25
COLIFORMES	PRESENCIA	15
IRCA TOTAL	Inviabile	94.87

Ilustración 4.2.39. Datos de la Prueba 1.

Los resultados de los análisis de esta prueba tardaron 3 horas aproximadamente, un tiempo relativamente corto debido a que el agua estaba en condiciones de contaminación elevadas; además el resultado fue inviable sanitariamente para ambos dispositivos de medición, lo que quiere decir que su consumo representa un riesgo muy elevado (Ver Ilustración 4.2.38) (Ver Ilustración 4.2.39).

4.2.2.3 Prueba 2: Rio Ejido N°2

La muestra fue tomada el día 5 de noviembre a las 2:50 p.m. horas, en el rio Ejido ubicado en el barrio Retiro Alto, se traslada la muestra hasta el laboratorio y se realiza los respectivos análisis a las 3:27 p.m. en el prototipo y en el laboratorio.

El envío de los datos de las características fisicoquímicas se realiza automáticamente a los 10 minutos con 10 segundos y los resultados finales con el respectivo IRCA se realizan a las 4:38 p.m. (Ver Tabla 4.2.21).

Características de la muestra prueba 1	
Hora de toma	2:50 p.m.
Hora de Análisis	3:38 p.m.
Hora de Resultados	4:38 p.m.
Estado de Email	Enviado

Tabla 4.2.21. Características de la Prueba 1 (Rio Ejido N°2).

Para el análisis se realiza el respectivo protocolo de evaluación. A pesar de que la muestra fue tomada en el mismo lugar se espera que algunos de sus parámetros o características cambien debido a que la muestra fue tomada luego de presentarse lluvia.

Muestra: Rio Ejido N°2				
Característica	Valores Laboratorio	Valores Prototipo	Puntaje de riesgo Laboratorio	Puntaje de riesgo Prototipo
Cloro Residual Libre	0.03 mg/L	<0.3	15	15
pH	7	6.5	0	0
Nitrito	>0.5 mg/L	>0.122	3	3
Fosfato	>5 mg/L	>0.5	1	1
Nitrato	4.2 mg/L	<2.2	0	0

Hierro	<0.04 mg/L	<0.04	0	0
Turbiedad	66 UNT	>5.5	15	15
Escherichia Coli	PRESENCIA	PRESENCIA	25	25
Coliformes Totales	PRESENCIA	PRESENCIA	15	15
IRCA	INVIABLE	INVIABLE	94.87	94.87

Tabla 4.2.22. Resultados de análisis de la prueba 2 (Rio Ejido N°2).

Se puede observar que aunque los valores difieren en algunas de las características (Ver Tabla 4.2.22), el valor IRCA no cambia para ninguna, esto se debe a que en ambas mediciones los valores verificados se mantienen fuera o dentro de los rangos máximos permisibles por la normatividad por lo que su puntaje de riesgo es el mismo en ambos casos. El valor IRCA es el mismo que la prueba 1; sin embargo, la detección de *Escherichia Coli* en la prueba 2 en el prototipo tardó una hora, mientras que en la prueba 1 el prototipo necesitó 3 horas para la detección (Ver Ilustración 4.2.40 y Ilustración 4.2.41) esto quiere decir que la muestra de la prueba 2 tiene mayor contaminación en comparación con la muestra de la prueba 1.



Ilustración 4.2.40. Email de la prueba 2.

PRUEBAS_EJIDO (2).TXT		
CARACTERISTICA	VALOR	IRCA
pH	6.5	0
CLORO	<0.3	15
TURBIEDAD	>5.5	15
NITRATO	<2.2	0
HIERRO	<0.04	0
FOSFATO	>0.5	1
NITRITO	>0.122	3
E COLI	PRESENCIA	25
COLIFORMES	PRESENCIA	15
IRCA TOTAL	Inviabile	94.87

Ilustración 4.2.41. Datos de la Prueba 1. Prueba 3: Agua potable del laboratorio N°1

La muestra fue tomada el día 9 de noviembre a las 10:20 a.m. horas, en el laboratorio de química de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, ubicado en el barrio la Pamba, se realiza el protocolo de evaluación (e.g. esterilización) y se inicia el análisis a las 10:50 a.m. en el prototipo y en dispositivos de laboratorio.

