



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

**MANEJO INTEGRAL DE AGUAS PARA EL SECTOR MIPYME
AGROINDUSTRIAL: CASO DE ESTUDIO “PRODUCTORA DE
AGENTES DE CONTROL BIOLÓGICO”**

**INTEGRAL WATER MANAGEMENT FOR SMALL AND MEDIUM-
SIZE ENTERPRISES: CASE STUDY “A SMALL PRODUCER OF
BIOLOGICAL CONTROL AGENTS”**

Jorge Adrián Castaño Henao

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia

2014

**MANEJO INTEGRAL DE AGUAS PARA EL SECTOR MIPYME
AGROINDUSTRIAL: CASO DE ESTUDIO “PRODUCTORA DE
AGENTES DE CONTROL BIOLÓGICO”**

Jorge Adrián Castaño Henao

INGENIERO QUÍMICO

Tesis presentada como requisito para optar por el título de:

Magíster en ingeniería Química

Director:

Ph.D. Juan Carlos Higuera Vásquez

Codirectora:

Esp. Adela Londoño Carvajal

Grupo de investigación:

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Manizales, Colombia

2014

*Dedicado a mi madre y a mí hermano, porque su amor me mantiene de pie.
A Tere, por la solidaridad conmigo y con mi familia,
y a Mariscal, Harold, Sebas y Vivi, quienes de una u otra forma siempre estuvieron ahí.*

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Juan Carlos Higueta y Adela Londoño, por la oportunidad brindada.

A las doctoras Patricia Eugenia Vélez y María Nancy Estrada, gerentes de la empresa Soluciones Microbianas del Trópico, por la confianza y el respaldo. A Eliana Mendoza, por la amistad y el apoyo incondicional, y al grupo operativo de la empresa, Marcela, Jenny, Pilar, Meardo, Norbey y Álvaro, por toda la colaboración prestada.

RESUMEN

El aumento en la contaminación de las fuentes de agua y la escasez del recurso, hacen necesario el desarrollo de estrategias de manejo integral del agua en todos los sectores involucrados en su uso. En Colombia el sector MIPYME agroindustrial es especialmente atractivo para la elaboración de una metodología de manejo integral del agua, ya que los proyectos orientados al uso eficiente del recurso hídrico y a la minimización del impacto ambiental se ha identificado como prioritarios dentro de las agrocadenas. De esta manera se busca fomentar la competitividad y el desarrollo de un sector con alto impacto en la población más vulnerable del país, como la asociada al sector agrario y rural.

Este documento presenta una metodología para elaborar propuestas de manejo integral de agua en MIPYMES del sector agroindustrial. La metodología recoge las principales estrategias de manejo integral del sector industrial, presentándolas en una forma que permita utilizarlas de manera sencilla y usando información básica. Se incluye una metodología para selección de alternativas atendiendo a múltiples criterios de selección, y una guía para la elaboración del diagnóstico frente al manejo del agua.

El trabajo es complementado con la aplicación de la metodología a una microempresa agroindustrial productora de agentes de control biológico, donde además se realiza un estudio para el aprovechamiento de parte de sus aguas residuales. Los resultados muestran la eficacia de la metodología propuesta, evidencian la viabilidad técnica y sugieren la viabilidad económica del aprovechamiento de una parte de las aguas residuales de la empresa.

Palabras clave:

MIPYME, Manejo integral agua; gestión integral agua; aprovechamiento agua residual; valorización agua residual.

ABSTRACT

The increase in the pollution of water sources and the scarcity of the resource, make necessary the development of strategies for integrated water management in all sectors involved in its use. In Colombia, the government has identified problems related to inefficient water use and environmental impact caused by small and medium enterprises (SME's) of the agro-industrial sector. Because of this, agro-industrial related companies are especially attractive to elaborate a methodology for integral water management (IWM). Thus, the competitiveness and the development of that sector is fomented, achieving a positive impact in the rural population who are in a particular high vulnerability situation in this country.

This document presents a methodology to make IWM proposals in SME's of the agro-industrial sector. The methodology use basic information and covers the main IWM industrial strategies applying it in an easy manner. A specific methodology for the selection of possible water treatment alternatives through multiple decision criteria and a guide for the diagnostic step of water treatment are also included.

This work is further complemented with the application of the proposed methodology to a small producer of biological control agents (BCA's) company. In addition, a study was made in order to reuse part of the enterprise's wastewater. The results obtained show the efficacy of the methodology used and leads to the conclusion that wastewater reuse is technically and economically feasible.

Key words:

SME's, Integral Water Management; Wastewater reuse; Wastewater Valorization.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
TABLA DE CONTENIDO	VII
LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIACIONES	XII
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XVI
INTRODUCCIÓN	XVIII
HIPÓTESIS	XX
OBJETIVO GENERAL	XX
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	XX
CAPÍTULO 1	1
1. MIPYMES Y MANEJO INTEGRAL DEL AGUA.....	1
1.1. IMPORTANCIA DE LAS MIPYMES	1
1.2. HERRAMIENTAS PARA LA COMPETITIVIDAD DE LA MIPYME AGROINDUSTRIAL EN COLOMBIA.....	2
1.3. MIPYME AGROINDUSTRIAL.....	3
1.4. ESTRATEGIAS DE MANEJO INTEGRAL DE AGUA.....	4
1.5. REFERENCIAS	6
CAPÍTULO 2	8
2. METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL DE AGUA EN EL SECTOR MIPYME AGROINDUSTRIAL	8
2.1. RESUMEN.....	8
2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA.....	9
2.2.1. Áreas de decisión	9
2.2.2. Etapas de la metodología de toma de decisiones	9
2.3. ÁREA 1: ABASTECIMIENTO DE AGUA	14
2.3.1. Restricciones en el área	15
2.3.2. Alternativas habituales para abastecimiento de agua.....	15
2.3.3. Evaluación de riesgos.....	16
2.3.4. Recomendaciones para selección entre dos o MÁS FUENTES de agua.....	17

2.3.5.	Resumen de escenarios y procedimientos	18
2.4.	ÁREA 2: TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA	18
2.4.1.	Restricciones en el área	19
2.4.2.	Alternativas habituales para tratamiento de aguas crudas	20
2.4.3.	Criterios de evaluación y factores asociados.....	21
2.4.4.	Selección de alternativas	22
2.5.	ÁREA 3: MANEJO DE AGUA EN EL PROCESO PRODUCTIVO Y ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS.....	23
2.5.1.	Restricciones en el área	23
2.5.2.	Alternativas para manejo del agua de proceso.....	23
2.5.3.	Criterios de evaluación y factores asociados.....	25
2.5.4.	Selección de alternativas	26
2.6.	ÁREA 4: GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	26
2.6.1.	Restricciones en el área	26
2.6.2.	Alternativas para el aprovechamiento de aguas residuales.....	27
2.6.3.	Alternativas para el tratamiento de aguas residuales	27
2.6.4.	Vertimiento sobre suelos	28
2.6.5.	Criterios de evaluación y selección de alternativas	29
2.7.	DIAGNÓSTICO.....	29
2.7.1.	Elementos generales del diagnóstico	29
2.7.2.	Elementos adicionales para el área de abastecimiento	31
2.7.3.	Elementos asociados a la caracterización de la fuente de agua	32
2.7.4.	Elementos adicionales para el área de proceso	34
2.7.5.	Elementos adicionales para el tratamiento de agua cruda	34
2.7.6.	Elementos adicionales para la gestión de vertimientos	35
2.8.	REFERENCIAS	35
CAPÍTULO 3	.....	38
3.	ESTUDIO DE CASO: MICROEMPRESA AGROINDUSTRIAL PRODUCTORA DE AGENTES DE CONTROL BIOLÓGICO (BCA's).....	38
3.1.	DIAGNÓSTICO.....	38
3.1.1.	Generalidades.....	38
3.1.2.	Caracterización del agua cruda	42
3.1.3.	Área de proceso.....	43
3.1.4.	Gestión de aguas residuales	44
3.2.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO	45
3.2.1.	Restricciones	45
3.2.2.	Selección de fuentes de abastecimiento.....	45

3.2.3.	Formulación/Selección de alternativas de captación, conducción y almacenamiento de agua cruda	45
3.2.4.	Evaluación del riesgo por variaciones de calidad	45
3.3.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA ADECUACIÓN DE AGUA CRUDA.....	46
3.3.1.	Restricciones	46
3.3.2.	Alternativas para el tratamiento del agua cruda.....	46
3.3.3.	Evaluación de alternativas	46
3.4.	ALTERNATIVAS PARA EL ÁREA DE PROCESO (PARTE A)	47
3.4.1.	Tecnologías para el ahorro en el consumo de agua.....	47
3.4.2.	Buenas prácticas de manejo de agua.....	47
3.5.	ALTERNATIVAS PARA EL ÁREA DE PROCESO (PARTE B): SELECCIÓN DE UNA RED INTEGRADA DE AGUA.....	48
3.5.1.	Consideraciones iniciales	48
3.5.2.	Selección de contaminante clave.....	48
3.5.3.	Identificación de fuentes, demandas y restricciones	49
3.5.4.	Tablas de fuentes y demandas.....	49
3.5.5.	Red de manejo de agua de consumo mínimo:	50
3.5.6.	Redes alternativas de manejo de agua:.....	51
3.5.7.	Evaluación de alternativas	53
3.5.8.	Selección	53
3.6.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA GESTIÓN DE VERTIMIENTOS	53
3.6.1.	Restricciones	53
3.6.2.	Alternativas de gestión de vertimientos	54
3.6.3.	Evaluación de alternativas	56
3.6.4.	Selección	57
3.7.	RESUMEN DE LA PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL DE AGUAS EN LA EMPRESA DEL CASO DE ESTUDIO.....	58
3.7.1.	ABASTECIMIENTO DE AGUA	58
3.7.2.	Tratamiento de aguas crudas	58
3.7.3.	Manejo de aguas de proceso.....	58
3.7.4.	Gestión de vertimientos	58
3.8.	CONCLUSIONES	59
3.9.	REFERENCIAS	59
CAPÍTULO 4	.....	61
4.	ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI)	61
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	61
4.2.	MARCO GENERAL	62

4.2.1.	Crecimiento de hongos	62
4.2.2.	Métodos comerciales de producción de AGENTES FUNGICOS PARA CONTROL BIOLÓGICO (BCA's).....	62
4.2.3.	Variables de operación para fermentación sumergida en sistemas discontinuos.....	63
4.2.4.	Medidas de crecimiento microbiano.....	64
4.2.5.	Control de contaminación microbiana.....	66
4.2.6.	aprovechamiento DEL Agua residual industrial (ARI).....	66
4.2.7.	Importancia del uso de aguas residuales en la producción de agentes de control biológico (BCA's) 67	
4.2.8.	Modo de acción de los biocontroladores.....	68
4.2.9.	Condiciones de fermentación sumergida en la empresa del caso de estudio	69
4.3.	METODOLOGÍA GENERAL PARA EL ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DEL ARI.....	70
4.3.1.	Fase 1: Cultivos en medio líquido industrial (MLI)	71
4.3.2.	Fase 2: Cultivos en agua residual industrial (ARI)	71
4.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	73
4.4.1.	Conservación de cepas	73
4.4.2.	Preparación de inóculo	73
4.4.3.	Medios para las fermentaciones	74
4.4.4.	Recolección y manejo del ARI	74
4.4.5.	Condiciones de fermentación	74
4.4.6.	Seguimiento temporal UFC y esporas en la fase 1.....	75
4.4.7.	Control de contaminación	76
4.4.8.	Determinación de UFC y esporas en la fase 2.	76
4.5.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	76
4.5.1.	Resultados fase 1: Cultivos en medio líquido industrial (MLI).....	76
4.5.2.	Conclusiones fase 1.....	78
4.5.3.	Resultados fase 2: fermentaciones en agua residual industrial	79
4.5.4.	Conclusiones fase 2.....	80
4.6.	ANÁLISIS ECONÓMICO	80
4.6.1.	Alternativas de aprovechamiento.....	80
4.6.2.	Análisis económico alternativa 1	82
4.6.3.	Análisis económico alternativa 2.....	83
4.6.4.	Resultados y conclusiones	86
4.7.	REFERENCIAS	87
	CONCLUSIONES GENERALES.....	90
	PERSPECTIVAS.....	91
	ANEXO 1.....	92

Contenido

METODOLOGÍA PARA OBTENER LA RED INTEGRADA DE CONSUMO MÍNIMO DE AGUA	92
MATERIAL RECOVERY PINCH DIAGRAM (MRPD)	92
NEAREST NEIGHBORS ALGORITHM (NNA)	95
ANEXO 2.....	101
TABLAS DE DATOS FIGURAS 17-22	101

LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

Tabla I: Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad	Ecuación
A, B, C, D	Constantes para el índice de Langelier		Ec. 2
LSI	Índice de Langelier		Ec. 1
pH	Potencial de hidrógeno		Ec. 1
Y	Concentración de contaminante hipotético	mg/L	Ec. 4
MP	Monto total a pagar por tasa retributiva anual	COP/año	Ec. 7
T_{mi}	Tarifa mínima de contaminante i	COP/kg	Ec. 7
C_i	Carga anual de contaminante en el vertimiento	kg/año	Ec. 7
F_i	Flujo fuente de agua i		Ec. 10 - Ec. 13
F_{ij}	Flujo de la fuente i , hacia la demanda j		
CF_i	Concentración de contaminante en la fuente i		Ec. 5, Ec. 6, Ec. 10 - Ec. 13
D_j	Flujo demanda de agua j		
CD_j	Concentración de contaminante en la demanda j		

Tabla II: Siglas y abreviaciones

Término	Significado
MIPYME	Micro, pequeña y mediana empresa
BCA's	Agentes de control biológico
CER	Complejo económico rural
DBO5	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
SST	Sólidos suspendidos totales
SP	Sedimentador primario
VARDL	Volumen diario de agua residual de lavado
SS	Sedimentador secundario
UFC	Unidades formadoras de colonia
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
COP	Peso colombiano

Tabla III: Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad	Ecuación
α	Constante	mg/L/NTU	Ec. 4

Tabla IV: Subíndices

Subíndice	Término	Ecuación
0	Fuente de agua	Ec. 5, Ec. 6
i, j, k	Índices de fuentes, demandas, contaminantes y contadores	Ec. 5 - Ec. 13
m	Índice de fuentes totalmente consumidas	Ec. 12, Ec. 13

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación micro, pequeña y mediana empresa en Colombia.....	1
Tabla 2: Ejemplo evaluación de alternativas.....	13
Tabla 3: Alternativas de conducción	16
Tabla 4: Alternativas de captación	16
Tabla 5: Factores de riesgo de discontinuidad en el abastecimiento.....	17
Tabla 6: Factores de contaminación de la fuente	17
Tabla 7: Escenarios y actividades en el área de abastecimiento de agua.....	18
Tabla 8: Guías de calidad para usos del agua y tecnologías de tratamiento.....	19
Tabla 9: Tecnologías convencionales para tratamiento de aguas.....	20
Tabla 10: Esquemas de tratamiento para potabilización de aguas.....	20
Tabla 11: Tecnologías para aguas de enfriamiento y calderas.....	21
Tabla 12: Tecnologías no convencionales para tratamiento de aguas	21
Tabla 13: Factores de inversión inicial para sistemas de tratamiento.....	22
Tabla 14: Factores de gastos de operación para sistemas de tratamiento.....	22
Tabla 15: Factores de confiabilidad para sistemas de tratamiento	22
Tabla 16: Factores de complejidad en la operación de una red de manejo de agua	25
Tabla 17: Alternativas para sistemas de riego	27
Tabla 18: Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.....	28
Tabla 19: Tecnologías para disposición de vertimientos sobre el suelo	29
Tabla 20: Elementos generales del diagnóstico.....	30
Tabla 21: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de abastecimiento	31
Tabla 22: Elementos asociados a la caracterización de la fuente.....	32
Tabla 23: Parámetros mínimos de caracterización para algunos usos del agua	33
Tabla 24: Relación entre características de las fuentes de agua y las condiciones ambientales	34
Tabla 25: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de proceso	34

Tabla 26: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de tratamiento de agua cruda	34
Tabla 27: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de gestión de vertimientos	35
Tabla 28: Productos elaborados en la empresa.....	38
Tabla 29: Frecuencia de algunas actividades de proceso	40
Tabla 30: Personal de la empresa	41
Tabla 31: Resultados caracterización de agua cruda	42
Tabla 32: Balance de agua	44
Tabla 33: Exigencias vertimientos y resultados caracterización del agua residual industrial.....	44
Tabla 34: Matriz de evaluación de alternativas para tratamiento de agua cruda	47
Tabla 35: Demandas de agua dentro del proceso	49
Tabla 36: Fuentes de agua dentro del proceso.....	50
Tabla 37: Matriz de evaluación de alternativas para redes integradas de manejo de agua de proceso	53
Tabla 38: Eficiencias de remoción típicas en unidades de tratamiento de aguas residuales.....	54
Tabla 39: Estimación de eficiencias, remociones y concentración de contaminantes en el efluente, con las alternativas propuestas	56
Tabla 40: Matriz de evaluación de alternativas para la gestión de vertimientos	57
Tabla 41: Condiciones típicas para fermentación sumergida.....	64
Tabla 42: Medio líquido industrial (MLI)	69
Tabla 43: Variables de operación para la fermentación sumergida en la empresa	70
Tabla 44: Tipos de medidas en cada fase experimental.....	72
Tabla 45: Ahorro en materias primas.....	82
Tabla 46: Datos tasa retributiva para DBO y SST.....	83
Tabla 47: Costos unitarios laborales y de servicios	83
Tabla 48: Costos de mano de obra	84
Tabla 49: Costos de aditivos.....	84
Tabla 50: Costos de insumos.....	84
Tabla 51: Costo servicio de agua.....	84
Tabla 52: Costos servicio eléctrico.....	85
Tabla 53: Costos de producción	85

Tabla 54: Costos totales	85
Tabla 55: Ingresos esperados por venta del producto	86
Tabla 56: Fuentes y demandas.....	93
Tabla 57: Concentración promedio de UFC –B. bassiana (Figura 17).....	101
Tabla 58: Concentración promedio de esporas – B. bassiana (Figura 17)	101
Tabla 59: Concentración promedio de UFC – P. lilacinus (Figura 18)	101
Tabla 60: Concentración promedio de esporas - P. lilacinus (Figura 18).....	101
Tabla 61: Concentración promedio de UFC - T. harzanium (Figura 19)	102
Tabla 62: Concentración promedio de esporas - T. harzanium (Figura 19).....	102
Tabla 63: Concentración promedio de UFC - T. harzanium (Figura 20)	102
Tabla 64: Concentración de UFC en ARI (Figura 21)	102
Tabla 65: Concentración de UFC en ARI + ácido láctico (Figura 21)	102
Tabla 66: Concentración promedio de UFC en ARI esterilizada (Figura 22)	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la metodología para toma de decisiones	10
Figura 2: Matriz de evaluación de alternativas propuesta para este trabajo	11
Figura 3: a) Red de manejo con reutilización manual del agua. b) Red de manejo con reutilización por bombeo del agua y eliminación del vertimiento	13
Figura 4: Diagrama de flujo de proceso de producción de agentes de control biológico	39
Figura 5: Red integrada de consumo mínimo de agua	50
Figura 6: Reciclaje de agua de enfriamiento – Alternativa 2	52
Figura 7: Reutilización del agua de enfriamiento en la planta de tratamiento - Alternativa 3	52
Figura 8: Distribución sugerida para los sistemas de tratamiento de aguas en la empresa del caso de estudio.	57
Figura 9: Colonias de <i>T. Harzanium</i> en agar rosa de bengala	65
Figura 10: Colonias de <i>B. bassiana</i> en agar sabouraud	65
Figura 11: Sección de cámara de Neubauer con esporas de <i>T. harzaniun</i>	65
Figura 12: Cultivos de laboratorio donde se evidencian los pellets de: a) <i>Paecilomyces. lilacinus</i> y b) <i>Trichoderma harzanium</i>	70
Figura 13: Esquema metodológico para la Fase 2	72
Figura 14: Diagrama de flujo preparación de inóculo	73
Figura 15: a) Recipientes para recolección de agua residual industrial (ARI); b) Frasco con muestra de (ARI)	74
Figura 16: Procedimiento para obtención de UFC y conteo de esporas	75
Figura 17: Curva de concentración de UFC y esporas para <i>B. bassiana</i>	76
Figura 18: Curva de concentración de UFC y esporas para <i>P. lilacinus</i>	76
Figura 19: Curva de concentración de UFC y esporas para <i>T. harzanium</i>	77
Figura 20: Curva de <i>T. harzanium</i> cuando se inoculó simultáneamente con <i>P. lilacinus</i> y <i>B. bassiana</i>	78
Figura 21: Resumen resultados en cultivos sobre ARI sin esterilizar	79
Figura 22: Resultados en ARI esterilizada y MLI	79
Figura 23: Diagrama de flujo para valorización de la corriente de agua residual	81

Figura 24: Resultados análisis económico (E1: Escenario 1; E2: Escenario 2).....	86
Figura 25: a) Unidad con fuente y demanda de agua b) Unidad solo con demanda de agua	92
Figura 26: Gráficas de demandas y fuentes de agua	94
Figura 27: Gráficas de demandas y fuentes de agua con consumo mínimo de agua fresca	94
Figura 28: Esquema balance de materia básico para el algoritmo NNA.....	95
Figura 29: Esquema balance de materia general para el algoritmo NNA	96
Figura 30: Matriz gráfica para redes integradas de agua.....	97
Figura 31: Conexión de fuentes y demandas en el NNA	98
Figura 32: Red integrada de agua de consumo mínimo	99
Figura 33: Redes alternativas para manejo integrado de agua.....	99

INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua se ha convertido en uno de los objetivos del sector industrial debido a la creciente preocupación por el medio ambiente, a la escasez del recurso hídrico y a los mayores estándares de calidad de los productos [1]. En este sentido se han desarrollado diferentes estrategias que persiguen en orden de prioridad la prevención del desperdicio del agua, la minimización del consumo, la reutilización, el reciclaje, el aprovechamiento y por último su disposición final o tratamiento.

Algunas de estas estrategias implican cambios en el proceso como: eliminación o sustitución de materias primas contaminantes o peligrosas, uso de tecnologías ahorradoras, segregación de residuos o corrientes de agua residual, valorización energética de residuos, valorización de corrientes residuales en la elaboración de productos secundarios y el compromiso con programas de calidad y mejoramiento continuo.

A mediados de los años 80 aparecieron nuevas metodologías de manejo de agua para el sector industrial inspiradas en los conceptos de integración de procesos [2]. Estas estrategias agrupan de manera sistemática la segregación, la reutilización y el reciclaje con el objetivo de minimizar el consumo de agua y reducir al mínimo los residuos líquidos con necesidades de tratamiento [3], [4]. Las metodologías han ido evolucionando e integrando nuevos aspectos que permiten su aplicación a casos cada vez más complejos, abordando procesos discontinuos e incluso el cumplimiento de requerimientos ambientales y de calidad que atienden a múltiples contaminantes en las aguas [5]–[9].

A pesar de estos progresos, la implementación de metodologías de manejo integral de agua en la micro, pequeña y mediana empresa (MIPYME) agroindustrial es escasa y poco sistemática [10]. Esto se debe a diferentes aspectos como: recursos limitados del sector, problemas de abastecimiento de agua de buena calidad por su ubicación fuera de áreas metropolitanas, desconocimiento de la normatividad ambiental y complejidad de las metodologías de manejo integral a la hora de ser aplicadas.

Este trabajo parte de la hipótesis de que es posible plantear una metodología de manejo integral de agua para el sector MIPYME agroindustrial que esté acorde a sus necesidades y limitaciones. Dicha metodología debe cumplir con los siguientes objetivos:

- Ser sistemática y de fácil aplicación.
- Estar acorde a los principios de la producción más limpia y la gestión integral del aprovechamiento del agua, priorizando la minimización del gasto, la reutilización, el reciclaje y el aprovechamiento.
- Tener en cuenta los intereses particulares de los empresarios.
- Adaptarse a los escenarios más complejos del sector.
- Cumplir con la legislación ambiental en materia de aguas.

La propuesta busca fomentar el desarrollo y la competitividad del pequeño sector industrial agrícola, para beneficiar la población rural donde la pobreza y la pobreza extrema tienen los indicadores más altos del país [11]. También está acorde a las políticas nacionales de desarrollo económico [12], a la política nacional para la gestión integral del recurso hídrico [13] y sigue los lineamientos tecnológicos definidos por el gobierno Colombiano, de acuerdo a los cuales deben priorizarse los proyectos orientados al uso eficiente del agua y a la minimización del impacto ambiental de las agrocadenas [14].

La metodología se construyó a partir de la identificación de los peores escenarios para empresas del sector, de la revisión de las estrategias de manejo integral de agua para el sector industrial y de la exploración de

metodologías de selección de alternativas de potabilización, abastecimiento y tratamiento de aguas residuales para pequeñas poblaciones del sector rural.

El documento consta de cuatro capítulos. El primero presenta la importancia del pequeño sector empresarial del país en la superación de problemas de desempleo y pobreza, destacando su impacto en el sector rural. Luego relaciona algunos de los estudios hechos por el gobierno para direccionar apropiadamente los esfuerzos encaminados al desarrollo microempresarial y agrícola, y finalmente muestra algunas de las características más relevantes del sector MIPYME agroindustrial y las metodologías comunes para manejo integral del agua en el sector industrial.

El capítulo 2, corresponde en sí mismo a la metodología propuesta de manejo integral del agua. Está organizado en 6 secciones, de ellas cuatro corresponden a las áreas donde deben seleccionarse alternativas de manejo de agua. Una sección contiene la propuesta para la evaluación y selección de alternativas teniendo en cuenta criterios múltiples que puedan incluir objetivos ambientales, económicos, e intereses particulares de la empresa. El capítulo finaliza con una guía para el proceso de diagnóstico que permite aplicar fácilmente la metodología.

En el capítulo 3 se aplica la metodología a una microempresa agroindustrial productora de agentes de control biológico, y el capítulo 4 presenta un estudio para el aprovechamiento de una parte de las aguas residuales de la empresa, donde se analizan los resultados desde el punto de vista económico.

Para la elaboración de la propuesta de aprovechamiento se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Contribuir al conjunto de conocimientos en un área de alto interés ambiental, al desarrollarla en el marco de la producción agrícola más limpia, que busca entre otros la sustitución del uso de agroquímicos, por sustancias más amigables con el medio ambiente, como los biocontroladores.
- Estar acorde a los principios del manejo integral del agua con sus implicaciones positivas desde lo ambiental y económico.
- Seguir las tendencias investigativas de mayor potencial en el área de la producción de agentes microbianos para control biológico.
- Incluir los intereses económicos y comerciales de la empresa.

A través de la aplicación de la metodología, logra elaborarse una estrategia de manejo integral para la empresa del caso de estudio que está acorde a sus objetivos de calidad, permite ahorros en el consumo de agua, cumple con la normatividad ambiental vigente y consigue el aprovechamiento de una corriente de agua residual, demostrando su viabilidad técnica y las ventajas económicas de su implementación.

HIPÓTESIS

Es posible plantear una metodología de manejo integral de agua para el sector MIPYME agroindustrial, que permita proponer una alternativa para el aprovechamiento de parte de las aguas residuales de la empresa del caso de estudio.

OBJETIVO GENERAL

Construir una metodología para la elaboración de propuestas de manejo integral de aguas para MIPYMES agroindustriales, fácil de implementar y acorde a las limitaciones del sector.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Identificar limitaciones del sector MIPYME agroindustrial en lo relacionado al manejo del agua.
- II. Identificar estrategias de manejo integral de agua con aplicación en el sector MIPYME agroindustrial y que puedan integrarse en la metodología a proponer.
- III. Proponer una estrategia para evaluación de alternativas de manejo de agua que oriente el proceso de selección. La estrategia debe ser fácil de implementar y debe permitir la evaluación a través de criterios múltiples que incluyan intereses o preferencias de la empresa.
- IV. Elaborar una guía para el proceso de diagnóstico del manejo del agua en MIPYMES agroindustriales.
- V. Elaborar una propuesta de manejo integral de aguas para la microempresa del caso de estudio implementando la metodología desarrollada.
- VI. Realizar un estudio técnico para el aprovechamiento de parte de las aguas residuales de la empresa del caso de estudio que incluya el análisis económico preliminar.

CAPÍTULO 1

1. MIPYMES Y MANEJO INTEGRAL DEL AGUA

1.1. IMPORTANCIA DE LAS MIPYMES

Las MIPYMES comprenden un amplio grupo de entidades dedicadas a la generación de beneficio económico en distintos sectores como el agropecuario, industrial, comercial y de prestación de servicios. La definición varía entre países, y comúnmente se realiza en términos de ventas, activos o número de empleados [15]. Para el caso Colombiano, el tamaño de la micro, pequeña y mediana empresa está definido en la ley 905 de 2004 (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación micro, pequeña y mediana empresa en Colombia

Tipo de empresa	Número de empleados	Activos totales (smlmv [†])
Micro	Inferior a 10	Inferior a 500
Pequeña	Entre 11 y 50	Entre 501 y 5 000
Mediana	Entre 51 y 200	Entre 5 001 y 30 000

Fuente: Ley 905 de 2004

† Salario mínimo legal mensual vigente

Los mayores aportes del sector MIPYME se evidencian en el contexto social y económico a través de la generación de empleo y la reducción de las desigualdades sociales. En materia laboral, las MIPYME suelen absorber un alto porcentaje de la población desempleada debido a que son intensivas en mano de obra más que en maquinaria [16], es decir que emplean más personas para las actividades diarias en relación con las grandes empresas. Por otro lado, las MIPYME permiten una distribución más equitativa de la riqueza gracias al aumento en la productividad de los más pobres.

En Colombia, una de las situaciones más precarias se presenta en el sector rural. La línea de pobreza y la línea de extrema pobreza son dos indicadores de ingresos por debajo de los cuales no pueden satisfacerse las necesidades básicas, y las necesidades básicas alimentarias respectivamente. Según estadísticas del DANE, para el año 2010 la pobreza rural fue del 50.3 %, y la pobreza urbana del 33%. Lo más preocupante es que la pobreza extrema del sector rural triplicó a la urbana en el mismo año [11].

Uno de los enfoques más simples para entender esta situación se basa en el concepto de “Complejo Económico Rural” (CER). Según dicho concepto, existen cuatro polos de acumulación de valor en la dinámica económica rural. El polo de provisión de insumos, el de producción agropecuaria básica o primaria, el polo de transformación de la producción primaria y el de comercialización [17]. Cada uno de estos polos genera valor por sí mismo y acumula o pierde valor en la interacción con los otros polos. El polo de producción agropecuaria

básica o primaria, genera valor en productos obtenidos del uso directo de la tierra. Dicho valor es el que pasa al productor rural, pero gran parte se pierde con el polo de insumos agrícolas o queda en manos del polo de comercio debido a los intermediarios. Ya que los productos obtenidos del uso directo de la tierra son de escaso valor agregado, normalmente los productores no alcanzan a percibir utilidades dentro del complejo económico rural, lo que en parte explica la situación de pobreza en el sector.

En este sentido es evidente el potencial de la MIPYME como una herramienta que permite a la población rural acceder a bienes y servicios. Gracias a las MIPYMES las familias campesinas, los pequeños propietarios rurales y los inversionistas del sector pueden mejorar sus ingresos al acumular valor en actividades propias de los polos de mayor generación de valor, como el de transformación de la producción y comercio. Además La población rural sin tierra suficiente, y por tanto no vinculada al polo de producción agropecuaria básica, tienen una nueva opción de empleo y por tanto de recursos para suplir sus necesidades básicas [18].

En Colombia han surgido durante las últimas décadas mecanismos para el apoyo de las MYPIME que pretenden fomentar la competitividad del sector y brindar soporte financiero [19]. Algunos ejemplos son las políticas específicas para el sector dentro del Plan Nacional de Desarrollo, la creación de fondos como FOMIPYME y el fondo de capital de riesgo para la empresa rural, el surgimiento de entidades como los parques industriales, parques tecnológicos, centros de investigación e incubadoras de MIPYME, y el apoyo de instituciones como el SENA, Colciencias, Bancóldex y Proexport. [20]. En la siguiente sección se presentan con más detalle algunas de las herramientas para el mejoramiento de la competitividad del sector y su relación con el proyecto.

1.2. HERRAMIENTAS PARA LA COMPETITIVIDAD DE LA MIPYME AGROINDUSTRIAL EN COLOMBIA

Para hacer frente a los cambios y retos que implica la economía globalizada, el gobierno Colombiano introdujo en la década de los noventa el modelo de apertura económica. Con éste, la política industrial buscó la liberación del comercio y una mayor participación en los mercados externos. El nuevo enfoque generó dos cambios fundamentales en el contexto de las empresas. Por una parte se encontraron menos protegidas ya que la disminución de los aranceles atrajo más competidores extranjeros, pero de otro lado se favoreció el ambiente para las exportaciones, a la vez que se ampliaron los mercados [18].

La estrategia del gobierno para aprovechar las ventajas del modelo de apertura, y para minimizar sus desventajas, se centró en el fomento a la competitividad empresarial, buscando mayores rendimientos, altos niveles de calidad y el posicionamiento en los mercados [21]. Los progresos más significativos se empezaron a dar desde el año 1994 con la creación del Consejo Nacional de Competitividad a través del Decreto 2011 de 1994, y la aprobación de la “Política Nacional de Ciencia y Tecnología”, CONPES 2739 de 1994. Avances posteriores y nuevos retos derivados de la globalización económica condujeron a la aprobación de la “Política Nacional de Competitividad y Productividad”, CONPES 3527 del año 2008. En dicha política se identifican 12 ejes problemáticos, que obstaculizan el mejoramiento de la competitividad dentro de los que se destacan la poca sofisticación y baja agregación de valor en los procesos productivos, la baja productividad del sector agropecuario, los bajos niveles de innovación y de absorción de tecnologías, y la degradación ambiental como limitante de la competitividad.

En concordancia con estos obstáculos, se establecen dentro del mencionado documento, varios planes de acción cuyo objetivo es el mejoramiento de la competitividad industrial. En las herramientas incluidas en los planes es evidente el papel fundamental de la variable tecnológica y el fomento a su uso para la solución de obstáculos de competitividad. Algunas de las herramientas, que se enfocan de manera puntual al sector MIPYME agroindustrial se presentan a continuación.

- Financiamiento de proyectos de innovación en los sistemas de producción agropecuaria.

- Incentivos a la asistencia técnica en los sistemas de producción agropecuaria.
- Promoción de sectores de clase mundial en el sector agropecuario, como el de biotecnología.
- Elaboración de agendas de innovación tecnológica por cadena productiva, tanto para priorizar las problemáticas tecnológicas, como para focalizar y asignar recursos.

Luego de varios estudios y procesos de diagnóstico en los últimos años, las agendas de innovación tecnológica se convirtieron en una de las herramientas más importantes para la conexión entre el sector productivo y académico [14]. En estas se identifican las principales limitaciones de carácter técnico para la competitividad del sector agroindustrial que se agrupan en los denominados lineamientos tecnológicos para las cadenas productivas. A través de estos se busca direccionar los recursos técnicos y financieros para hacer un buen uso de las herramientas enfocadas al desarrollo de proyectos de aumento de la competitividad.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo presenta la propuesta de manejo integral del agua para el sector MIPYME agroindustrial. La propuesta atiende a las necesidades técnicas identificadas en Colombia, y resulta una herramienta de aplicación transversal en el sector. Para ello se tomaron como referentes varios lineamientos tecnológicos. El primer lineamiento considerado es el del recurso hídrico, según el cual deben priorizarse los proyectos orientados al uso eficiente del agua y la reducción del impacto ambiental. En segunda instancia se tiene en cuenta el lineamiento de producción amigable con el medio ambiente, al integrar los sistemas de adecuación de aguas, de reducción de consumo y de tratamiento de aguas residuales más adecuados para MIPYMES. Finalmente se considera el lineamiento de manejo sanitario y fitosanitario, ya que en el estudio de caso, se apoya el desarrollo tecnológico de una microempresa agroindustrial, cuyo objetivo es el manejo integrado de plagas a través de estrategias de control biológico.