El envío de los datos de las características fisicoquímicas se realiza automáticamente a los 10 minutos con 10 segundos; sin embargo, a pesar de que se esperaba que los resultados finales (i.e. análisis microbiológicos) con el respectivo IRCA no lleguen en las próximas 23 horas debido a que al ser un análisis de agua potable la probabilidad de que existiera contaminación microbiológica era mínima, el prototipo realizó detección de *Escherichia Coli* a las 7 horas (Ver Ilustración 4.2.42).

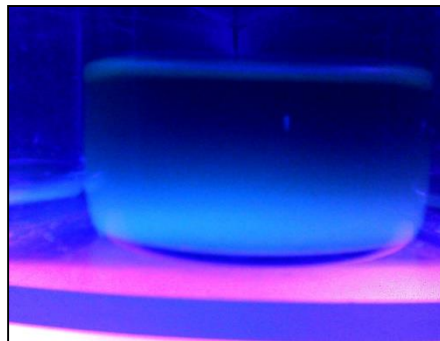


Ilustración 4.2.42. Detección de *Escherichia Coli* en la prueba 3 hora 7.

Los resultados de los análisis (Ver Tabla 4.2.23) del laboratorio se miran 24 horas después; es decir, aproximadamente a las 10:50 a.m. del 10 de noviembre.

Muestra: Agua Potable N°1				
Característica	Valores Laboratorio	Valores Prototipo	Puntaje de riesgo Laboratorio	Puntaje de riesgo Prototipo
Cloro Residual Libre	0.07 mg/L	<0.3	15	15
pH	6.5	6.5	0	0
Nitrito	<0.02 mg/L	<0.02	0	0
Fosfato	0.3 mg/L	<0.5	0	0
Nitrato	<2 mg/L	<2.2	0	0
Hierro	<0.04 mg/L	<0.04	0	0
Turbiedad	0.82 UNT	0.95 UNT	0	0
<i>Escherichia Coli</i>	AUSENCIA	PRESENCIA	0	25
Coliformes Totales	AUSENCIA	PRESENCIA	0	15
IRCA	RIESGO MEDIO	RIESGO ALTO	19.23	70.51

Tabla 4.2.23. Resultados de análisis de la prueba 3 (Agua potable N°1).

Se realiza una comparación entre las muestras (i.e. laboratorio, prototipo) y se corrobora visualmente que en efecto, la prueba 3 en el prototipo presentaba *Escherichia Coli* y la del laboratorio no, por lo que el resultado se clasifica como un resultado atípico por errores aleatorios (Ver Ilustración 4.2.43).

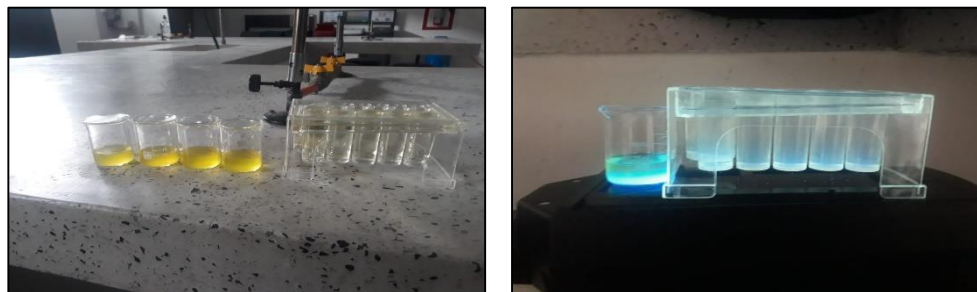


Ilustración 4.2.43. Comparación de color de la muestra analizada en laboratorio y muestra analizada en el prototipo.

Con el fin de verificar completamente que el error no se produjo en el prototipo, se extrajo la muestra de agua analizada en el laboratorio para realizar análisis en el prototipo y en ninguna de las cantidades el prototipo detectó presencia de *Escherichia Coli* o Coliformes Totales (Ver Ilustración 4.2.44).

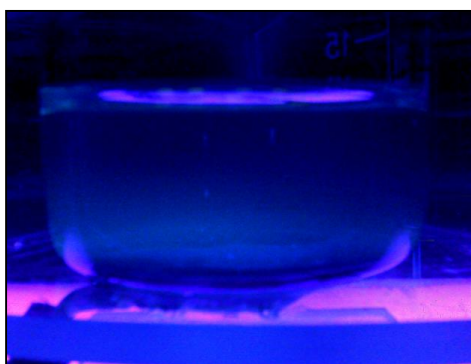


Ilustración 4.2.44. Muestra de laboratorio analizada en el prototipo.