Así pues, se busca que este trabajo tenga un alto impacto social, al enfocarlo en el sector con la población más vulnerable. Adicionalmente, al tener en cuenta las directrices gubernamentales para el desarrollo de proyectos, se impacta justo donde existen las principales debilidades de carácter técnico, porque es allí donde es más significativo el aporte que puede hacerse desde la academia y la práctica ingenieril.

Para empezar el desarrollo de la propuesta de manejo integral de agua, se presentan en la siguiente sección algunas de las características más representativas del sector MIPYME agroindustrial. Estas características serán tenidas en cuenta más adelante, cuando se defina el alcance y los aspectos metodológicos del trabajo.

1.3. MIPYME AGROINDUSTRIAL

La MIPYME agroindustrial es un segmento empresarial dedicado al manejo, conservación y transformación industrial a pequeña escala. Las materias primas provienen habitualmente del sector primario que incluye la producción agrícola, la ganadería, el aprovechamiento forestal y la pesca. Como en el resto de la industria, el propósito principal es la obtención de productos para el consumo final o intermedio, principalmente en el área alimentaria [22].

Desde el punto de vista tecnológico el sector MIPYME agroindustrial es diverso, pero el grupo más importante se dedica a actividades de transformación sencillas o de primer nivel, por ejemplo el empaquetado, el secado y el molido de cereales. Otro grupo se caracteriza por desarrollar actividades de segundo nivel, involucrando procesos técnicos más complejos donde se combinan materiales provenientes directamente del sector primario con otros previamente procesados o transformados [23].

La ubicación de las empresas agroindustriales está determinada por su estrecha relación con el sector primario. Muchas agroindustrias se encuentran cerca de los sitios de producción de sus materias primas, porque allí es más fácil y económico obtenerlas. Otro aspecto tiene que ver con la accesibilidad a los mercados rurales. En el

caso de las pequeñas productoras de insumos agrícolas y pecuarios, es mucho más conveniente estar cerca de los clientes inmediatos, bien sea en cabeceras municipales o centros poblados rurales [17].

En este sentido es lógico que algunas de las características o limitaciones del sector rural se incorporen a las MIPYME agroindustriales. Las de mayor relevancia están relacionadas con servicios públicos de menor calidad, mano de obra con escolaridad inferior a los que se consiguen en los centros urbanos y áreas metropolitanas, y disponibilidad limitada de recursos tecnológicos e insumos.

Otras características de la MIPYME agroindustrial, están asociadas a sus elementos comunes con el sector empresarial a pequeña escala. Algunas de estas son [24], [25]:

- Relación estrecha entre el propietario y los empleados: No existe una diferenciación marcada entre el trabajo y el capital. El propietario participa en una o varias de las actividades que también realizan sus empleados.
- Alta capacidad de adaptación: Las MIPYMES pueden incorporar cambios significativos en sus procesos de una manera ágil y relativamente simple. Esto le permite adaptarse con mayor facilidad a las necesidades o imposiciones externas. En contraste con la gran empresa, donde la gran inercia al cambio, resulta contraproducente en momentos de crisis o de variaciones en el mercado.
- Administración incipiente: Generalmente la práctica administrativa no está a cargo de un profesional en el área, sino del propietario, cuyos conocimientos del tema resultan limitados.
- Recursos económicos limitados: Los empresarios del sector no manejan las fuentes de financiamiento y frecuentemente involucran el capital personal o familiar en sus empresas.
- Sirven a mercados reducidos: Normalmente los productos se comercializan en las comunidades locales o a través en mercados muy especializados.
- Utilización de procesos sencillos de fabricación: Habitualmente se utilizan equipos de producción simples, y se tienen limitaciones tecnológicas.
- Falta de apoyo técnico y financiero externo: El gobierno y las instituciones privadas tienen limitaciones para ofrecer un acompañamiento efectivo al sector MIPYME.

Existen algunas metodologías de manejo de integral del agua para el sector industrial, que a través de diferentes herramientas buscan hacer buen uso del recurso [1]. Ninguna de estas metodologías ha sido elaborada para el caso específico del sector MIPYME agroindustrial, por lo que en algunos aspectos son ajenas a sus limitaciones y características. La siguiente sección recorre los principales enfoques para el manejo del agua en el sector industrial, identificando sus aportes y deficiencias respecto a las MIPYME agroindustriales.

1.4. ESTRATEGIAS DE MANEJO INTEGRAL DE AGUA

El manejo integrado del agua es un concepto que hace referencia a un conjunto de estrategias que tienen como objetivo realizar un uso óptimo del recurso dentro de un sistema donde existen una serie de elementos interrelacionados y que deben considerarse de manera conjunta para lograr los mejores resultados [26]. En Colombia las principales directrices están en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico [13], donde además se busca integrar al sector productivo como un actor fundamental en la consecución de los objetivos de manejo integral del agua.

Inicialmente el agua en el sector industrial se consideraba un recurso económico y casi ilimitado, por lo que no se hacían esfuerzos por su manejo integral [1]. Más adelante con la introducción de restricciones para los vertimientos a alcantarillados y cuerpos de agua, las empresas incluyeron dentro de sus objetivos la disminución

de las aguas residuales y la descarga de contaminantes [27]. Este enfoque denominado de “final de tubo” incentivó el desarrollo de avances técnicos para el tratamiento de aguas residuales.

El uso eficiente del agua entraría a ser otro de los objetivos del sector industrial, debido a la creciente preocupación por el medio ambiente y por la escasez del recurso hídrico. De esta manera el enfoque de final de tubo, fue reemplazándose por un enfoque integral conocido en el área industrial como producción más limpia [28]. La producción más limpia involucra diferentes estrategias que persiguen en orden de prioridad la prevención de la generación, la minimización, la reutilización, el reciclaje, el aprovechamiento y la disposición final o tratamiento de vertimientos y residuos.

Algunas de estas estrategias implican cambios en el proceso como sustitución de materias primas contaminantes o peligrosas, el uso de tecnologías ahorradoras, la segregación de residuos o corrientes de agua residual, la valorización energética, la valorización de corrientes en la elaboración de productos secundarios y el compromiso con programas de calidad y mejoramiento continuo.

A mediados de los años 80 empezaron a aparecer nuevas metodologías de manejo de agua para el sector industrial inspiradas en los conceptos de integración de procesos [2]. Estas estrategias agrupan de manera sistemática la segregación, la reutilización y el reciclaje con el objetivo de minimizar el consumo de agua y reducir al mínimo los residuos líquidos con necesidades de tratamiento [3], [4]. Las metodologías han ido evolucionando e integrando nuevos aspectos que permiten su aplicación a casos cada vez más complejos, abordando procesos discontinuos e incluso el cumplimiento de requerimientos ambientales y de calidad que atienden a múltiples contaminantes en las aguas [5]–[9].

A pesar de estos progresos, la implementación de metodologías de manejo integral de agua en la MIPYME agroindustrial es escasa y poco sistemática [10]. Esto se debe a aspectos externos e inherentes al sector como los siguientes [24]:

- Desconocimiento de la normatividad ambiental relacionada con el manejo de aguas: En el sector industrial urbano generalmente solo tiene que considerarse el cumplimiento de la legislación de vertimientos, pero para el sector agroindustrial puede ser más complejo porque implica la consideración de los planes de ordenamiento territorial y la obtención de concesiones de uso de agua.
- Problemas calidad y continuidad en el suministro de agua: En muchas ocasiones estos aspectos deben ser resueltos por la misma empresa al no existir entidades que presten el servicio, mientras que para la aplicación al sector industrial comúnmente puede asumirse que la continuidad y calidad del recurso están aseguradas.
- Conflictos por uso del recurso hídrico: Para áreas rurales donde la relación oferta/demanda de agua es baja, las microempresas pueden tener problemas para realizar el aprovechamiento del recurso, bien sea en la captura del agua para sus actividades o para las descargas de sus aguas residuales. En ambos casos debe tenerse en cuenta el impacto de la actividad productiva en su entorno.
- Recursos limitados: La disponibilidad de tecnologías, insumos, materiales de construcción, servicio eléctrico y la falta de personal técnico calificado restringen la aplicación de las tecnologías o estrategias que sugieren las metodologías convencionales de manejo de agua.
- Complejidad en la implementación de las metodologías: Algunas de estas metodologías no están al alcance del sector MIPYME porque implican estudios complejos, que requieren una cantidad significativa de información y el trabajo conjunto de profesionales en distintas áreas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el siguiente capítulo propone una metodología para el diseño de una estrategia integral de manejo de aguas que pueda ser aplicada a MIPYMES agroindustriales. La metodología debe guiar de una manera sencilla el proceso de toma de decisiones en el contexto del sector, aplicando los principios del manejo integral de aguas mientras se busca la satisfacción de los intereses de los empresarios, el cumplimiento de la normatividad ambiental y la minimización de los impactos ambientales y sociales.

1.5. REFERENCIAS

- [1] J. G. Mann and Y. A. Liu, *Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*. McGraw Hill Professional, 1999, p. 523.
- [2] M. Bagajewicz, "A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 24, no. 9–10, pp. 2093–2113, Oct. 2000.
- [3] A. C. Kokossis and R. Smith, "Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 1994, pp. 741–744, 1998.
- [4] Y. P. Wang and R. Smith, "Wastewater minimisation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 981–1006, Apr. 1994.
- [5] A. M. Shoaib, S. M. Aly, M. E. Awad, D. C. Y. Foo, and M. M. El-Halwagi, "A hierarchical approach for the synthesis of batch water network," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 32, no. 3, pp. 530–539, Mar. 2008.
- [6] P. Oliver, R. Rodríguez, and S. Udaquiola, "Water use optimization in batch process industries. Part 1: design of the water network," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 12, pp. 1275–1286, Aug. 2008.
- [7] J.-K. Kim, "Design of discontinuous water-using systems with a graphical method," *Chem. Eng. J.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 799–810, Aug. 2011.
- [8] D. C. Y. Foo, Z. A. Manan, and Y. L. Tan, "Synthesis of maximum water recovery network for batch process systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no. 15, pp. 1381–1394, Dec. 2005.
- [9] C.-L. Chen, J.-Y. Lee, J.-W. Tang, and Y.-J. Ciou, "Synthesis of water-using network with central reusable storage in batch processes," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 267–276, Jan. 2009.
- [10] Banco Interamericano de Desarrollo, Ed., *Alternativas de producción más limpia en las PYME del sector manufacturero: guía de consultores*. Bogotá, 2002, p. 123.
- [11] "Misión para el Empalme de las Series de Empleo, Pobreza y Desigualdad (Mesep)." DNP - DANE, Bogotá, p. 96, 2010.
- [12] Ministerio de Industria Turismo y Comercio, *CONPES 3327*. Bogotá: "Política Nacional de Competitividad y Productividad," 2008.
- [13] Ministerio del Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico." Bogotá, p. 120, 2010.
- [14] C. P. Uribe, S. L. Fonseca, G. E. Bernal, C. A. Contreras, and O. F. Castellanos, "Sembrando innovación para la competitividad del sector agropecuario colombiano." Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá, 2011.
- [15] E. Zevallos, *Panorama de las micro, pequeñas y medianas empresas (MIPyMES) en varios países de América Latina*. San José: FUNDES, 2002, p. 28.
- [16] M. Álvarez and J. E. Duran, *Manual de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa*. San Salvador: GTZ, 2009, p. 105.
- [17] E. Parra, *El impacto de la microempresa rural en la economía latinoamericana*. Bogotá: PROMER, 2000, p. 36.
- [18] M. R. Rosales, "La importancia de las micro, pequeñas y medianas empresas en un marco de apertura y globalización.," in *Simposio las Pymes de cara al área de libre comercio de las Américas*, 1997.
- [19] C. Ferraro, A. Arrojo, L. A. Zuleta, and C. Ferreira, *Apoyando a las pymes: Políticas de fomento en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas, 2011, p. 509.

- [20] Congreso de la República, *Ley 590*. Colombia: “Por la cual se dictan disposiciones para promover el desarrollo de las micro, pequeñas y medianas empresas,” 2000, p. 39.
- [21] A. Montoya, I. Montoya, and O. Castellanos, “Situación de la competitividad de las Pyme en Colombia : elementos actuales y retos,” *Agron. Colomb.*, vol. 28, no. 1, pp. 107–117, 2010.
- [22] I. Villagra, J. Mira, E. Gutierrez, and S. Pazmiño, *Agroindustria, fundamentos y conceptos básicos*. Bogotá: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, 1983, p. 36.
- [23] P. Bolaños, H. Carlos, and J. Rojas, *Agroindustria*. San José: EUNED, 2002, p. 413.
- [24] S. Anzola, *Administración de pequeñas empresas*, 2nd ed. Mexico: McGraw-Hill, 2001, p. 368.
- [25] J. Rodríguez, *Administración de pequeñas y medianas empresas*, 6th ed. México: Cengage Learning, 2010, p. 361.
- [26] P. Stålnacke and G. D. Gooch, “Integrated Water Resources Management,” *Irrig Drain. Syst*, vol. 24, pp. 155–159, 2010.
- [27] J. Dvarioniene and Z. Stasiskiene, “Integrated water resource management model for process industry in Lithuania,” *J. Clean. Prod.*, vol. 15, pp. 950–957, 2007.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL DE AGUA EN EL SECTOR MIPYME AGROINDUSTRIAL

2.1. RESUMEN

Este capítulo estructura la información más relevante para el manejo integral de agua en MIPYMES agroindustriales de manera que pueda servir como guía metodológica para la formulación sistemática de propuestas de manejo integral de agua en este tipo de empresas. La información esta presentada por áreas en las que se abordan los aspectos legales, las restricciones, las principales alternativas y los factores fundamentales para su evaluación y selección. También se presenta una metodología para la toma de decisiones en casos donde se hace difícil el proceso de selección de alternativas. Esto puede surgir en situaciones donde existen varias alternativas viables para alcanzar un mismo objetivo relacionado con el manejo del agua, cada una de la cuales presenta ventajas desde puntos de vista diferentes. La metodología pretende ser general, para abarcar los escenarios más complejos que puedan darse en el sector, tanto para proyectos empresariales como para establecimientos en funcionamiento. Está elaborada de manera que pueda ser fácil y rápidamente aplicada utilizando información básica, pero sin perder el enfoque integrador entre los elementos más importantes de las metodologías de manejo de agua para el sector industrial, y las particularidades y limitaciones del sector MIPYME agroindustrial.

El capítulo está estructurado en seis secciones. La primera describe de manera general la metodología de toma de decisiones que puede aplicarse a cualquiera de las cuatro áreas en que se dividieron las actividades relacionadas al manejo del agua en la empresa. Las siguientes cuatro secciones profundizan los aspectos del manejo integral en cada una de dichas áreas. La última sección presenta las guías para la elaboración del diagnóstico que precede todo el procedimiento de toma de decisiones. Esto debido a que es más fácil para el lector comprender la información que se requiere capturar en el diagnóstico, luego de que se haya identificado lo que es relevante en cada área.

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA

2.2.1. ÁREAS DE DECISIÓN

Para el diseño de las propuestas de manejo integral en MIPYMES se realiza una división de las actividades relacionadas al manejo de agua teniendo en cuenta las diferencias en sus objetivos. Estas áreas son:

Área 1: Abastecimiento de agua

El objetivo en esta área es proveer agua para la empresa en cantidad suficiente dependiendo de las necesidades identificadas. Aquí se proponen y evalúan las posibles fuentes de agua, el riesgo sanitario de las fuentes, la necesidad de almacenamiento y las estrategias de captación y conducción del agua hasta la empresa.

Área 2: Tratamiento de agua cruda

Tiene como finalidad modificar la calidad del agua recibida de tal forma que esté acorde a los usos de la empresa. En establecimientos que ya cuentan con servicio de abastecimiento, se recomienda como mínimo una evaluación de la calidad del agua recibida para determinar si es necesario tomar medidas internas de tratamiento.

Área 3: Manejo de agua en el proceso productivo y actividades complementarias

Los principales objetivos en esta área son minimizar el consumo de agua fresca y reducir la generación de aguas residuales. Implica el cálculo del objetivo del consumo mínimo de agua de proceso, la formulación de alternativas de uso de agua para lograr o acercarse a dicho objetivo, y la implementación de tecnologías de ahorro y de buenas prácticas de manufactura. Las actividades de proceso son aquellas directamente relacionadas con la elaboración del producto, las actividades complementarias incluyen uso de sanitarios, lavamanos, duchas, cocinas, y limpieza.

Área 4: Gestión de vertimientos

En esta área se busca el aprovechamiento o valorización de las aguas residuales y el cumplimiento de la normatividad ambiental de vertimientos a través de la implementación de sistemas de tratamiento.

2.2.2. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA DE TOMA DE DECISIONES

La metodología para la toma de decisiones consta de cuatro etapas básicas que se describen a continuación. La interrelación entre las etapas y otros elementos importantes para el proceso de toma de decisiones se esquematiza en la Figura 1.

Etapas 1: Diagnóstico

Enmarca el desarrollo de la propuesta dentro del contexto de la empresa. A partir de la información obtenida en el diagnóstico se identifican las restricciones que permiten proponer un conjunto viable de alternativas para evaluar. El diagnóstico también es importante para establecer otros elementos del proceso de evaluación - selección, como lo son los criterios de selección, los factores asociados y su relevancia para un criterio determinado.

Etapas 2: Formulación de alternativas

La formulación de las alternativas depende de diferentes restricciones en cada una de las áreas y del conocimiento y experiencia de quien las formule. Una restricción es una guía que debe cumplirse o una situación que debe darse para hacer viable la consideración de una alternativa. Las principales restricciones están relacionadas con la calidad del agua, con factores técnicos y con factores externos. Las restricciones de calidad pueden ser normativas, impuestas por el proceso o por la misma empresa. Las restricciones técnicas tienen

que ver con el rendimiento y eficiencia de las tecnologías, y las restricciones externas corresponden a situaciones que están por fuera del control de la empresa y que limitan la implementación de algunas alternativas. Para el caso del área 2, se presenta un procedimiento para la formulación de alternativas. Todas las demás áreas incluyen ejemplos típicos de tecnologías para el manejo de agua, que pueden orientar el proceso de formulación.