De acuerdo con lo anterior, la causa de los resultados se debe a errores aleatorios en laboratorio, esto quiere decir que es muy probable un error de muestreo que afectó los resultados en el prototipo.

4.2.2.4 Prueba 4: Agua potable del laboratorio N°2

Teniendo en cuenta los resultados de la prueba N° 3, se decide realizar una segunda prueba con agua potable tomando todas las precauciones necesarias y llevando a cabo el protocolo de evaluación rigurosamente y a cabalidad con el fin de obtener una muestra no contaminada y evaluar correctamente el prototipo.

Para la prueba 4 se toma una muestra de hogar en el barrio Santa Helena a las 9:00 de la mañana, se traslada inmediatamente la muestra para los respectivos análisis en el laboratorio y en el prototipo, la muestra se coloca a las 9:39 a.m.

Características de la muestra prueba 1	
Hora de toma	9:00 a.m.
Hora de Análisis	9:39 a.m.
Hora de Resultados	9:40 a.m.
Estado de Email	Enviado

Tabla 4.2.24. Características de la Prueba 4.

Los resultados de la prueba tardan 24 horas en llegar, lo que es indicio de que la muestra no contaba con presencia de *Escherichia Coli* ni Coliformes Totales, se realiza comparación con la muestra evaluada en laboratorio y se corrobora la información (Ver Tabla 4.2.25; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Muestra: Agua Potable N°2				
Característica	Valores Laboratorio	Valores Prototipo	Puntaje de riesgo Laboratorio	Puntaje de riesgo Prototipo
Cloro Residual Libre	0.81	0.74	0	0
pH	7	7	0	0
Nitrito	<0.02	<0.03	0	0
Fosfato	<0.2	<0.5	0	0
Nitrato	<2	<2.2	0	0
Hierro	<0.04	<0.04	0	0
Turbiedad	0.93	0.89	0	0
Escherichia Coli	AUSENCIA	AUSENCIA	0	0
Coliformes Totales	AUSENCIA	AUSENCIA	0	0
IRCA	SIN RIESGO	SIN RIESGO	0	0

Tabla 4.2.25. Resultados de análisis de la prueba 4 (Agua potable N°2).

De acuerdo con los análisis de laboratorio y prototipo, la muestra de la prueba 4 cumple con todos los máximos permisibles normativos por lo que no representa ningún riesgo para el consumo humano.

RESULTADO_2.TXT		
CARACTERISTICA	VALOR	IRCA
pH	7	0
CLORO	0.74	0
TURBIEDAD	0.95	0
NITRATO	<2.2	0
HIERRO	<0.04	0
FOSFATO	<0.5	0
NITRITO	<0.03	0
E COLI	AUSENCIA	0
COLIFORMES	AUSENCIA	0
IRCA TOTAL	SIN RIESGO	0

Ilustración 4.2.45. Resultados prueba 6.

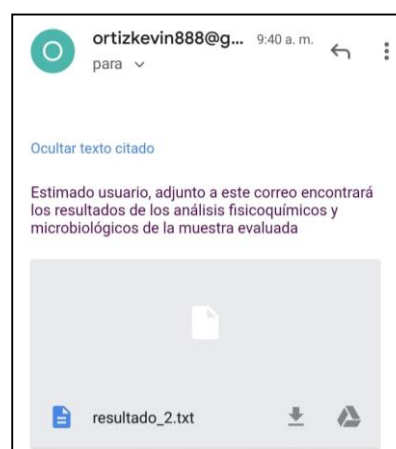


Ilustración 4.2.46. Email prueba 6.

4.2.2.5 Prueba 5: Rio Cauca

Para el análisis de la quinta prueba, se toma como prueba agua del Rio Cauca, la muestra fue tomada el día 11 de noviembre a las 2:00 p.m. horas, se traslada la muestra hasta el laboratorio y se realiza los respectivos análisis a las 2:48 p.m. en el prototipo y en el laboratorio.

El envío de los datos de las características fisicoquímicas se realiza automáticamente a los 10 minutos con 10 segundos y los resultados finales con el respectivo IRCA se realizan a las 3:59 p.m. (Ver Tabla 4.2.26).