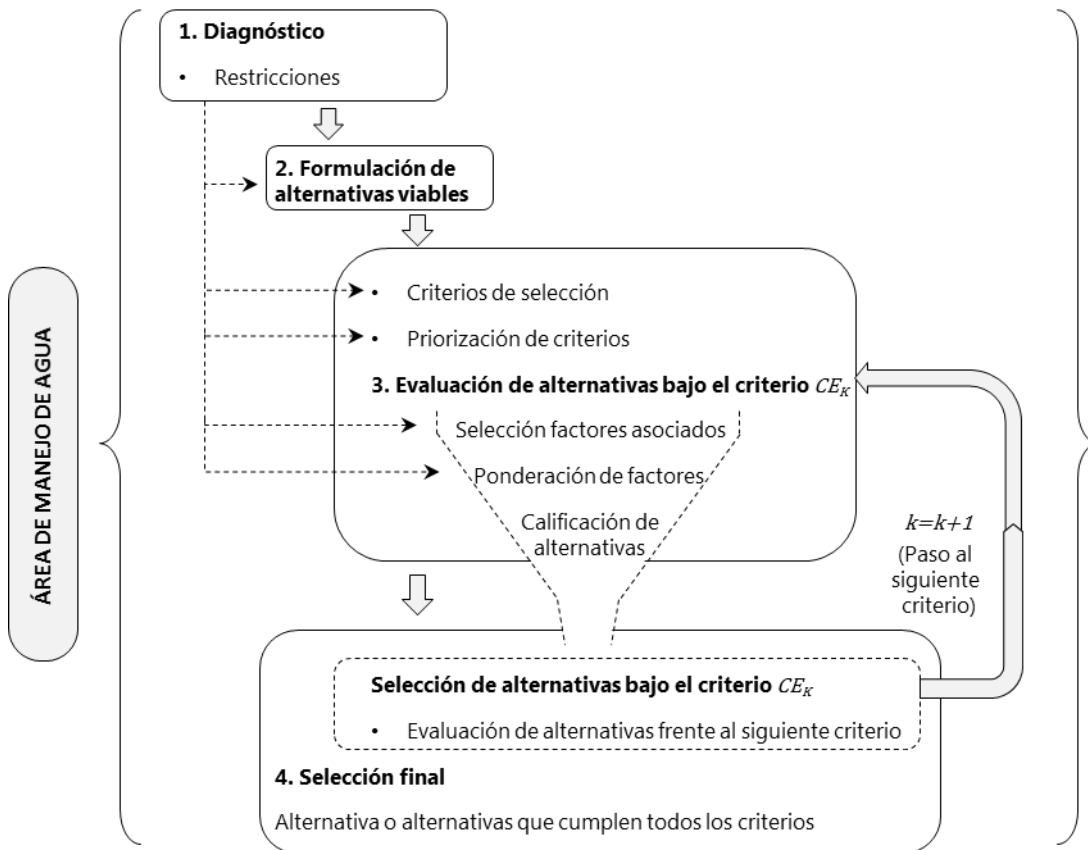


Figura 1: Esquema de la metodología para toma de decisiones

Etapa 3: Evaluación

Una vez construido el universo de alternativas para el manejo del agua en un área determinada, el siguiente paso es su evaluación. En este trabajo se propone una metodología de evaluación cualitativa que busca un grado aceptable de objetividad manteniendo un nivel razonable de simplicidad. La metodología recoge aspectos que posibilitan la evaluación de alternativas a través de criterios múltiples [29]–[31], tal y como lo exige un problema complejo de abordar como el de la elaboración de una propuesta de manejo integral de agua para el sector MIPYME agroindustrial. En su estructura sigue un orden secuencial similar al de los procesos analíticos jerárquicos para toma de decisiones [32], como el adaptado por el instituto Cinara de la Universidad del Valle¹ para la selección de sistemas de potabilización en pequeñas poblaciones [33]. Una de las principales ventajas de la metodología acá planteada es su flexibilidad, para tratar de ajustarse a la diversidad del sector MIPYME

¹ Cinara: Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico.

agroindustrial en aspectos como su capacidad tecnológica, los diferentes contextos sociales y los intereses particulares de quienes toman las decisiones.

La etapa de evaluación incluye varias actividades que relacionan la información obtenida en el diagnóstico con las alternativas viables y con los intereses de la empresa. Estas actividades son:

- Selección de criterios de decisión.
- Priorización de criterios.
- Selección de factores asociados.
- Ponderación de factores asociados.

Un criterio de decisión es un aspecto general bajo el cual se valoran las alternativas [32]. Cuando existen varios criterios de evaluación, el equipo de trabajo y los agentes que toman las decisiones deben organizarlos según sus prioridades.

La primera evaluación de las alternativas se hace respecto al criterio más importante para la empresa o para el grupo evaluador. Esa primera evaluación actúa como un filtro de alternativas. Si no es posible hacer la selección con una sola evaluación se repite el procedimiento frente al siguiente criterio en orden de importancia. En este nuevo ciclo solo se tienen en cuenta las mejores alternativas de la primera evaluación. El ciclo se repite con el siguiente criterio CE_{k+1} hasta que se agoten los criterios de decisión o hasta seleccionar una alternativa tal y como se esquematizó en la Figura 1.

Cada ciclo implica la elaboración de una matriz de evaluación como la de la Figura 2. En ella, las alternativas se califican frente a un conjunto de factores $F_{k,i}$ que están asociados a un criterio de evaluación CE_k . Todos los factores tienen un coeficiente de ponderación $c_{k,i}$ que mide su impacto en el criterio de evaluación CE_k . La evaluación de una alternativa se realiza asignando un puntaje $v_{i,j}$ respecto a cada factor. Todas las los puntajes $v_{i,j}$ se ponderan multiplicándolos por los respectivos coeficientes de ponderación $c_{k,i}$ y la calificación final de la alternativa respecto al criterio evaluado es igual a la sumatoria de todos los puntajes ponderados $c_{k,i} \times v_{i,j}$

MATRIZ DE EVALUACION CRITERIO CE_k	Factores	Coeficientes de ponderación	Evaluación alternativa 1		Evaluación alternativa j		
			Puntaje	Puntaje ponderado	Puntaje	Puntaje ponderado	
	$F_{k,1}$	$c_{k,1}$	$v_{1,1}$	$c_{k,1} \times v_{1,1}$	...	$v_{1,j}$	$c_{k,1} \times v_{1,j}$
	$F_{k,2}$	$c_{k,2}$	$v_{2,1}$	$c_{k,2} \times v_{2,1}$	...	$v_{2,j}$	$c_{k,2} \times v_{2,j}$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$F_{k,i}$	$c_{k,i}$	$v_{i,1}$	$c_{k,i} \times v_{i,1}$	...	$v_{i,j}$	$c_{k,i} \times v_{i,j}$
		$\sum_i c_{k,i} = 1$		$\sum_i c_{k,i} \times v_{i,1}$			$\sum_i c_{k,i} \times v_{i,j}$
		Restricción coeficientes de ponderación		Calificación alternativa 1			Calificación alternativa j

Figura 2: Matriz de evaluación de alternativas propuesta para este trabajo

Un factor es un aspecto particular que tiene impacto en el criterio de decisión. Un ejemplo de criterio de decisión es la complejidad operativa de las alternativas, y un ejemplo de factor asociado es el nivel de formación técnico

requerido para operar una alternativa. Cuando los requerimientos de formación técnica de una alternativa son altos se causa un impacto positivo sobre el criterio de evaluación, lo que en este caso implica una mayor complejidad operativa.

Las alternativas se califican respecto a un factor con puntajes en una escala de 0 a 5. El cero implica que para una alternativa particular ese factor no tiene impacto en el criterio de decisión. Por ejemplo, una alternativa que puede ser operada por personas sin educación primaria, podría calificarse con un cero respecto al factor de formación técnica, porque dicho factor no tiene impacto en la complejidad operativa de esa alternativa específica.

Los coeficientes de ponderación sirven para dar mayor peso a los factores considerados como críticos en el proceso de decisión independientemente de las alternativas. La asignación de coeficientes de ponderación se hace teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico y debe estar sujeta a la restricción matemática de que su sumatoria sea igual a 1. De esta forma se logra que la calificación de cualquier alternativa solo tome valores entre 0 y 5.

La implementación de la matriz de evaluación se aclara con un ejemplo luego de la descripción de la etapa de selección de alternativas.

Etapas 4: Selección de alternativas

Cuando varias alternativas obtienen resultados favorables frente a un criterio, el proceso de selección se extiende con la evaluación de dichas alternativas bajo los siguientes criterios en orden de prioridad. Al final y dependiendo del criterio, puede escogerse la alternativa de menor o mayor puntuación. Por ejemplo si la empresa tiene un presupuesto limitado, la alternativa seleccionada bajo el criterio de requerimientos de inversión inicial será aquella que haya obtenido el mejor puntaje. Si la empresa no escatima en gastos y su criterio de evaluación es la confiabilidad operativa, la alternativa a seleccionar en este caso sería la de mayor puntaje.

Si a pesar de la evaluación frente a varios criterios no se llega a una conclusión definitiva, o si se tienen dudas respecto a la alternativa que sugirió el proceso de selección, puede realizarse la evaluación por métodos más refinados como los que se plantean en las referencias [9], [34], [35].

Ejemplo de evaluación de alternativas

Considérese una operación simple de almibarado. En ésta, trozos de fruta se cocinan en una solución azucarada dentro de un equipo que permite la concentración de la mezcla por evaporación de parte del agua de la solución. Supóngase que la operación se realiza en un evaporador alimentado con vapor de caldera, y que el diagnóstico realizado arrojó la siguiente información básica:

- La caldera no requiere estar conectada a servicio eléctrico. Funciona con carbón y tiene válvulas solenoides alimentadas por una batería vehicular de 12V, para regular el flujo de agua.
- El servicio de energía eléctrica es intermitente, se tienen hasta 3 cortes semanales que pueden durar entre 1 y 3 horas.
- La empresa cuenta con personal disponible para actividades adicionales.

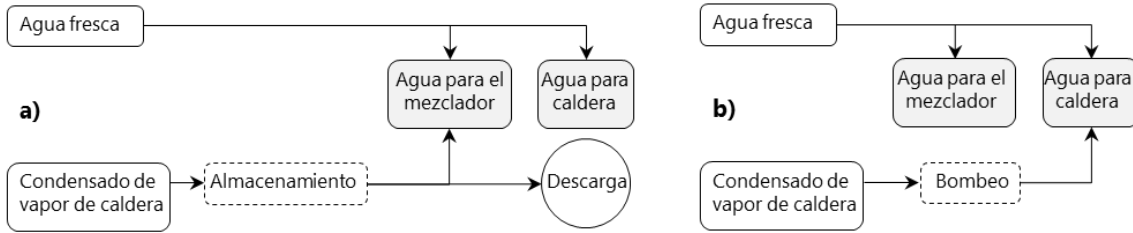


Figura 3: a) Red de manejo con reutilización manual del agua. b) Red de manejo con reutilización por bombeo del agua y eliminación del vertimiento

Las Figura 3 a) y b) presentan dos alternativas a través de diferentes redes de manejo de agua. En la primera red el condensado del vapor de caldera se almacena en un tanque y se lleva manualmente al mezclador para suplir la necesidad de consumo de agua fresca en la preparación de la solución azucarada. En la segunda red, el agua almacenada se recircula con una bomba para disminuir el consumo de agua de la caldera. En la red a) es posible aprovechar un 50% del condensado de vapor de caldera, y en la red b) puede aprovecharse toda el agua condensada por lo que se minimiza el consumo de agua fresca y se elimina el vertimiento.

La Tabla 2 muestra la valoración de las dos alternativas utilizando como criterio de evaluación la complejidad operativa y los siguientes factores asociados:

- Requerimientos de continuidad del servicio eléctrico.
- Requerimientos de personal.

Según el diagnóstico, la primera alternativa es independiente del suministro de energía eléctrica y por tanto requiere *baja* o nula continuidad en el servicio. En este caso se asignó un puntaje de 0 para la pareja, “alternativa 1 – factor asociado 1”. Para esta misma alternativa los requerimientos de personal son *altos*, al menos en comparación con la segunda alternativa que no requiere de una persona que traslade manualmente el agua. Por lo tanto el valor para la pareja, “alternativa 1 - factor asociado 2”, debe ser alto y se le asigna un puntaje de 5.

Como ya se describió anteriormente, la ponderación de los factores se logra asignando coeficientes a cada uno de los factores asociados. El “*puntaje ponderado*” de cada pareja “*alternativa – factor*” se obtiene al multiplicar el coeficiente de ponderación por el puntaje asignado a la pareja. Para establecer el impacto basta con relacionar los resultados del diagnóstico con los factores asociados que se incluyen en el criterio de evaluación. En este ejemplo, el diagnóstico indicó que el servicio de energía era intermitente y que había buena disponibilidad de personal. Esto implica que el factor asociado a requerimientos de continuidad tiene un mayor impacto a la hora de evaluar las alternativas, y corresponde a un factor crítico para el proceso de decisión. Por este motivo el coeficiente de ponderación del factor asociado al de energía eléctrica tiene un valor de 0,7 y es más alto que el de requerimientos de personal que solo es de 0,3 (Tabla 2).

Tabla 2: Ejemplo evaluación de alternativas

Factor	-	Coeficiente de ponderación	Alternativas			
			a) - Manual		b) - Bombeo	
Descripción			Puntaje	Ponderación	Puntaje	Ponderación
Requerimientos de continuidad del servicio eléctrico		0,7	0	0	5	3,5
Requerimientos de personal		0,3	5	1,5	1	0,3
Sumatoria		1		1,5		3,8

El resultado de la evaluación indica claramente que la alternativa b) es más compleja de operar debido al impacto de las deficiencias de continuidad en el servicio eléctrico.

Como regla general para el procedimiento de ponderación de factores puede decirse que entre más alternativas impacte un determinado factor, más alto debe ser su coeficiente de ponderación. En algunas circunstancias un factor puede actuar como una restricción para una alternativa, y como se mencionó antes, toda alternativa que no cumpla con las restricciones debe descartarse del análisis. Esta sería la situación, si para el diagnóstico del ejemplo se hubiera determinado la ausencia completa de servicio eléctrico. En este caso el factor de requerimientos de continuidad del servicio actuaría como una restricción para la primera alternativa y no valdría la pena considerarla en el análisis. Ante este tipo de situaciones límite, es útil modificar las alternativas para tratar de sortear las dificultades. En el ejemplo podría incluirse una planta eléctrica que funcione con gasolina.

Las siguientes secciones exponen una serie de información discriminada por áreas, útil para el proceso de formulación, evaluación y selección de alternativas. Para cada área se muestran restricciones que delimitan la formulación de alternativas, listados típicos de tecnologías y/o las alternativas, y criterios básicos de selección con sus factores asociados. Cabe recalcar que esta información corresponde solo a una guía general para las etapas de formulación, evaluación y selección. Dependiendo de sus experiencias, necesidades e intereses, el consultor y la empresa pueden agregar alternativas adicionales, otros criterios de selección y factores asociados que complementen los presentados en este documento.

2.3. ÁREA 1: ABASTECIMIENTO DE AGUA

El objetivo de esta área es proveer agua en la cantidad requerida para todas las actividades de la empresa. El suministro puede realizarlo un tercero como un prestador del servicio de acueducto con o sin tratamiento, o puede obtenerlo la empresa directamente desde la fuente de agua. En ambos casos es importante evaluar la calidad y continuidad del recurso frente a las necesidades de la empresa. Cuando la empresa toma directamente el agua de la fuente, debe contar con una concesión o permiso para usar el agua, y disponer de estructuras apropiadas para la captación, para la conducción del recurso hasta la empresa y para su almacenamiento si hay problemas de continuidad.

Esta sección inicia con la presentación de las restricciones y de las alternativas comunes para captación y conducción de agua para las cuales no se considera necesaria la evaluación de alternativas ya que en lo que atañe a la conducción las mejores opciones para el manejo integral resultan más fáciles de operar y comparables en precios o inclusive más económicas que las demás alternativas. Para la captación, las alternativas se seleccionan directamente de factores externos o técnicos como el caudal en fuentes superficiales y el nivel freático en fuentes subterráneas [36].

La metodología descrita en la sección 2.1 se aplica en esta área a una evaluación simple de riesgos de la fuente frente aspectos de discontinuidad y calidad para los casos en que no se cuenta con una caracterización completa distribuida en el tiempo. Los resultados de la evaluación de riesgos no se utilizan propiamente para la selección de alternativas de abastecimiento sino que se utilizan en la determinación de necesidades de almacenamiento y, eventualmente, como insumo en el área de tratamiento de agua cruda para la formulación de alternativas y para la evaluación respecto al criterio de confiabilidad operativa.

La sección continúa con la presentación de algunos criterios de selección para el caso en el que se disponga de dos o más fuentes de agua y finaliza con un resumen de los escenarios que pueden presentarse y las actividades que deben realizarse en cada uno de ellos.

2.3.1. RESTRICCIONES EN EL ÁREA

Para proyectos en el área de abastecimiento las restricciones pueden ser de carácter legal o técnico. El primer caso implica la prohibición explícita del estado Colombiano de utilizar aguas de determinada fuente. En el segundo caso por motivos de calidad del recurso, o por dificultades extremas en el proceso de conducción, puede resultar inviable el aprovechamiento de una fuente de agua.

Prohibición del uso del agua para aprovechamiento industrial

En Colombia las corporaciones autónomas regionales son las entidades encargadas de asignar los usos a las fuentes de agua a través de procesos de reglamentación del recurso hídrico. Cuando el uso industrial está prohibido para determinada fuente, deberán buscarse fuentes alternas o inclusive cambiar la ubicación de la empresa o proyecto productivo. En caso de que el uso industrial no entre en conflicto con lo determinado por las autoridades ambientales, las empresas que hagan aprovechamiento del recurso deberán legalizar el uso solicitando un permiso de concesión de aguas a la autoridad ambiental.

Alta demanda por el uso del recurso hídrico

Una restricción puede darse en caso de conflictos por el uso del agua. Esto sucede cuando hay varios interesados en el aprovechamiento del recurso y la cantidad es insuficiente, o cuando existen usuarios con concesión de aguas que serían afectados si la empresa hace el aprovechamiento aguas arriba. Nuevamente la autoridad ambiental es la encargada de dirimir el conflicto entregando o negando la concesión de agua a la empresa.

Calidad de la fuente

Para algunas empresas podría resultar inviable el uso de fuentes de agua de muy baja calidad cuando no se tiene la capacidad técnica para su tratamiento. Por eso es necesario un proceso de caracterización que brinde elementos de juicio para la toma de decisiones.