Muestra: Rio Cauca

Característica	Valores Laboratorio	Valores Prototipo	Puntaje de riesgo Laboratorio	Puntaje de riesgo Prototipo
Cloro Residual Libre	0.14 mg/L	<0.3	15	15
pH	5	4.5	1.5	1.5
Nitrito	<0.02 mg/L	<0.02	0	0
Fosfato	1.7 mg/L	>0.5	1	1
Nitrato	<2 mg/L	<2.2	0	0
Hierro	<0.04 mg/L	<0.04	0	0
Turbiedad	45.5 UNT	>5.5	15	15
Escherichia Coli	PRESENCIA	PRESENCIA	25	25
Coliformes Totales	PRESENCIA	PRESENCIA	15	15
IRCA	INVIABLE	INVIABLE	92.95	92.95

Tabla 4.2.26. Resultados de análisis de la prueba 5 (Rio Cauca).

Se puede observar que aunque los valores difieren en algunas de las características, el valor IRCA no cambia para ninguna, esto se debe a que en ambas mediciones los valores verificados se mantienen fuera o dentro de los rangos máximos permisibles por la normatividad por lo que su puntaje de riesgo es el mismo en ambos casos.

PRUEBAS_CAUCA.TXT		
CARACTERISTICA	VALOR	IRCA
pH	4.5	1.5
CLORO	<0.3	15
TURBIEDAD	>5.5	15
NITRATO	<2.2	0
HIERRO	<0.04	0
FOSFATO	>0.5	1
NITRITO	<0.02	0
E COLI	PRESENCIA	25
COLIFORMES	PRESENCIA	15
IRCA TOTAL	Inviabile	92.95

Ilustración 4.2.47. Datos de la prueba 5.

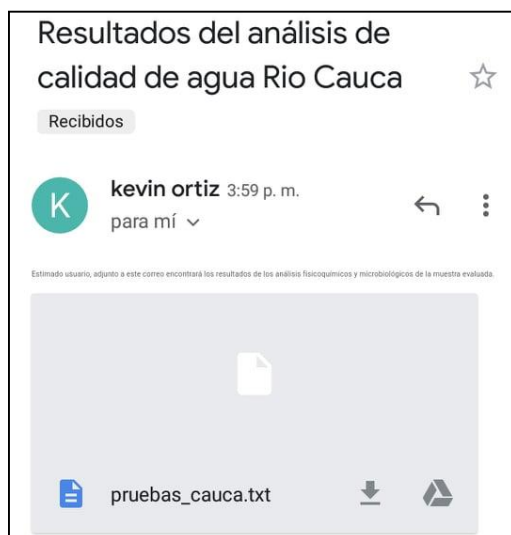


Ilustración 4.2.48. Email de la prueba 5

El valor IRCA es el mismo en ambas mediciones y la detección de Escherichia Coli por parte del prototipo se realizó en 1 hora esto debido al grado de contaminación de la muestra (Ver Ilustración 4.2.47 e Ilustración 4.2.48).

4.2.2.6 Prueba 6: Muestra de Pueblillo

La muestra fue tomada el día 18 de noviembre a las 12:30 p.m. en el sector Pueblillo, se realiza el protocolo de evaluación (e.g. esterilización) y se inicia el análisis a la 1:36 p.m. en el prototipo y en dispositivos de laboratorio.

El envío de los datos de las características fisicoquímicas se realiza automáticamente a los 10 minutos con 10 segundos; la muestra es clara pero los análisis en laboratorio y prototipo indican un valor de 10 UNT y >5.5 respectivamente (Ver Tabla 4.2.27)

Muestra: Pueblillo				
Característica	Valores Laboratorio	Valores Prototipo	Puntaje de riesgo Laboratorio	Puntaje de riesgo Prototipo
Cloro Residual Libre	<0.05 mg/L	<0.3	15	15
pH	7.5	7.5	0	0
Nitrito	<0.02 mg/L	<0.2	0	0
Fosfato	0.3 mg/L	<0.5	0	<0.5
Nitrato	<2 mg/L	<2.2	0	<2.2
Hierro	<0.04 mg/L	<0.04	0	<0.04
Turbiedad	10 UNT	>5.5	15	15
Escherichia Coli	PRESENCIA	PRESENCIA	25	25
Coliformes Totales	PRESENCIA	PRESENCIA	15	25
IRCA	INVIABLE	INVIABLE	89.74	89.74

Tabla 4.2.27. Resultados de análisis de la prueba 6 (Pueblillo).

Los análisis en el prototipo se realizaron completamente luego de 8 horas de iniciado el proceso y luego de 24 horas se observa la muestra en laboratorio. De acuerdo con los rangos de medición ningún valor medido en el laboratorio se encuentra fuera de las mediciones del prototipo, es por esta razón que el valor IRCA es el mismo para el prototipo y para el laboratorio lo que resulta en un indicador inviable sanitariamente para esta muestra de agua.