Restricciones técnicas y/o externas

Otros factores como distancia a la fuente de agua, el requerimiento de bombeo y la topografía podrían llegar a ser lo suficientemente críticos como para excluir una fuente de agua del proceso de evaluación.

2.3.2. ALTERNATIVAS HABITUALES PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA

Para el caso en que la empresa realice o tenga planeado obtener el agua sin intermediarios, existen diferentes alternativas que dependen de dos características esenciales: tipo de fuente (superficial o subterránea), y su posición relativa respecto a la empresa. La selección de las alternativas debe atender a los siguientes criterios de manejo integral del agua:

- Minimización del riesgo de fugas de agua o de cortes del suministro durante el proceso de conducción.
- Minimización del desperdicio del recurso por captación de más agua de la requerida.
- Minimización del impacto en las fuentes de agua.

Alternativas de conducción

Cuando el punto de captación de la fuente superficial o subterránea se encuentra en una cota suficientemente más elevada que la de la empresa, la conducción puede hacerse por gravedad. Regularmente el traslado se realiza por canales o tuberías. La Tabla 3 expone las alternativas habituales [36].

Tabla 3: Alternativas de conducción

Alternativas de conducción	Aspectos a considerar
En canal abierto por gravedad	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de un trayecto sin cambios de pendiente. • Requiere mantenimiento frecuente pues es susceptible a obstruirse o contaminarse con elementos externos en su recorrido. • No se puede aprovechar la cabeza de altura. • Solo puede evitarse el flujo en el punto de captación.
En tubería cerrada <ul style="list-style-type: none"> • Por bombeo • Por gravedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede usarse en trayectos con cambio de pendiente. • Mínimos requerimientos de mantenimiento pues hay poco riesgo de obstrucción o contaminación externa durante el recorrido. • Puede aprovecharse la cabeza de altura o la presión extra de bombeo. • El flujo puede suspenderse en cualquier punto del recorrido.

Desde el punto de vista del manejo integral los canales son inferiores a las tuberías cerradas porque el riesgo de desperdicio es mayor. Por un lado son susceptibles de taponarse u obstruirse por elementos externos, lo que puede causar fácilmente pérdidas de agua en el trayecto. Adicionalmente la captación del agua no puede evitarse cerrando una válvula en la parte baja; esto implica que si en un momento no hay consumo, se desperdiciaría el agua que viene por el canal [37].

Alternativas de captación

Dependiendo de la combinación entre el tipo de fuente y el tipo de flujo, pueden encontrarse varias alternativas de captación [38], [39]. Algunas de ellas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Alternativas de captación

Alternativa	Característica de la fuente
Canal de derivación	Fuente superficial de caudal alto y flujo por gravedad.
Captación de toma lateral	Fuente superficial sin socavación profunda y flujo por gravedad.
Captación de toma en dique	Fuente superficial de poco caudal, de pendientes altas y flujo por gravedad.
Captación de ladera y concentrado	Subterránea en manantial, cuando el agua aflora en forma horizontal a través de un área pequeña.
Captación de fondo y concentrado	Subterránea en manantial, cuando el agua aflora en forma ascendente hacia la superficie a través de un área pequeña.
Pozos	Subterránea bajo tierra a profundidades de moderadas a bajas y con flujo por bombeo.
Sondeos	Subterránea bajo tierra a profundidades considerables y con flujo por bombeo.
Zanjas y drenes	Subterránea de poca profundidad en acuíferos de permeabilidad media a baja.
Galerías filtrantes	Subterráneas para acuíferos a los que puede accederse por perforación horizontal.

2.3.3. EVALUACIÓN DE RIESGOS

Las Tablas 5 y 6 muestran los principales factores que pueden alterar la continuidad y la calidad del recurso bien sea directamente en la fuente o durante la conducción. La mayoría de los factores aplican para fuentes superficiales, donde la vulnerabilidad es mucho más alta [38]. Sin embargo, aspectos relacionados con la conducción y la presencia de campos de infiltración para aguas residuales también pueden afectar algunas fuentes subterráneas [39].

Tabla 5: Factores de riesgo de discontinuidad en el abastecimiento

Criterio de evaluación: Riesgo de discontinuidad en el abastecimiento.
Factor asociado
Relación "Caudal fuente/Caudal captado"
Movimiento de masas en la parte alta de la cuenca
Movimiento de masas en el trayecto de la conducción
Vulnerabilidad del sistema de conducción a permitir el contacto con elementos externos
Captaciones ocasionales aguas arriba del punto de captación
Distancia a captación
Accesibilidad a captación
Actividades ganaderas en el trayecto de conducción

Para un riesgo de discontinuidad de medio a alto (3-5), es recomendable incluir en el sistema de abastecimiento un tanque de almacenamiento para situaciones de contingencia. Lo ideal es que el tanque tenga una cabeza de altura suficiente para suministrar agua a la empresa por gravedad y con la presión requerida, de lo contrario debe acondicionarse para operar mediante bombeo. El volumen de almacenamiento del tanque depende de la demanda y del tiempo previsto para los eventos de discontinuidad. Por restricciones de costos y espacio este tiempo debe ser del orden de días como máximo.

Tabla 6: Factores de contaminación de la fuente

Criterio de evaluación: Riesgo de contaminación de la fuente.
Factor asociado
Pluviosidad de la zona
Vertimientos agrícolas o pecuarios aguas arriba del punto de captación
Vertimientos industriales aguas arriba del punto de captación
Vertimientos domésticos aguas arriba del punto de captación
Presencia de cultivos y uso de pesticidas
Actividades de extracción aguas arriba del punto de captación
Movimiento de masas en la parte alta de la cuenca
Caudal de la fuente
Deforestación de la parte alta de cuenca y riberas de la fuente
Vulnerabilidad del sistema de conducción a permitir el contacto con elementos externos

La calificación del riesgo de contaminación de la fuente puede utilizarse en la siguiente sección como guía para la formulación de alternativas o como un factor asociado cuando se evalúen las alternativas en función de la confiabilidad y no se disponga de información puntual sobre la variación temporal de la calidad de la fuente.

2.3.4. RECOMENDACIONES PARA SELECCIÓN ENTRE DOS O MÁS FUENTES DE AGUA

En el caso en que se cuente simultáneamente con dos o más fuentes de agua de las que sea viable hacer el aprovechamiento, las recomendaciones para la selección se resumen en la priorización del criterio de calidad, luego el de disponibilidad y finalmente el de facilidad operativa tal y como se muestra a continuación [36]:

- I. Utilizar la fuente de mejor calidad: esto se justifica ya que una fuente de mejor calidad impacta positivamente el proceso, la salud de los empleados y puede disminuir los costos derivados de un posible sistema de tratamiento.
- II. Tomar la fuente de mejor calidad y completar con una de calidad inferior: Si la fuente de mejor calidad es insuficiente para los requerimiento de la empresa o si presenta problemas de escases en períodos de verano, la idea es utilizarla y completar con una fuente de menor calidad antes que tomar toda el agua de la fuente de peor calidad. Si se requiere un sistema de tratamiento, debe elaborarse para el escenario en donde se mezclen las dos fuentes.
- III. Evitar el bombeo: Siempre que la decisión entre dos fuentes este entre flujo por bombeo y flujo por gravedad, debe preferirse este último ya que el flujo por bombeo implica costos adicionales y aumenta el riesgo de discontinuidad en el suministro debido a posibles fallas del equipo.

2.3.5. RESUMEN DE ESCENARIOS Y PROCEDIMIENTOS

Debido a que esta área puede presentar diferentes situaciones respecto al suministro del agua, se presenta un resumen de las actividades en función de diferentes escenarios (Tabla 7):

- Escenario E1: Proyecto de empresa sin prestador de servicio de agua con 2 o más fuentes.
- Escenario E2: Proyecto de empresa sin prestador de servicio de agua con una fuente.
- Escenario E3: Empresa en funcionamiento con disponibilidad de otras fuentes.
- Escenario E4: Empresa en funcionamiento sin prestador de servicio y con una sola fuente.
- Escenario E5: Empresa en funcionamiento con prestador de servicio sin potabilización.

Tabla 7: Escenarios y actividades en el área de abastecimiento de agua

Actividad	Escenario al que aplica				
	E1	E2	E3	E4	E5
Clasificación del uso de la o las fuentes según la autoridad ambiental competente	x	x	x		
Selección de la o las fuentes	x		x		
Solicitud de concesión de aguas	x	x	x	x	
Selección o adecuación de estructuras de captación y conducción	x	x	x	x	
Evaluación del riesgo de sistema de abastecimiento	x	x	x	x	x
Determinación de necesidades de almacenamiento	x	x	x	x	x

2.4. ÁREA 2: TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA

El objetivo de esta área es proveer agua con las características apropiadas para todas las actividades desarrolladas en la empresa y solo aplica para aquellos casos donde se evidencian falencias en la calidad del recurso suministrado, frente a los usos requeridos. La consideración de una alternativa depende de dos restricciones básicas: i) calidad de la fuente de agua y ii) calidad del agua necesaria para determinado uso.

Para requerimientos de calidad exigentes como los del agua potable y para fuentes de mala calidad, el tratamiento del agua cruda requiere una combinación de tecnologías o “esquema de tratamiento”. Cuando se tienen requerimientos de calidad más bajos como en el caso del aprovechamiento forestal, se considera que las tecnologías discutidas para potabilización son igualmente aplicables, pero podría ser suficiente con una unidad o tecnología de tratamiento, o con esquemas mucho más sencillos [40].

Las alternativas de adecuación de aguas han sido ampliamente exploradas y discutidas en la literatura, la sección de restricciones solo presenta algunas referencias que contienen guías para la formulación de tecnologías en función de los objetivos de calidad perseguidos, y de las características del agua a tratar. En la sección de alternativas se presentan las tecnologías más comunes para tratamiento y el tipo de contaminantes que pueden remover. Las tecnologías se dividieron en alternativas para potabilización de agua, para enfriamiento y calderas, y para requerimientos de calidad altos o para remoción de contaminantes difíciles de eliminar. Cuando se tengan usos por fuera de estas categorías, la empresa y el consultor pueden definir los requerimientos con base en las necesidades del proceso, protección de equipos, salud de los empleados, políticas de calidad, etc.

2.4.1. RESTRICCIONES EN EL ÁREA

Restricciones de calidad

Son los valores que deben tener ciertos parámetros de calidad del agua para poder aplicar un tipo específico de tecnología, y los valores que debe lograr el sistema de tratamiento para posibilitar determinados usos.

La Tabla 8 relaciona usos industriales recurrentes con algunas referencias donde es posible encontrar los valores aceptables para dichos usos, y las tecnologías o combinaciones de estas que pueden utilizarse para lograr dichos objetivos en función de la calidad del agua de la fuente disponible.

Tabla 8: Guías de calidad para usos del agua y tecnologías de tratamiento

Tipo de uso	Referencia
Consumo humano, Procesamiento de alimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución 2115 de 2007: Presenta las exigencias para prestadores del servicio de acueducto. Es uno de los escenarios más estrictos para Colombia debido a la gran cantidad de parámetros que involucra. • Guías para la calidad del agua potable OMS 2006: Presenta los criterios de calidad que debe tener una fuente de agua para aplicar algunas estrategias de tratamiento según sus niveles de intervención, por ejemplo aguas naturales, con actividades agrícolas, pecuarias, humanas, etc., • Decreto 1594 de 1984: presenta los requisitos de calidad de la fuente para la aplicación de tecnologías convencionales de potabilización con desinfección. • Guías para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas: Contiene los requisitos básicos de calidad de fuentes superficiales para la aplicación de alternativas de potabilización basadas en medios filtrantes y desinfección.
Industrias no ligadas al procesamiento de alimentos pero donde hay contacto directo con el agua	<ul style="list-style-type: none"> • Decreto 1594 de 1984: presenta las normas de calidad mínimas para contacto primario. Puede tomarse como referencia para determinar la calidad que debe lograr un sistema de adecuación de aguas cuando el personal entra en contacto directo con el agua, pero esta no se utiliza en productos alimenticios o como bebida.
Aguas para enfriamiento y aguas para calderas	<ul style="list-style-type: none"> • Manuales fabricantes: De manera regular el fabricante de las calderas o equipos de intercambio de calor sugiere dentro de su manual la calidad del agua para la operación del equipo e incluso el sistema de tratamiento dependiendo del tipo de agua. Cuando no se cuenta con esta información puede recurrirse a diversos tipos de manuales para aguas industriales. • Manuales de aguas industriales: Existen múltiples referencias sobre este tema [40]–[42]. Varias de ellas convergen en la utilización de indicadores de estabilidad como el índice de Langelier y de Ryznar. Mediante estos índices se determinan las características de calidad de la fuente, que pueden clasificarse entre incrustantes y corrosivas. La clasificación sirve como guía para establecer el tratamiento adecuado del agua antes de que entre a las redes de intercambio de calor o calderas.

Restricciones externas

Área mínima para las alternativas, disponibilidad de servicio eléctrico, disponibilidad personal calificado y disponibilidad de insumos para algunas de las tecnologías.

Restricciones de riesgo de contaminación

Fuentes con alto riesgo de contaminación y calidad alta deben contar con sistemas de tratamiento más robustos de los que se podrían plantear teniendo en cuenta solo la calidad de la fuente.

2.4.2. ALTERNATIVAS HABITUALES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS

Potabilización de agua

Las tecnologías convencionales utilizadas en esquemas de potabilización se presentan en la Tabla 9. Para el área rural, es muy valioso el trabajo desarrollado por CINARA y que se resume en las referencia [33]. En ella se plantean diferentes esquemas de tratamiento que responden a las necesidades y limitaciones de las pequeñas poblaciones colombianas. Para escenarios con más libertades o con fuentes de baja calidad, las referencias presentan múltiples esquemas de tratamiento basados principalmente en la calidad del agua a tratar. La Tabla 10 incluye las combinaciones típicas de tecnologías para diversos esquemas de tratamiento [43], [44]. Todos los esquemas deben completarse con una etapa de desinfección para potabilizar el agua.

Tabla 9: Tecnologías convencionales para tratamiento de aguas

Tecnología	Tipo de contaminación
Filtración gruesa	Sólidos.
Filtración rápida	Sólidos finos.
Filtración lenta	Sólidos finos, materia orgánica soluble.
Coagulación/Floculación	Desestabilización de sólidos suspendidos y solubles/Conversión a sólidos sedimentables.
Sedimentación	Sólidos sedimentables.
Aireación	Metales, compuestos oxidables.
Desinfección con pastillas de cloro	Microbiológica.
Desinfección con hipoclorito	Microbiológica.
Desinfección con cloro gaseoso	Microbiológica.
Luz ultravioleta	Microbiológica.

Tabla 10: Esquemas de tratamiento para potabilización de aguas

Esquemas de tratamiento	Tipo de contaminación
Coagulación-Floculación-Sedimentación-Filtración rápida	Aguas con alto contenido de sólidos suspendidos y solubles.
Coagulación-Floculación-Filtración rápida-filtración gruesa	Aguas con alto contenido de sólidos suspendidos y solubles de origen orgánico.
Filtración gruesa-Filtración lenta	Aguas de buena calidad principalmente con sólidos suspendidos de origen orgánico.
Aireación – Sedimentación -Filtración rápida	Aguas con alto contenido de hierro y magnesio.
Filtración gruesa – Coagulación - Filtración rápida	Aguas con alto contenido de sólidos suspendidos.

Agua para enfriamiento y Calderas

La Tabla 11 presenta las alternativas comunes para la adecuación de aguas de enfriamiento y para calderas [40]–[42]. En general las alternativas que implican la adición de agentes químicos se utilizan en ciclos cerrados ya que para sistemas abiertos resultan económicamente inviables.

Tabla 11: Tecnologías para aguas de enfriamiento y calderas

Tecnología	Tipo de contaminación
Sedimentación	Sólidos suspendidos.
Filtración	Sólidos suspendidos.
Centrifugado	Sólidos suspendidos.
Ablandamiento	Alcalinidad, sales de calcio y magnesio.
Intercambio iónico	Alcalinidad, sales de calcio y magnesio, otros iones incrustantes.
Desgasificación	Oxígeno, CO ₂ , Nitrógeno.
Oxidación	Hierro y manganeso.
Adición de agentes químicos solubilizantes	Cationes.
Adición de agentes químicos anticorrosivos	Oxígeno, CO ₂ , acidez.
Adición de agentes químicos dispersantes	Alcalinidad, sales de calcio y magnesio, otros iones incrustantes.
Adición de agentes químicos secuestrantes	Alcalinidad, sales de calcio y magnesio, otros iones incrustantes.
Adición de biocidas	Microbiológica.

Alternativas adicionales

La implementación de este tipo de alternativas puede ser poco común en el sector agroindustrial debido a sus limitaciones. Sin embargo, no se descarta su uso en casos donde exista escasez del recurso o se tengan requerimientos especiales de pureza. La Tabla 12 presenta algunas tecnologías no convencionales para tratamiento de aguas [43].

Tabla 12: Tecnologías no convencionales para tratamiento de aguas

Tecnología	Tipo de contaminación
Adsorción	Color, olor, sabor, metales, contaminantes orgánicos.
Destilación	Sólidos solubles.
Desmineralización	Metales y compuestos metálicos.
Oxidación avanzada	Compuestos orgánicos recalcitrantes, plaguicidas, metales.
Membranas	Sales, metales.

2.4.3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y FACTORES ASOCIADOS

Para esta área se proponen cuatro criterios básicos de evaluación:

- Complejidad operativa del sistema de tratamiento de aguas crudas.
- Requerimientos de inversión inicial del sistema.
- Requerimientos en gastos de operación.
- Confiabilidad del sistema.

La confiabilidad del sistema de operación se entiende como el grado de certidumbre que se tiene respecto a que el sistema no presentará fallas que impliquen el suministro de agua con una calidad inferior a la requerida.

En el caso de necesitar potabilización, puede evaluarse el esquema de tratamiento y de manera independiente las alternativas de desinfección usando los mismos criterios. Esto es posible ya que los esquemas de tratamiento deben entregar un efluente de aproximadamente la misma calidad para poder proceder a la desinfección de una manera segura.

La Tabla 16 del área de proceso presenta los factores asociados al primer criterio. Las Tablas 13, 14 y 15 presentan los factores asociados a los tres últimos criterios.

Tabla 13: Factores de inversión inicial para sistemas de tratamiento

Criterio de evaluación: Requerimientos de inversión inicial del sistema
Factores asociados
Requerimientos en adquisición de predios
Requerimientos en equipos
Requerimientos en remoción de tierras
Requerimientos en obras civiles
Requerimientos en adecuaciones
Requerimientos en automatización

Tabla 14: Factores de gastos de operación para sistemas de tratamiento

Criterio de evaluación: Requerimientos en gastos de operación
Factores asociados
Requerimientos de personal
Requerimientos en insumos
Requerimientos de arrendamientos
Requerimientos en repuestos
Requerimientos en mantenimiento externo
Requerimientos energéticos
Requerimientos de disposición de residuos

Tabla 15: Factores de confiabilidad para sistemas de tratamiento

Criterio de evaluación: Confiabilidad del sistema de tratamiento
Factores asociados
Amortiguación de cambios en la calidad
Independencia del uso de energía eléctrica
Facilidad de las operaciones de mantenimiento
Disponibilidad de recursos para reparaciones

2.4.4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En el criterio de complejidad operativa se descartan aquellas opciones más alejadas de las capacidades operativas de la empresa. En cuanto a costos se seleccionan las alternativas que se ajusten a la disponibilidad y sostenibilidad presupuestal. Para el criterio de confiabilidad, lo ideal es elegir la más confiable. En los casos donde éste no sea el criterio prioritario debe elegirse la alternativa más confiable que se ajuste a la disponibilidad presupuestal de la empresa y/o a su capacidad operativa.

2.5. ÁREA 3: MANEJO DE AGUA EN EL PROCESO PRODUCTIVO Y ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

El principal objetivo del manejo integral de agua en esta área es la minimización del consumo. En comparación con las demás áreas, esta es la de mayor complejidad, ya que implica estrategias para ahorro de agua desde diferentes perspectivas y una metodología solo para generar alternativas que minimicen el consumo de agua a través de diferentes esquemas o redes integradas de manejo de agua.

2.5.1. RESTRICCIONES EN EL ÁREA

En términos de la formulación de alternativas para la propuesta de una red integrada de manejo de agua, las restricciones son aquellas consideraciones que tienen impacto directo en la máxima concentración de contaminante admitido a las unidades, en la concentración de contaminante a la salida, y en el caudal de agua que entra y sale de las unidades. Los principales tipos de restricciones en esta área son:

Requerimientos del producto terminado

Especificaciones con que un producto debe salir al mercado para ser aceptado por el cliente.

Requerimientos de calidad

Requerimiento especial de producto, en el que se busca una ventaja competitiva al estar por encima de las expectativas del mercado o bajo los cuales se espera minimizar la variabilidad en las características del producto entregado [45].

Requerimientos de seguridad

Para garantizar la operación segura de los procesos, algunas variables como temperatura y presión deben mantenerse en rangos o valores específicos. Tal es el caso de autoclaves, reactores y calderas.

Restricciones físico-químicas de los procesos

Existen limitaciones termodinámicas que impiden la separación entre sustancias más allá de ciertos valores, interacciones químicas que reducen la eficiencia de algunas reacciones en presencia de sustancias contaminantes, umbrales de temperatura que alteran las propiedades físicas de algunos materiales, entre otros.

Restricciones de las unidades

La eficiencia de unidades de proceso como ciclones, absorbedores, decantadores, entre otros, limita la extensión en que pueden llevarse a cabo algunas operaciones como la separación sólido-líquido y líquido-líquido.

Restricciones externas

Disponibilidad de tecnologías, disponibilidad de electricidad, disponibilidad de mano de obra calificada y de insumos.

2.5.2. ALTERNATIVAS PARA MANEJO DEL AGUA DE PROCESO

Tecnologías generales para ahorro del consumo de agua

Implican la aplicación de tecnologías de ahorro puntuales que pueden ser utilizadas independientemente del proceso, y que se aplican principalmente a las actividades complementarias.

- Llaves ahorradoras: Son adaptaciones a las llaves de lavamanos, duchas y fregaderos, en donde se agrega aire para aumentar la presión del agua o mediante la aspersion del flujo para dar la sensación

de que hay mayor caudal. De esta manera se puede llegar a tener un ahorro de agua de hasta un 40% en comparación con una toma tradicional [46].

- Válvulas duales en sanitarios: Consisten en dispositivos dentro de los tanques de sanitarios que bajan distintas cantidades de agua. Si es para orina bajan una cantidad de alrededor de 3 litros y si es para residuos sólidos, bajan alrededor de 6 litros de agua. Esta sencilla adaptación puede hacerse a cualquier tipo de sanitario incluyendo los antiguos, que funcionan con válvulas de flotador [46].
- Recolección de aguas lluvias: Cuando se separan de las aguas residuales disminuyen el caudal de agua residual, y pueden ser aprovechadas para otras actividades.
- Hidrolavadoras: Son máquinas que cuentan con una bomba de alta presión impulsada por un motor eléctrico o a gasolina. De esta manera se logra un incremento en la presión del agua a la salida del dispositivo, facilitando las labores de limpieza y minimizando el consumo de agua de lavado entre un 50% y un 70% [1].

Tecnologías de ahorro en el área de proceso:

En el área de proceso hay una serie de alternativas que pueden desempeñar una misma función con distintas eficiencias, encontrándose diferencias significativas en los consumos de agua, en la generación de vertimientos, en el tipo de sustancias en los vertimientos y en su carga contaminante [47]. Regularmente las alternativas con mejor desempeño en estos aspectos son las de mayor costo, o aquellas que pueden requerir personal técnico altamente calificado para su instalación, operación y mantenimiento. Esta situación limita en muchas ocasiones su implementación en el contexto del sector agroindustrial a pequeña escala en Colombia. Sin embargo, vale la pena mencionar algunas de ellas, porque es posible que lleguen a necesitarse en una situación crítica con requerimientos de calidad o legislativos muy altos que no puedan satisfacerse con tecnologías más simples.

- Secuencias de intercambio de calor y lavado a contracorriente.
- Intercambiadores de placas.
- Sistemas híbridos.
- Procesos automatizados.
- Membranas.

Buenas prácticas de calidad aplicadas al manejo del agua

Los programas de calidad incluyen una serie de actividades que buscan mantener bajo control todos aquellos factores que individual o colectivamente influyen en las características deseables o especificadas para un producto [48]. Algunas de estas actividades están relacionadas con el uso del agua y de manera simultánea integran aspectos de minimización de consumo, reutilización, reciclaje de corrientes, y reducción de carga contaminante en aguas residuales. Las principales actividades son las siguientes:

- Mantenimiento preventivo.
- Minimización de la generación de residuos.
- Capacitación continua del personal.
- Monitoreo, seguimiento, evaluación y mejoramiento continuo de los planes de gestión de residuos y manejo de agua.
- Separación de redes de recolección de aguas lluvias, aguas residuales industriales, aguas grises y aguas negras, para permitir la reutilización de una mayor cantidad de aguas dentro del proceso.

Redes integradas de manejo de agua

Requiere la modificación o la construcción de una red de manejo de agua que envuelve estrategias de reutilización y reciclaje. La reutilización corresponde al uso del efluente de una unidad o actividad como entrada

de otras unidades o actividades de la empresa. El reciclaje se entiende como la utilización de parte del efluente de una unidad o actividad de la empresa, como alimentación de esa misma unidad o actividad [49].

Como se mencionó en el capítulo 1, existen una serie de metodologías inspiradas en los conceptos de integración de procesos, y que buscan minimizar el consumo del agua. Estos métodos entregan básicamente esquemas o redes que permite la reutilización y el reciclaje del agua del proceso. Para este trabajo se escogieron métodos recientes que superan varios de los problemas de sus predecesores [50], pero que por su simplicidad resultan fácilmente aplicables al sector MIPYME.

Los métodos seleccionados parten del supuesto de procesos continuos y están diseñados en función de un solo contaminante en el agua. En MIPYMES generalmente se tienen procesos discontinuos o semi-continuos con varios contaminantes, sin embargo la metodología seleccionada puede aplicarse fácilmente en casos reales si se cuenta con la capacidad de almacenamiento de agua suficiente y si se selecciona apropiadamente un contaminante clave. Existen otras metodologías para procesos discontinuos que tienen en cuenta varios contaminantes pero requieren un gran número de medidas y algoritmos complejos de minimización, lo que dificulta en gran medida su aplicación [9], [51], [52].

Los métodos envuelven el cálculo de los objetivos de ahorro y minimización de vertimientos, y la propuesta de un esquema o red integrada de agua para lograr esos objetivos. En este trabajo se utilizará una modificación de la metodología denominada “material recovery pinch diagram” (MRPD), con la cual se establecen los objetivos de ahorro y minimización de vertimientos. Para la generación de las redes de manejo de agua se adaptará el algoritmo denominado “nearest neighbors algorithm” (NNA) [50]. El anexo 1 describe las dos metodologías.

2.5.3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y FACTORES ASOCIADOS

Para la selección de la alternativa de manejo de agua de proceso se propone como único criterio de evaluación la complejidad operativa. Esto se hace ya que el criterio de calidad se integra en gran medida a las propuestas desde que se definen las concentraciones máximas permisibles de contaminante. En consecuencia, la prioridad debe ser la selección de una alternativa que logre el menor consumo de agua y que desde lo operacional sea aceptable para la empresa, así no resulte la opción más económica. Esto se justifica, teniendo en cuenta que cada litro que se ahorre en consumo, es un litro menos para conducir hasta la empresa, para tratar a la entrada y para tratar a la salida. Esta estrategia conduce a una reducción en el costo global del manejo de agua pues los costos de conducción del agua, de tratamiento de agua cruda y de tratamiento de aguas residuales son directamente proporcionales a los caudales de agua en cada área [43], [53].

La Tabla 16, presenta algunos de los factores asociados a la complejidad que puede implicar la operación de una red de manejo de agua. Dependiendo de las particularidades de los casos y de los resultados del diagnóstico, pueden agregarse o excluirse factores para el proceso de valoración.

Tabla 16: Factores de complejidad en la operación de una red de manejo de agua

Criterio de evaluación: Complejidad en la operación de las alternativas
Factores Asociados
Necesidades de mantenimiento de la alternativa
Calificación técnica que requiere el personal
Requerimientos de Continuidad del servicio de energía
Requerimientos de personal
Requerimientos de insumos
Requerimientos de repuestos

2.5.4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Al revisar los resultados del ejemplo del proceso de almibarado en la sección 2.1, se encuentra que la alternativa más compleja de operar fue precisamente la que minimizó el consumo de agua fresca, lo que aparentemente genera incertidumbre en la selección. Esta situación de compromiso entre complejidad de operación y minimización del consumo es completamente normal en el área de proceso y por ello la propuesta para la selección es tomar la alternativa más compleja que desde lo práctico resulte operable para la empresa.

Un grado de complejidad aceptable, se determina en consenso con quienes toman las decisiones en la empresa, y para establecimientos en funcionamiento también es importante integrar al personal operativo, pues son ellos quienes conocen de manera directa las dificultades que involucran los procesos.

2.6. ÁREA 4: GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Para los propósitos de este trabajo, se consideran aguas residuales, “la o las corrientes cuya concentración de contaminante imposibilite su reciclaje o reutilización dentro del proceso”, sin embargo, estas si podrán ser aprovechadas externamente o valorizadas. En este sentido y de acuerdo a los principios del manejo integral, la gestión de aguas residuales implica en orden de prioridad las alternativas de aprovechamiento externo y valorización, y en segunda instancia los mecanismos de tratamiento que permitan el cumplimiento de la norma de vertimientos.

2.6.1. RESTRICCIONES EN EL ÁREA

Restricciones normativas para el aprovechamiento externo

Para este caso existen las opciones generales de uso para riego, y de uso pecuario. En ambos casos el agua residual debe cumplir con los parámetros de calidad a los que hace referencia el artículo 20 del decreto 3930 de 2010. Estos parámetros no han sido establecidos de manera oficial, así que mientras se reglamentan, siguen siendo aplicables los valores de referencia del decreto 1594 de 1984.

Prohibición de vertimientos

Según el decreto 3930 de 2010 los vertimientos están prohibidos en la cabeceras de fuentes de agua, en sectores aguas arriba de bocatomas y cuando el uso reglamentado del cuerpo receptor se vea impedido por el vertimiento.

Restricciones normativas para vertimientos a cuerpos de agua, sistemas de alcantarillado, suelos y aguas marinas

Todas las empresas que generen vertimientos están obligadas a tramitar el respectivo permiso ante las autoridades ambientales de su jurisdicción y sus descargas deberán cumplir con criterios de calidad y de carga máxima. Mientras se fijan las normas de vertimientos a cuerpos de agua y suelos a que alude el artículo 1 del decreto 4728 de 2010, se aplican los criterios establecidos en el decreto 1594 de 1984.

Restricciones técnicas

La topografía y algunas características del suelo como permeabilidad y estabilidad podrían hacer inviables las alternativas de aprovechamiento y/o aumentar el riesgo de deslizamientos. En caso de requerirse el tratamiento de aguas residuales algunos de los factores críticos para la sección del sistema de depuración son la carga contaminante del agua residual, la presencia de sustancias tóxicas y la temperatura ambiente del área.

Restricciones externas

Usuarios aguas abajo del vertimiento, la ausencia de cultivos y ganado, la falta de terrenos, servicio eléctrico, mano de obra calificada e insumos pueden impedir el aprovechamiento de aguas residuales o limitar la aplicación de algunas tecnologías de tratamiento.

2.6.2. ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Uso pecuario y riego

Antes de considerar un sistema de tratamiento para las aguas residuales, lo primero que debe determinarse es la posibilidad de aprovechar el agua en riego o para uso pecuario. Esto depende principalmente del análisis de los riesgos de deslizamientos, y de la existencia de zonas cultivables o ganaderas en las que pueda aprovecharse el vertimiento. En caso de contarse con suelos apropiados y con el aval de los propietarios, pueden considerarse algunas alternativas como las que se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17: Alternativas para sistemas de riego

Sistemas de riego	Características del suelo y el terreno
Aspersores	Suelos de alta velocidad de infiltración y terrenos desnivelados.
Anegamiento	Suelos de baja velocidad de infiltración, cultivos con requerimientos especiales de inundación.
Surco y zanja	Suelos de baja velocidad de infiltración, terrenos nivelados.
Goteo	Suelos porosos y desnivelados.

En los casos donde es posible el aprovechamiento, pero la calidad del agua residual es insuficiente, debe plantearse un sistema de tratamiento que permita obtener un afluente de la calidad requerida para el aprovechamiento. En cualquier otro caso el sistema debe cumplir con la legislación de vertimientos vigente.

Valorización de corrientes de agua residual

Son aquellas operaciones cuyo resultado principal es que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular[54].

En el caso de residuos sólidos lo más común la valorización energética, pero para aguas residuales es mucho más aplicable la valorización material, que busca la obtención de nuevos materiales o el reciclaje de ellos para evitar el uso de nuevas materias primas [55].

2.6.3. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Desde el punto de vista técnico el tratamiento se hace en función de las características del agua residual y de las características exigidas en el efluente. En general las alternativas hacen uso de procesos físicos, químicos, biológicos y sus combinaciones [53]. Los procesos biológicos tienen más restricciones en términos de sustancias tóxicas, temperatura y cargas contaminantes, pero regularmente son más económicos que aquellos que involucran la adición de sustancias químicas [56]. En la literatura la información sobre el tema es extensa. Para área rural se han planteado alternativas enfocadas principalmente a las aguas residuales domésticas [30], [31] y que podrían ser útiles para el sector industrial cuando sus aguas residuales tengan características similares.

Los sistemas de tratamiento incluyen varias tecnologías en forma de barreras graduales de control de contaminación. La primera barrera o pretratamiento se utiliza para eliminar constituyentes que pueden afectar negativamente los equipos y los procesos subsecuentes de tratamiento. El tratamiento primario persigue principalmente la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica, lo que facilita el desempeño de las unidades de tratamiento secundario mejorando la eficiencia del tratamiento biológico o disminuyendo la necesidad de sustancias químicas. Finalmente pueden requerirse unidades de tratamiento avanzado o terciario cuando existen sustancias que superan las anteriores barreras, como el caso de nutrientes, sustancias recalcitrantes, metales, entre otros [57].

La Tabla 18 presenta algunas de las tecnologías más comunes para el tratamiento de aguas residuales industriales [53].

Tabla 18: Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

Barrera	Tecnología	Contaminantes a controlar
Pretratamiento	Cribado	Sólidos gruesos.
	Neutralización	Alcalinidad, acidez.
	Pre-sedimentación	Sólidos suspendidos.
	Flotación	Sólidos suspendidos, grasas, aceites.
	Aireación	Sólidos orgánicos disueltos.
Tratamiento primario y secundario	Sedimentación primaria	Sólidos suspendidos.
	Tratamiento acuático (humedales artificiales)	Sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo.
	Filtros biológicos	Sólidos orgánicos disueltos.
	Biodiscos	Sólidos suspendidos y sólidos orgánicos disueltos.
	Lagunas	Sólidos suspendidos, nitrógeno y fosforo.
	Sistema séptico	Sólidos suspendidos y sólidos disueltos orgánicos.
	Filtración anaerobia	Sólidos disueltos orgánicos y sólidos suspendidos.
	Procesos de manto de lodos	Sólidos disueltos orgánicos y sólidos suspendidos
Procesos de lodos activados	Sólidos disueltos orgánicos y sólidos suspendidos.	
Tratamiento terciario	Coagulación/Floculación	Sólidos disueltos orgánicos e inorgánicos.
	Absorción	Sólidos disueltos orgánicos e inorgánicos.
	Intercambio iónico	Sólidos disueltos inorgánicos.
	Ósmosis inversa	Sólidos disueltos inorgánicos.
	Oxidación Avanzada	Compuestos fenólicos y plaguicidas.
	Membranas	Sólidos disueltos inorgánicos.

2.6.4. VERTIMIENTO SOBRE SUELOS

Esta estrategia puede utilizarse en los siguientes casos:

- Cuando no se cumpla la norma de vertimiento a cuerpos de agua pero si la de suelos, y se tenga disponibilidad de área.
- Cuando esté prohibido el vertimiento a un cuerpo de agua
- Cuando no existan cuerpos de agua para el vertimiento.