Características de la muestra prueba 6	
Hora de toma	12:30 p.m.
Hora de Análisis	1:36 p.m.
Hora de Resultados	9:36 p.m.
Estado de Email	Enviado

Tabla 4.2.28. Resumen de características de la prueba 6.

RESULTADOS.TXT		
CARACTERISTICA	VALOR	IRCA
pH	7.5	0
CLORO	<0.3	15
TURBIEDAD	>5.5	15
NITRATO	<2.2	0
HIERRO	<0.04	0
FOSFATO	<0.5	0
NITRITO	<0.2	0
E COLI	PRESENCIA	25
COLIFORMES	PRESENCIA	15
IRCA TOTAL	Inviabile	89.74

Ilustración 4.2.49. Datos de la prueba 6.

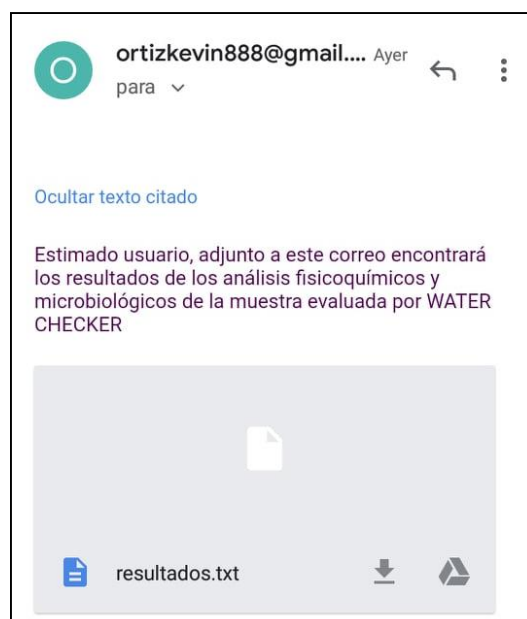


Ilustración 4.2.50. Email de la prueba 6.

A continuación se presenta un resumen del resultado final esperado del prototipo (i.e. clasificación de riesgo IRCA) (Ver Tabla 4.2.29) (Ver Ilustración 4.2.51), donde se grafica un resumen de los valores IRCA de cada prueba y se compara respecto a los análisis realizados en el laboratorio.

PRUEBA	IRCA	
	PROTOTIPO	LABORATORIO
1. Rio Ejido 1	Inviabile	Inviabile
2. Rio Ejido 2	Inviabile	Inviabile
3. Potable 1	Riesgo Alto	Riesgo Medio
4. Potable 2	Sin Riesgo	Sin Riesgo
5. Rio Cauca	Inviabile	Inviabile
6. Pueblillo	Inviabile	Inviabile

Tabla 4.2.29. Resumen de la clasificación del nivel de riesgo de cada prueba evaluada.

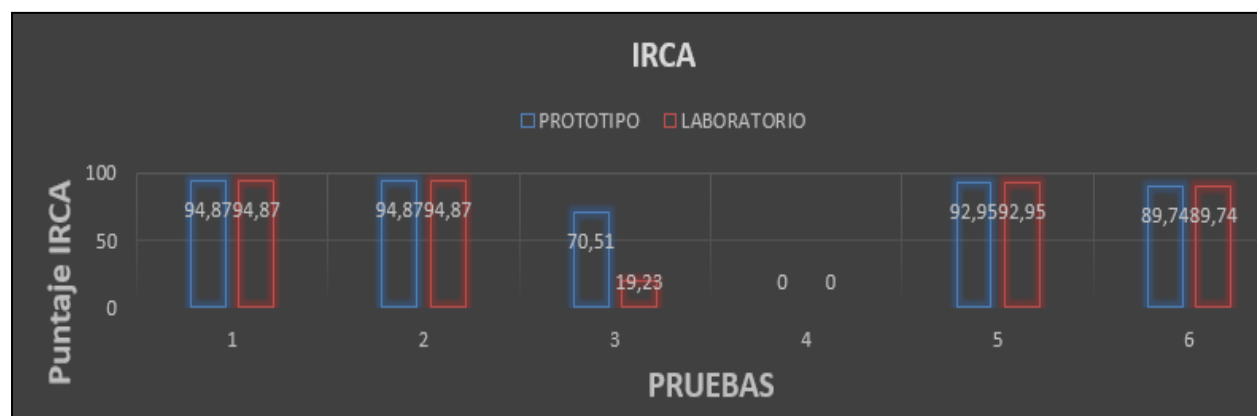


Ilustración 4.2.51. Resumen de nivel de riesgo IRCA de las muestras evaluadas.

5. CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta tesis era abordar el problema de la verificación del indicador IRCA en agua para consumo humano principalmente en los sistemas de suministro que no cuentan con un laboratorio cercano y aportar una solución tecnológica haciendo énfasis en la disminución de tiempo de obtención de resultados.

De ahí que, el aporte principal de este trabajo consista en el diseño e implementación de un prototipo verificador de calidad de agua de consumo conforme a la resolución 2115 del Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por medio de la creación de dos sistemas principales, el primero es el sistema de medición encargado de la obtención de los datos de las características medidas y el segundo, un sistema de procesamiento de datos cuyo fin es la gestión de los valores de las características medidas y como resultado final se tiene la clasificación del nivel de riesgo de consumo de agua en 5 niveles (i.e. inviable sanitariamente, riesgo alto, riesgo medio, riesgo bajo, sin riesgo).

El desarrollo de este prototipo permitió la integración de diferentes áreas, por una parte se encuentra el componente ambiental que se constituyó como base literaria fundamental para la construcción del prototipo y por otra parte se encuentra el componente electrónico, el cual proporcionó herramientas tecnológicas necesarias para la materialización de la idea, todo esto concluyó en la implementación y desarrollo del prototipo verificador de calidad de agua para consumo humano.

La implementación del sistema de medición se divide en tres fases desarrolladas, cada una de las cuales es vital y por lo tanto necesaria para el cumplimiento del objetivo principal del prototipo, la primera de ellas es la fase de esterilización, la cual garantiza un entorno óptimo para iniciar el proceso de verificación de características microbiológicas, realizada a través de una lámpara de luz ultravioleta de onda corta (UVC), la segunda es la fase de dilución y reposo, necesaria para realizar la medición de cada característica en el momento oportuno, este tiempo se encuentra establecido por los fabricantes de los reactivos en los manuales de uso; la última fase es la fase llamada procesamiento, donde gracias a la colorimetría que presentan las muestras debido al uso de reactivos, se logra la captura de imágenes y es a través de esta que se logra la identificación del valor en el que se encuentra cada parámetro medido.

Los resultados finales de esta investigación se encuentran condensados en el capítulo 4, donde se describe el proceso para llevar a cabo las pruebas, evidenciando la necesidad de seguir rigurosamente los protocolos de salubridad, ya que al no tener en cuenta esto, se puede presentar falsos positivos en la muestra inicial, en consecuencia, la medición del equipo podría ser válida pero la muestra podría estar alterada por errores aleatorios en el laboratorio, tal como ocurrió en la prueba de evaluación número tres (i.e. Agua potable del laboratorio N°1).

De acuerdo con lo anterior, luego de un análisis a todas las pruebas de evaluación, se evidenció que entre mayor es la contaminación de la muestra, menor es el tiempo que demora el prototipo en detectar presencia de *Escherichia Coli* y Coliformes, por ejemplo para las pruebas 1 y 2 ambas tomadas en el río Ejido en días diferentes, la prueba 2 se toma luego de una noche de lluvia y la detección tan solo tardó una hora; por su parte, las condiciones climáticas para la toma de la prueba 1 fueron normales y el prototipo tarda 3 horas en reconocer presencia microbiológica.

Para evitar falsos positivos en la detección microbiológica, fue necesario crear mascarar sobre la vigilancia de una muestra en cultivo y se considera que la amplitud de rangos es la adecuada para el reconocimiento o detección de presencia microbiológica.

Es posible la adaptabilidad del prototipo en otros procesos similares como la verificación de calidad de la leche o verificar la calidad de agua para otros usos.

Una de las principales ventaja que ofrece la visión artificial es la comprobación posterior que se puede realizar para verificar que en efecto la medición realizada fue correcta, ya que luego de tener capturada la imagen esta no es

susceptible a cambios colorimétricos respecto al tiempo, es decir guarda el estado de la muestra en el momento de la toma, mientras que en equipos como los de calibración es necesario medir en los tiempos establecidos.

Además, el diseño físico y la visión artificial en los recipientes del prototipo presentan baja sensibilidad a perturbaciones externas; es decir, perturbaciones diferentes a la colorimetría de la muestra; por ejemplo para la medición en el fotómetro en laboratorio es necesario limpiar muy bien el área del recipiente donde se va a medir, ya que este al estar basado en un principio de incidencia de luz puede ser perturbado incluso por huellas dactilares.