Algunos de los métodos de disposición pueden ser aprovechados para el pos -tratamiento de efluentes y para recarga de acuíferos siempre y cuando el tratamiento previo garantice una calidad apropiada del efluente. La Tabla 19 muestra las alternativas convencionales de disposición a suelos [58].

Tabla 19: Tecnologías para disposición de vertimientos sobre el suelo

Tecnología	Contaminantes controlados y aplicabilidad.
Fosas de infiltración rápida	Control de DBO, sólidos suspendidos y microorganismos. Aplicable en terrenos con suelos permeables sin presencia de niveles freáticos altos.
Sistemas de infiltración lenta	Control de DBO, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo compuestos orgánicos traza y patógenos. Aplicable en terrenos con pendientes inferiores al 20%, suelos con baja permeabilidad. El nivel freático puede ser alto, pero se recomienda que no supere los 0,5 metros.
Sistemas de flujo superficial	Control de DBO, Sólidos suspendidos y nitrógeno y compuestos orgánicos traza. Aplicable en terrenos inclinados y de baja permeabilidad.

2.6.5. CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En esta área se proponen los mismos criterios de evaluación y se hacen consideraciones de selección análogas a las que se plantearon en el área abastecimiento de agua. Los principales factores asociados se presentaron en las Tablas 13 a 16.

2.7. DIAGNÓSTICO

La sección presenta una guía donde se recopila la información básica con que debe contarse para la elaboración de una propuesta de manejo integral de aguas en una empresa del sector MIPYME agroindustrial, de tal manera que pueda aplicarse a una gran variedad de escenarios que van desde proyectos de empresas que no cuentan con prestadores del servicio de suministro de agua, hasta empresas en funcionamiento en regiones con buena disponibilidad de servicios.

Está organizada en forma secuencial empezando por los elementos generales del diagnóstico que son comunes a varias áreas del manejo del agua, y continúa con los elementos más particulares. En la parte de caracterización de fuentes se amplió la discusión de los elementos del diagnóstico por su mayor complejidad y por los múltiples papeles que desempeñan. Por ejemplo, la calidad de la fuente puede actuar como restricción para los procesos de selección de alternativas en las áreas de abastecimiento y de adecuación de agua cruda, y como factor de diseño en la formulación de alternativas de redes de agua para el proceso.

Cada elemento del diagnóstico se presenta con los principales aspectos a los que está asociado, de manera que pueda identificarse su influencia en la formulación de alternativas, en el proceso evaluativo o en la restricción de tecnologías.

Los elementos a utilizar para un diagnóstico específico deben seleccionarse dependiendo del caso particular de cada empresa. Así por ejemplo, para una empresa que cuenta con sistema de tratamiento de aguas residuales, el diagnóstico debe estar enfocado primero a revelar los elementos que permiten evaluar el desempeño del sistema de gestión de vertimientos, antes que a la consideración de elementos para formular nuevas alternativas.

2.7.1. ELEMENTOS GENERALES DEL DIAGNÓSTICO

La Tabla 20 contiene algunos de los elementos de diagnóstico con influencia simultánea en varias áreas, como lo relacionado a las actividades productivas de la empresa, a su ubicación y al personal disponible.

Tabla 20: Elementos generales del diagnóstico

Actividades y características de la empresa relacionadas al manejo del agua	
<i>Descripción de las actividades realizadas en la empresa/diagrama de flujo/Código CIU</i>	Ayuda a identificar los usos del agua en la empresa.
<i>Procesos físicos, químicos y biológicos involucrados</i>	Permite establecer concentraciones de contaminantes en las corrientes de salida de algunas unidades, debido a equilibrios de fases, solubilidades, etc., y la presencia de nuevas sustancias químicas o microorganismos que pueden llegar a las aguas de la empresa.
<i>Descripción de tecnologías y maquinarias</i>	Ayuda a identificar los usos del agua en la empresa y abre la posibilidad a la implementación de mejores tecnologías con menor consumo de agua e impacto ambiental como alternativas en el área de manejo del agua de proceso.
<i>Descripción de productos, especificaciones de calidad y requerimiento de inocuidad relacionadas con el uso del agua</i>	Ayuda a establecer las concentraciones máximas admisibles de contaminantes para las unidades de proceso y también direcciona los objetivos de calidad del sistema de tratamiento.
<i>Sustancias peligrosas manejadas</i>	Permite identificar sustancias especiales en las aguas de la empresa y direcciona las alternativas apropiadas para su manejo.
<i>Usos del agua</i>	Ayuda a definir los objetivos de tratamiento de agua cruda y las concentraciones máximas permisibles en las unidades de proceso.
<i>Distribución de actividades en el tiempo para procesos discontinuos Esquema distribución de agua</i>	Orienta el proceso de selección de alternativas para el manejo de agua de proceso, cuando se evalúan bajo el criterio de complejidad en la operación de las alternativas.
<i>Esquema recolección de aguas residuales industriales y domésticas</i>	Tienen influencia en la selección de la ubicación del sistema de tratamiento, en el tipo de flujo y en la posibilidad de tratamiento independiente para aguas residuales y domésticas.
<i>Esquema recolección de aguas lluvias</i>	Ayuda a definir las alternativas para aprovechamiento de agua lluvia y su integración a la red de agua de proceso o incluso al sistema de tratamiento de agua cruda.
<i>Descripción de áreas libres</i>	Permite identificar restricciones en área disponible para algunas alternativas.
Descripción del personal	
<i>Número de empleados Actividades desarrolladas por los empleados</i>	Permite establecer la disponibilidad del personal para las actividades adicionales relacionadas al manejo del agua, o la necesidad de contrataciones adicionales.
<i>Escolaridad de los empleados</i>	Puede restringir el uso de algunas tecnologías que requieren personal calificado para su operación.
Ubicación	
<i>Cabecera municipal o zona rural Descripción del acceso a la empresa Distancia/tiempo a centro poblado</i>	Afecta la disponibilidad de ciertas tecnologías y de recursos para su operación.
<i>Descripción topográfica de la zona</i>	Tiene influencia en la ubicación de las estructuras de captación, conducción, tanques de almacenamiento, en los riesgos de discontinuidad en el sistema de abastecimiento, en las alternativas de manejo de riesgo que pueden implementarse y en la posibilidad de aprovechamiento en sistemas de riego.
Clima	
<i>Temperatura</i>	Afecta el desempeño de algunas tecnologías de tratamiento biológico, los niveles mínimos de algunas fuentes y e incluso su calidad.
<i>Lluvias</i>	Afecta la calidad del agua y está relacionada con los niveles máximos de las fuentes de agua. También es importante cuando se requieren analizar algunos riesgos en el área de abastecimiento.
Disponibilidad inmediata y más cercana de recursos	
<i>Repuestos Insumos químicos</i>	Restringe o el uso de algunas tecnologías o influye en su confiabilidad o facilidad operacional.

<i>Servicio técnico</i>	
<i>Materiales de construcción</i>	
Servicios	
<i>Descripción del servicio eléctrico/continuidad</i>	Restringe el uso de algunas tecnologías e influye en la confiabilidad o facilidad con que pueden operarse.
<i>Descripción de la gestión de residuos ordinarios y especiales</i>	Afecta la facilidad con que pueden operarse algunas alternativas de manejo de agua.
Descripción del servicio de agua	
<i>Tipo de Tratamiento/Calidad</i>	Ayuda a definir las necesidades de tratamiento interno.
<i>Cantidad/continuidad</i>	Define si hay necesidades de almacenamiento o incluso de fuentes auxiliares de agua.
<i>Tarifa</i>	Puede ser un factor relevante para los análisis de requerimientos en gastos de operación.
Recursos económicos	
<i>Disponibilidad presupuestal, recursos financieros para el desarrollo e implementación de la propuesta</i>	Determina si los criterios relacionados con la parte económica deben considerarse prioritarios. Funciona como restricción para algunas tecnologías y alternativas que pueden tener alto costo.

2.7.2. ELEMENTOS ADICIONALES PARA EL ÁREA DE ABASTECIMIENTO

La Tabla 21 recoge elementos de diagnóstico específicos del área de abastecimiento, asociados a la descripción de la fuente de agua, a los usos de suelos en los alrededores de la conducción y a los usos de la fuente de agua.

Tabla 21: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de abastecimiento

Descripción de la o las fuentes en los siguientes aspectos	
<i>Fuente superficial/subterránea</i>	Sirve como guía para formular el tipo de estructuras de captación. Da algunos indicios de la calidad de la fuente y de su vulnerabilidad a cambios en calidad o cantidad.
<i>Características de lechos y riveras en fuentes superficiales</i>	Afecta las alternativas a seleccionar para obras de captación.
<i>Características del suelo en fuentes subterráneas</i>	
<i>Estabilidad del terreno</i>	Tiene influencia en la evaluación de los riesgos de contaminación de la fuente y de discontinuidad del suministro
<i>Altura respecto a la empresa/disponibilidad de cabeza de presión</i>	Determina las necesidades de bombeo o de estructuras auxiliares como tanques de alivio de presión en el sistema de abastecimiento.
Usos del suelo en los alrededores de la conducción y de la fuente	
<i>Protección/desprotección de la fuente</i>	Tiene influencia en las variaciones de calidad, y oferta de agua de la fuente.
<i>Tipos de cultivos</i>	Tiene influencia en las variaciones de calidad, y oferta de agua de la fuente. Además orienta las posibles alternativas de riego.
<i>Uso de agroquímicos/pesticidas</i>	Afectan la calidad del agua de la fuente y guían el proceso de formulación de alternativas para el tratamiento.
<i>Vertimientos sobre el suelo</i>	Tiene influencia en la calidad de las aguas subterráneas y por lo tanto en las alternativas de tratamiento de agua cruda a formular cuando la fuente de la empresa no sea superficial.
<i>Presión sobre la fuente (otros usuarios directos)</i>	Afecta la disponibilidad del recurso.
<i>Disponibilidad de áreas para estructuras de alivio de presión y tanques de almacenamiento elevados</i>	Afecta los detalles del sistema de abastecimiento, y la posibilidad de flujo por gravedad.

Usos de la fuente	
<i>Uso reglamentado para la fuente</i>	En los casos en que las autoridades ambientales hayan asignado un uso para la fuente, este puede convertirse en una restricción para la obtención de la concesión de aguas.
<i>Estado del permiso de concesión</i>	En caso de que se haya negado, implica la búsqueda de fuentes de agua alternativas. Todos los usuarios deben al menos hacer la solicitud a la respectiva autoridad ambiental.
<i>Otros usuarios con concesiones de agua sobre la fuente</i>	Puede influenciar la decisión sobre la autorización del permiso cuando hay escasez del recurso.
Descripción captación/conducción	
<i>Distancia a captación</i> <i>Accesibilidad</i> <i>Tipo de estructura de conducción</i> <i>Tipo de flujo (gravedad o bombeo)</i>	Tiene influencia en la evaluación de riesgos de discontinuidad en el suministro de agua, en las variaciones en su calidad y en el impacto ambiental dependiendo del estado de las obras.
<i>Disponibilidad de cabeza de presión</i>	Puede restringir las posibilidades de flujo por gravedad del sistema.
<i>Mecanismo de devolución de excesos</i> <i>Caudal Captado</i> <i>Fugas a lo largo del sistema</i>	Son útiles para establecer mejoras y recomendaciones sobre esquemas de abastecimiento de menor impacto ambiental.

2.7.3. ELEMENTOS ASOCIADOS A LA CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA

Para resaltar la importancia de la caracterización de la fuente de agua, se presentan en una tabla independiente los principales elementos asociados a su diagnóstico (Tabla 22). La información se complementa más adelante con una discusión sobre su función en la formulación y evaluación de alternativas en diferentes áreas.

Tabla 22: Elementos asociados a la caracterización de la fuente

Caracterización de la fuente	
<i>Cantidad de agua disponible en la fuente</i>	Afecta el proceso de selección de la fuente, del tipo de captación y la consideración de fuentes de respaldo.
<i>Continuidad de la fuente</i>	Afecta el proceso de selección de la fuente, el tipo de captación, la consideración de fuentes de respaldo y la necesidad de estructuras de almacenamiento.
<i>Calidad de la fuente de agua</i>	Restringe el tipo de alternativas que pueden formularse para alcanzar los objetivos de calidad en sistemas de tratamiento de aguas crudas.
<i>Cambios en la fuente en períodos de invierno y verano (Calidad, cantidad, nivel, crecientes, etc.)</i>	Afecta las alternativas a considerar para obras de captación, tanques de almacenamiento y sistema de tratamiento de aguas.

Los resultados de la caracterización de la fuente son un insumo fundamental para la toma de decisiones en aquellos casos en los que se cuenta con 2 o más fuentes para el abastecimiento y para el proceso de evaluación de alternativas en el área de tratamiento de agua cruda. Existen diversas metodologías para valorar la calidad de una fuente, pero siempre es más práctico comparar su calidad en el contexto del uso específico que pretende dársele.

La caracterización de la calidad de la fuente de agua implica determinar los valores o concentraciones de parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Para los propósitos del sector industrial, la caracterización debe hacerse respecto a los usos requeridos en la empresa que comúnmente son:

- Uso para consumo humano.
- Uso como materia prima.

- Uso como fluido de servicio.
- Uso como fluido de lavado.
- Uso en duchas y sanitarios.

Para determinar los usos frecuentes en el sector, se tuvo en cuenta que una parte importante de las empresas agroindustriales se dedican a la manipulación y transformación de alimentos [22]. Adicional a esto, las empresas necesitan agua para el consumo de sus empleados, para las labores rutinarias de aseo, para generación de vapor y para enfriamiento cuando tienen operaciones de transferencia de calor dentro del proceso.

Otro aspecto que debe ser tenido en cuenta es la presunción de contaminación por las actividades aguas arriba de la captación. En caso que se conozca la presencia de cultivos, valdría la pena caracterizar las aguas para determinar la presencia de algos plaguicidas que podrían afectar negativamente el proceso.

Los usos más restrictivos son los de consumo humano y como materia prima en empresas relacionadas con el sector alimenticio. En estos casos, la calidad de la fuente debe cumplir con los parámetros de agua potable.

Para empresas sin requerimientos de agua potable pero que necesitan agua para calderas o para procesos de intercambio de calor, la caracterización debe hacerse en aquellos parámetros que afectan el desempeño y durabilidad de tuberías y equipos. Cuando el agua se utiliza como materia prima en un sector distinto al alimenticio, la calidad está determinada por los requerimientos específicos del proceso y de calidad del producto. En cualquier caso, siempre que la actividad productiva implique contacto directo de seres humanos con agua, deberá realizarse caracterización microbiológica. La Tabla 23 presenta el listado de parámetros mínimos de caracterización para agua potable, agua para servicios y un caso adicional donde el agua se utiliza en un sector diferente al alimenticio [59], [60].

Tabla 23: Parámetros mínimos de caracterización para algunos usos del agua

Consumo humano o sector alimentos	Como agua de servicio: calderas, intercambiadores de calor	Productos de lana virgen (implica el lavado de lana)
<ul style="list-style-type: none"> • Turbidez • Color • Coliformes totales • Coliformes fecales 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos disueltos totales • pH • Dureza Cálcica • Dureza total • Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Color • pH • Turbidez • Coliformes totales

Debido a que las medidas de caudal de la fuente y de la calidad durante la caracterización son variables respecto al tiempo, el sistema de abastecimiento y el sistema de tratamiento o adecuación de aguas crudas debe estar preparado para funcionar apropiadamente en el peor escenario. Estos escenarios son función de condiciones ambientales y de situaciones que impactan la calidad del recurso o que alteran su disponibilidad. A continuación se presentan algunos criterios para la identificación de situaciones críticas.

Importancia de las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales son importantes para definir escenarios de baja disponibilidad o de baja calidad, y que por lo tanto determinan el periodo apropiado para realizar las mediciones. La Tabla 24 presenta una relación entre condiciones ambientales y escenarios de disponibilidad y calidad para distintos tipos de fuentes [36].

Tabla 24: Relación entre características de las fuentes de agua y las condiciones ambientales

Condición ambiental	Implicaciones
Tiempo Seco	<ul style="list-style-type: none"> • La disponibilidad de agua de fuentes superficiales debe hacerse en estas condiciones, bien sea en términos de caudal para ríos o de nivel para lagos. • La altura o profundidad en pozos a la que se realiza el aprovechamiento en fuentes subterráneas debe hacerse en estos periodos ya que en tiempo seco al agua subterránea desciende de nivel. • Para fuentes pequeñas con variaciones significativas de caudal la caracterización debe hacerse en este escenario ya que implica una concentración de los contaminantes transportados.
Tiempo lluvioso	<ul style="list-style-type: none"> • Para fuentes con gran aporte de escorrentía superficial, la calidad debe determinarse en este escenario, debido a los cambios de calidad que produce el arrastre de materiales por escorrentía.

Cuando no se cuente con información de la oferta y la calidad de la fuente en los dos periodos, se utiliza la evaluación respecto a los riesgos de cambios significativos en calidad y riesgos de discontinuidad que se propuso en el área de abastecimiento.

2.7.4. ELEMENTOS ADICIONALES PARA EL ÁREA DE PROCESO

La Tabla 25 presenta algunos elementos de diagnóstico específicos del área de proceso como la descripción de grifería, y las actividades asociadas a programas de gestión de calidad.

Tabla 25: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de proceso

Área de proceso	
Descripción sanitarios, grifería y equipo de lavado	Determina la posibilidad de disminuir el consumo a partir de tecnologías ahorradoras en grifería, sanitarios y equipos de lavado.
Detección de fugas y pérdidas de agua	Enfoca las actividades de mantenimiento y reparaciones para evitar el desperdicio.
Medición de consumos	Útil para la fijación de objetivos de minimización de gasto de agua.
Actividades de mantenimiento preventivo	Permite modificar o proponer nuevos procedimientos para asegurar una mejor gestión del agua.
Descripción sistemas de calidad y mejoramiento	Permite identificar fortalezas de la empresa en la implementación de prácticas de mejor gestión del agua.
Balance de agua	Determina los caudales de entrada y salida para todas las operaciones que implique uso del agua.

2.7.5. ELEMENTOS ADICIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA CRUDA

Para el área de tratamiento del agua cruda, la mayoría de los elementos importantes para el proceso de diagnóstico han sido recogidos dentro del diagnóstico general y dentro del diagnóstico de la fuente. La Tabla 26 presenta un elemento que no quedó dentro de los anteriores.