5.2.RECOMENDACIONES

Como posibles mejoras en trabajos futuros, se plantean algunos como:

- Optimización de consumo de corriente, cambiando el uso de algunos componentes como la resistencia de calefacción, que si bien, garantiza la estabilización de temperatura en menos de 10 minutos el consumo es aproximadamente 6.5 Amperios, lo que se considera un consumo elevado (Gestión energética).
- Con el fin de interferir lo menos posible en el procedimiento y para garantizar mediciones de mayor precisión y exactitud se proponen automatizar el llenado tanto de las muestras como el goteo y mezcla de reactivos.
- Para la fase de procesamiento es posible usar cámaras de mayor resolución, esto aumentará la precisión y exactitud de los resultados.
- Con el fin de evitar pérdidas de información o fallas por suministro eléctrico se propone la implementación de una batería o acumulador eléctrico como fuente de suministro de respaldo y a su vez pueda permitir mayor portabilidad del prototipo.
- Extender el análisis de las características a través del uso de más reactivos, es decir, implementar la medición de otras características además de las existentes y que se encuentren establecidas dentro de la normatividad.
- De acuerdo con la distribución de la cantidad de muestra en tres o cinco cantidades diferentes en los recipientes, es posible el conteo del número más probable (NMP) en la sección microbiológica, esta es una forma de obtener datos cuantitativos de presencia microbiológica por cada 100ml de agua.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud, "WHO guidelines for drinking- water quality.," *WHO Chron.*, vol. 1, no. 3, p. 408, 2006, [Online]. Available: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf.
- [2] Ministerio de la Protección Social and V. y D. T. Ministerio de Ambiente, "Resolución Número 2115 de 2007," *Minambiente*, p. 23, 2007, [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf.
- [3] ONU, *Resolución 64/292. El derecho humano al agua y al saneamiento*, vol. 660. 2010, pp. 9–11.
- [4] C. F. Fernández and R. Suárez, "Cómo es la calidad del agua en Colombia," *El Tiempo*.
- [5] "OMS | Directrices sobre la calidad del agua potable." https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/es/ (accessed Nov. 19, 2020).
- [6] Ministerio de Salud y Protección Social., "INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO INCA 2016," Bogotá, 2018. Accessed: Nov. 19, 2020. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/ssa-inca-2016.pdf>.
- [7] Ministerio de la Protección Social, *Decreto Número 1575*, no. Mayo 9. 2007, p. 14.
- [8] Universidad de Pamplona, "INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA (Generalidades)," Pamplona, pp. 2–14.
- [9] Instituto Nacional de Salud, *Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio*. Bogotá, 2011.
- [10] Instituto Nacional de Salud, "MANUAL DE USUARIO DEL SOFTWARE SIVICAP WEB 2012 Contenido," Bogotá, 2012. [Online]. Available: https://formularios.dane.gov.co/Anda_4_1/index.php/catalog/285/download/4198.
- [11] WHO UNICEF | JMP, "WHO - UNICEF | JMP." <https://washdata.org/how-we-work/about-jmp> (accessed Nov. 19, 2020).
- [12] Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad del agua potable," 2006. Accessed: Nov. 19, 2019. [Online]. Available: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf?ua=1.
- [13] José Gonzales Alfaro, *Laboratorio de Microbiología (Instrumentación y principios básicos)*, 2nd ed. La Habana, 2004.
- [14] Instituto de Toxicología de la Defensa, "ANÁLISIS DE AGUAS: CONDICIONES GENERALES PARA LA TOMA DE MUESTRAS," Madrid, 2016. Accessed: Sep. 24, 2019. [Online]. Available: https://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/ficheros/ANALISIS_DE_AGUASx_TOMA_DE_MUESTRAS.pdf.
- [15] A. B. Serrano and R. Martínez, "Guía Básica de control de calidad de agua," Madrid. [Online]. Available: <https://www.ongawa.org/wp-content/uploads/2015/09/Agua-CAS-revisar2.pdf>.
- [16] J. E. O. Varón, "Manual de métodos fisicoquímicos básicos para el análisis de aguas para consumo humano." Instituto Nacional de Salud, Bogotá, pp. 1–113, 2011, [Online]. Available: [https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin/SIVICAP/2011 Manual analisis fisico quimico aguas.pdf](https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin/SIVICAP/2011%20Manual%20an%C3%A1lisis%20f%C3%ADsico%20qu%C3%ADmico%20aguas.pdf).
- [17] C. Severiche, M. Castillo, and R. Acevedo, *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas*. Cartagena: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, 2013.
- [18] "ISO 24510:2007." <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:24510:ed-1:v1:en:es>. (accessed Nov. 19, 2020).
- [19] L. S. Clesceri, A. E. Greenberg, and A. D. Eaton, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999.
- [20] Organización Mundial de la Salud, "Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano," *Organ. Mund. la Salud*, p. 83, 2002, [Online]. Available:

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/vigilancia/vigilancia.pdf>.

- [21] Instituto Nacional de Salud, “Sistema de Información de la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano,” 2008. http://aplicacionespruebas.ins.gov.co/sivicap_new/default.aspx (accessed May 11, 2020).
- [22] Consorcio de Aguas de Asturias, “Divulgación: abastecimiento.” <https://consorcioaa.com/divulgacion/ciclo-del-uso-del-agua/divulgacion-abastecimiento/> (accessed Sep. 18, 2019).
- [23] Smart Water, “Agua inteligente | Libelium,” *Libelium*. <https://www.libelium.com/iot-solutions/smart-water/> (accessed Oct. 03, 2019).
- [24] Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 0811 de marzo 5 de 2008*. .
- [25] M. Y. Dueñas-Celis *et al.*, “Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano en zonas urbanas del departamento de Boyacá, Colombia, 2004-2013,” *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 36, no. 3, pp. 101–109, Sep. 2018, doi: 10.17533/udea.rfnsp.v36n3a10.
- [26] C. Gleeson and N. Gray, *The Coliform Index and Waterborne Disease: Problems of microbial drinking water assessment (Google eBook)*, vol. 2002. London: E & FN SPON, 2002.
- [27] “ISO 24510:2007(es),” <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:24510:ed-1:v1:es> (accessed May 12, 2020).
- [28] M. Contaminants, “Analytical Methods Approved for Compliance Monitoring under the Revised Total Coliform Rule,” *Test*, vol. 852, no. June, pp. 1–10, 2008.
- [29] E. Pietrobon Tarrán, “Desinfección por Luz Ultravioleta,” *Ecuador Doc.*, pp. 1–7, 2012, [Online]. Available: <http://ecured.cuwww.agualatinoamerica.com/docs/pdf/3-4-02inter.pdf>.
- [30] A. Renzel, “Disinfection with UVC.” Accessed: Jul. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.uv-technik.co.uk/assets/Uploads/product-documents/Disinfection-with-UV-C-E-v1.4.0.pdf>.
- [31] S. D. S. RAUZY, B. WELTÉ, J.-L. BOUDENNE, P. LEROY, A. MONTIEL, and R. SEUX, “Safety assessment of reactors fitted with ultraviolet lamps and the efficacy of these systems for the disinfection of water intended for human consumption Report and Guidelines,” 2010. Accessed: Jul. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2009sa0002RaEN.pdf>.
- [32] J. M. Martinko, M. T. Madigan, and J. Parker, “Brock,biología de los microorganismos.” PEARSON Educación, p. 1011, 2004, [Online]. Available: www.librosite.net/brock.
- [33] Organización Mundial de la Salud and Organización Panamericana de la Salud, “OPS/OMS | Peligros biológicos.” https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=10838:2015-peligros-biologicos&Itemid=41432&lang=es (accessed Oct. 03, 2020).
- [34] Organización Mundial de la Salud, “E. coli,” 2018. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli> (accessed Oct. 03, 2020).
- [35] “Instructions MPNplate™ Overview.” Accessed: May 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.palintest.com/wp-content/uploads/2019/04/MPNplate-User-manual-v1.pdf>.
- [36] Grupo de Visión del comité Español de Automática, *Conceptos y Métodos en visión por computador*. 2016.
- [37] Awacrom Ltda, “Manual de uso de COLITAG,.” Cali.
- [38] HACH, “Disco de color, 2 piezas, amplio rango de pH | Hach España - Aspectos Generales | Hach.” <https://es.hach.com/disco-de-color-2-piezas-amplio-rango-de-ph/product?id=25318522698#> (accessed Oct. 01, 2020).
- [39] “Raspberry Pi 4 Model B specifications – Raspberry Pi.” <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/> (accessed Oct. 10, 2020).