Tabla 26: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de tratamiento de agua cruda

Requerimientos de calidad	
Calidad requerida para los usos	Es una restricción para los objetivos del sistema de tratamiento de aguas crudas que sirve como guía para la formulación de alternativas en el área.

2.7.6. ELEMENTOS ADICIONALES PARA LA GESTIÓN DE VERTIMIENTOS

La Tabla 27 presenta los elementos de diagnóstico específicos del área de gestión de vertimientos, asociados a aspectos como las normatividad ambiental y el uso de la fuente o del terreno donde se hacen las descargas.

Tabla 27: Elementos adicionales de diagnóstico para el área de gestión de vertimientos

Gestión de vertimientos	
<i>Caracterización de aguas residuales</i>	Es la principal guía para la formulación de alternativas en el área de gestión de vertimientos.
<i>Criterios de descargas a cumplir según actividad económica</i>	Determina los objetivos del sistema de tratamiento de aguas residuales y sirve como guía para la formulación de alternativas en el área.
<i>Disponibilidad de cultivos y actividad ganadera para aprovechamiento de vertimientos</i>	Es una restricción para la formulación de alternativas de aprovechamiento de vertimientos.
<i>Cuerpo de agua donde se hace el vertimiento o disponibilidad de cuerpos de agua para vertimientos</i>	Define el tipo de disposición final a realizar, y el permiso de vertimiento a solicitar (sobre fuente superficial o suelo).
<i>Identificación de corrientes de agua residual que puedan disminuir el consumo de materias primas</i>	Orienta los esfuerzos tendientes a realizar la valorización de corrientes de agua residual.
Usos de la fuente a la que se hace el vertimiento (superficial o subterránea)	
<i>Uso reglamentado para la fuente</i>	En los casos en que las autoridades ambientales hayan asignado un uso para la fuente, este puede convertirse en una restricción para la obtención del permiso de vertimientos. También influencia los objetivos de calidad para el sistema de tratamiento.
<i>Estado del permiso de vertimientos</i>	Todos los usuarios deben al menos hacer la solicitud a la respectiva autoridad ambiental.
<i>Usos del agua impactada por el vertimiento</i>	Puede influenciar la decisión sobre la autorización del permiso de vertimientos cuando afecta los usos aguas abajo, o la aceptabilidad de la comunidad a las actividades desarrolladas por la empresa.
Vertimientos a suelos	
<i>Características del suelo</i>	Orienta el proceso de formulación de alternativas para el pos tratamiento sobre el suelo y la determinación de riesgos de deslizamiento en alternativas de riego.

2.8. REFERENCIAS

- [28] Agencia de Protección Ambiental - Ministerio de Ambiente y Espacio Público, Producción más limpia: Guía práctica y estudios de caso. Buenos Aires: Gobierno ciudad de Buenos Aires, 2009, p. 60.
- [29] A. Flores, C. Buckley, and R. Fenner, "Selecting sanitation systems for sustainability in developing countries.," *Water Sci. Technol.*, vol. 60, no. 11, pp. 2973–82, Jan. 2009.
- [30] D. P. Bernal, D. A. Cardona, A. Galvis, and M. R. Peña, "Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales.," in *Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas*, 2002, pp. 19–27.
- [31] A. Galvis, D. A. Cardona, and D. P. Bernal, "Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domésticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes SELTAR," in *Conferencia Internacional: De la Acción Local a las Metas Globales*, 2004, pp. 1–10.

- [32] M. C. Henández, *Toma de decisiones en las empresas: entre el arte y la técnica : metodologías, modelos y herramientas*. Bogotá: Ediciones UniAndes, 2006, p. 466.
- [33] A. Galvis and V. Vargas, "Modelo de selección de tecnología y análisis de costos en el tratamiento de agua para consumo humano, SELTEC," in *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*, 2000, pp. 234–242.
- [34] M. Dakwala, B. Mohanty, and R. Bhargava, "A process integration approach to industrial water conservation: a case study for an Indian starch industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 18, pp. 1654–1662, Dec. 2009.
- [35] S. R. Wan Alwi, Z. Manan, M. H. Samingin, and N. Misran, "A holistic framework for design of cost-effective minimum water utilization network.," *J. Environ. Manage.*, vol. 88, no. 2, pp. 219–52, Jul. 2008.
- [36] Dirección Nacional de Agua y Saneamiento básico, "Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título B." Ministerio de Desarrollo Económico, Bogotá, 2000.
- [37] V. Te Chow, *Hidráulica de los canales abiertos*. McGraw-Hill, 1994, p. 667.
- [38] J. Moreno, "Especificaciones técnicas para el diseño de captaciones por gravedad de aguas superficiales." CEPIS, Lima, p. 20, 2004.
- [39] R. Aguero, "Guía para el diseño y construcción de captación de manantiales." CEPIS, Lima, p. 24, 2004.
- [40] M. R. Lapeña, "Tratamiento de aguas de refrigeración," in *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*, Barcelona: Alfaomega Marcombo, 2000, pp. 117–134.
- [41] M. A. Gonzalez and D. M. Sánchez, *Análisis de riesgos del tratamiento del agua para calderas*. México D.F.: Plaza y Valdes, 1999, p. 93.
- [42] K. Moss, *Heating and Water Services Design in Buildings*, 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2003, p. 296.
- [43] J. A. Valencia and A. R. Soto, *Teoría y práctica de la purificación del agua*, 3rd ed. Bogotá: McGraw Hill, 2000, p. 793.
- [44] N. Gertsen and L. Sønderby, *Water Purification*. New York: Nova Science Publishers, 2009, p. 300.
- [45] B. L. Hansen and P. M. Ghare, *Control de calidad: teoría y aplicaciones*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 1990, p. 549.
- [46] C. A. Franco, J. C. Rueda, and C. L. Villalba, *III Semana de la ciencia y la tecnología: el agua*. Madrid: Ministerio de Educación, 2012, p. 249.
- [47] American Society for Testing and Materials, *Manual de aguas para usos industriales*. México D.F.: Limusa, 1997, p. 457.
- [48] J. Cascio, *Guía ISO 14000: Las nuevas normas internacionales para la administración ambiental*, McGraw Hil. México, 1997.
- [49] D. C. Y. Foo, "State-of-the-Art Review of Pinch Analysis Techniques for Water Network Synthesis," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 11, pp. 5125–5159, Jun. 2009.
- [50] R. Prakash and U. V. Shenoy, "Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 255–268, Jan. 2005.
- [51] C.-L. Chen and J.-Y. Lee, "A graphical technique for the design of water-using networks in batch processes," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 63, no. 14, pp. 3740–3754, Jul. 2008.
- [52] C.-L. Chen and J.-Y. Lee, "On the use of graphical analysis for the design of batch water networks," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 12, no. 2, pp. 117–123, Jun. 2009.

- [53] J. A. Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010, p. 1248.
- [54] X. E. Castells, tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012, p. 1255.
- [55] V. Oreopoulou and W. Russ, Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry, vol. 2006. New York: Springer, 2006, p. 332.
- [56] E. Ronzano and J. L. Dapena, Tratamiento biológico de las aguas residuales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2002, p. 511.
- [57] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2003, p. 1819.
- [58] R. Crites, G. Tchobanoglous, M. Camargo, L. P. Pardo, and G. Mejía, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGraw-Hill, 2000.
- [59] Ministerio de Agricultura, Decreto 1594. Bogotá: "Usos del agua y residuos líquidos," 1984, p. 55.
- [60] Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas. Lima: OPS/CEPIS, 2005, p. 28.

CAPÍTULO 3

3. ESTUDIO DE CASO: MICROEMPRESA AGROINDUSTRIAL PRODUCTORA DE AGENTES DE CONTROL BIOLÓGICO (BCA's)

3.1. DIAGNÓSTICO

3.1.1. GENERALIDADES

El estudio de caso se desarrolla en una microempresa dedicada a la producción de agentes de control biológico a base de hongos antagonistas y entomopatógenos. Según la clasificación internacional industrial uniforme (CIIU), la actividad está identificada con el código 2012 correspondiente a producción de insecticidas biológicos o bioinsecticidas. Las especies de hongos utilizadas son: *Trichoderma harzanium*, *Beauveria bassiana* y *Paecilomyces lilacinus*. Los productos elaborados corresponden a formulaciones en polvo con alto contenido de esporas (ver Tabla 28).

Tabla 28: Productos elaborados en la empresa

Nombre comercial del producto	Agente biocontrolador
Tropimezcla	<i>T. harzanium</i> , <i>P. lilacinus</i> , <i>B. bassiana</i>
Trichotrópico	<i>T. harzanium</i>
Bovetrópico	<i>B. bassiana</i>
Paecilotropico	<i>P. lilacinus</i>

El proceso de producción utilizado por la empresa se conoce como fermentación bifásica. Comienza con la preparación de una suspensión de esporas. Esta suspensión se agrega a un medio nutritivo líquido y se deja en incubación por periodos de entre 3 y 4 días, donde se controlan temperatura y agitación. Esta etapa también conocida como fermentación líquida, permite un rápido crecimiento del hongo en el que se desarrollan principalmente estructuras miceliales sumergidas, que generalmente tienen forma de pellets [61].

El cultivo en fase líquida se mezcla con un sustrato sólido estéril y se pasa a incubación entre 8 a 12 días. Esta etapa es conocida como fermentación en fase sólida y se utiliza para favorecer la producción de un tipo especial de estructuras denominadas esporas aéreas.

Cuando el hongo ha esporulado profusamente en la superficie del sustrato sólido, el conjunto se somete a un proceso de secado al vacío, de manera que se retire humedad a temperaturas bajas para evitar daños en las esporas. Después del secado el conjunto es molido y mezclado con agentes estabilizantes para aumentar la vida de anaquel del producto y favorecer la germinación de las esporas cuando son aplicadas en campo. Estas esporas formuladas corresponden a células reproductivas del hongo en estado de latencia, lo que les confiere viabilidad por mayores periodos de tiempo y buena resistencia a condiciones adversas de temperatura y humedad [62], características ideales para su uso como agentes de control biológico en polvo [63].

El paso final corresponde al empaqueo. La Figura 4 presenta el diagrama de flujo del proceso productivo.

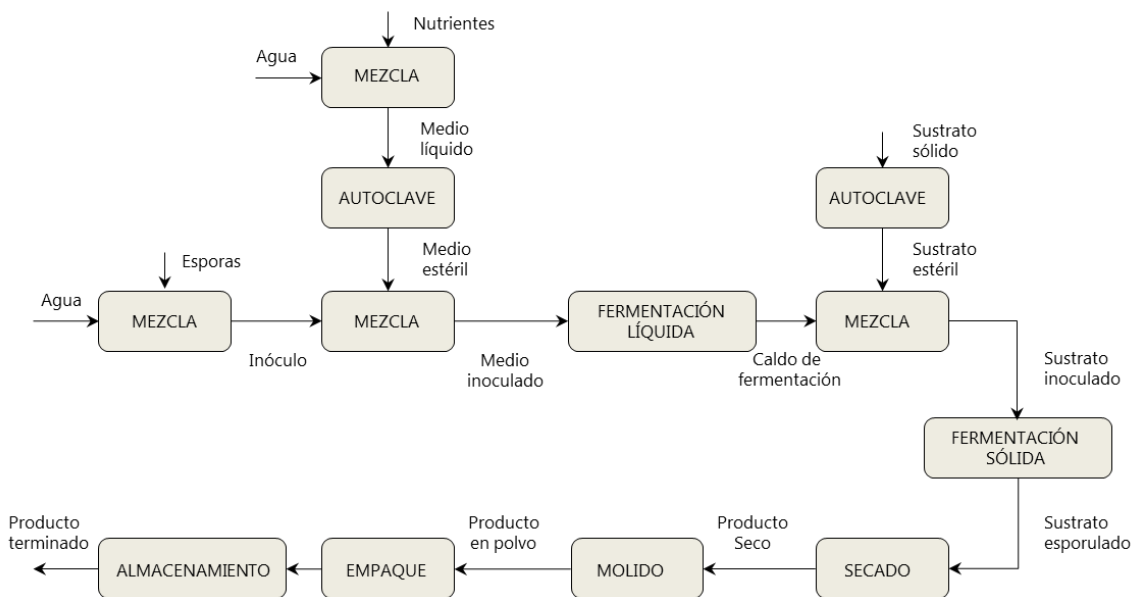


Figura 4: Diagrama de flujo de proceso de producción de agentes de control biológico

Procesos físicos, químicos y biológicos involucrados

En este caso particular se contemplan procesos biológicos y físicos. Los procesos biológicos corresponden a las dos fermentaciones donde se produce biomasa celular y una gran cantidad de estructuras reproductivas. Los procesos físicos son la esterilización por calor húmedo o autoclavado, la mezcla, el secado y el molido. En los procesos físicos solo ocurren cambios de fase y reducción del tamaño de partículas.

Principales equipos utilizados

- Autoclaves: Se utiliza para asegurar la esterilidad del medio de cultivo líquido, el sustrato sólido y algunos utensilios. Utiliza agua para generar el vapor que elimina los microorganismos por destrucción térmica.
- Agitadores orbitales: Mantienen las condiciones de agitación durante la fermentación líquida. Funcionan con motor accionado por electricidad.
- Secador al vacío: Permite la remoción de humedad del sistema hongo - sustrato. El vacío es creado por una bomba que consume agua de enfriamiento.
- Muflas: Se utilizan para la esterilización de material de vidrio a temperaturas de aproximadamente 400 grados. Funcionan con electricidad.

- Molinos: Reducen el tamaño del producto seco, para convertirlo en un polvo de fácil dispersión en agua para la aplicación en campo.

Especificaciones de calidad del producto

Los productos elaborados por la empresa deben cumplir estrictos controles de calidad impuestos por la autoridad sanitaria colombiana (Instituto Colombiano Agropecuario ICA). En este sentido las formulaciones no pueden presentar contaminación con especies de microorganismos diferentes a las especificadas, y para lograrlo, todas las etapas deben protegerse del contacto con agentes contaminantes como bacterias u otras especies de hongos.

Sustancias peligrosas manejadas

Las principales sustancias peligrosas utilizadas en la empresa corresponden a las formas concentradas de desinfectantes que se utilizan para el lavado de material de vidrio y control de contaminación de pisos, paredes y demás superficies. Entre los desinfectantes aplicados se tiene el formaldehído, algunas sales de amonio cuaternario e hipoclorito de sodio.

Usos del agua

- Como fluido de enfriamiento para la bomba de vacío del secador. Actualmente el enfriamiento se hace en circuito abierto.
- Para lavado de superficies, paredes, equipos, y materiales.
- Para generación de vapor en la autoclave.
- Para preparación de medio de cultivo líquido.
- Para duchas, lavamanos, inodoros y cocina.

Distribución de actividades en el tiempo

La empresa funciona en periodos de 8 horas diarias. Algunas actividades se realizan diariamente y otras según la demanda de producto. La Tabla 29 muestra la frecuencia de las actividades que implican uso del agua.

Tabla 29: Frecuencia de algunas actividades de proceso

Actividad	Frecuencia (días/semana)
Inoculación de medio líquido industrial	2-4
Inoculación sustrato sólido	2-4
Secado al vacío	4 -5
Molido	3-4
Empaque	2-4

La mayoría de las actividades requieren de lavado después de procesar el lote del día, o al menos cada que se cambia de producto para evitar la contaminación cruzada.

Distribución de áreas y sistema de recolección de aguas residuales

Actualmente las aguas residuales industriales y las residuales domesticas se mezclan dentro del sistema de recolección. La empresa solo cuenta con un pequeño terreno periférico que puede utilizar para expansiones o eventuales sistemas de tratamiento. La Figura 8 al final del capítulo, esquematiza las diferentes áreas de la empresa con una propuesta para la ubicación de unidades de tratamiento.

Los tejados de la empresa tienen canales para recolección de aguas lluvias que las dirigen hacia los andenes exteriores o hacia el área de lavado. No se hace recolección de este tipo de aguas.

Personal de la empresa

La empresa cuenta con un total de 8 empleados que se distribuyen entre actividades administrativas, comerciales, operativas, de calidad, y de investigación. La Tabla 30 especifica las actividades y la formación académica del personal.

Tabla 30: Personal de la empresa

Área	Descripción personal	Formación
Administrativa y comercial	Secretaria y Gerente comercial	Técnica y profesional
Operativa	Cuatro operarios	Secundaria/técnica
Calidad/Investigación y desarrollo	Jefe de planta	Profesional
Calidad/Investigación y desarrollo	Gerente técnica	Profesional especializado

Excepto por las actividades de molido que solo realizan los operarios hombres, todas las demás actividades se hacen de forma alternada. Cuando se requieren reparaciones eléctricas y mecánicas el servicio lo presta un colaborador externo.

Ubicación

La empresa se encuentra ubicada a 5 minutos de la cabecera municipal del municipio de Chinchiná Caldas y a 25 minutos de la capital departamental a una distancia de 500 metros de la antigua vía Manizales-Chinchiná dentro de los predios del Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFE.

El espacio de la empresa y sus alrededores cercanos corresponden a una pequeña área plana entre una zona montañosa y la rivera del río Chinchiná, que cruza a unos 800 metros.

Clima

La temperatura promedio del año 2011 en el área fue de 21 °C, con extremos anuales que van de los 17 a los 30,5 °C. La precipitación llegó a los 3 469,1 mm, registrándose 250 días con lluvias [64].

Disponibilidad de recursos

Chinchiná es la tercera ciudad en actividad económica del departamento de Caldas, con un sector industrial importante representado por grandes empresas del sector alimenticio como Buencafé Liofilizado, Alpina y Casa Luker [65]. Es una de las principales productoras de café en el país, epicentro de desarrollo del sector cafetero. Por lo anterior y por su cercanía a la capital del departamento de Caldas, la empresa tiene su alcance los recursos técnicos, humanos, de insumos y materiales para una gran variedad de demandas en el campo de manejo de aguas.

Servicios de electricidad y recolección de residuos

La empresa cuenta con servicio electricidad de buena continuidad. Los residuos ordinarios se recogen dos veces por semana. También hay disponibilidad de gestores de residuos especiales y peligrosos que prestan servicios con regularidad en CENICAFE.

Servicio de agua

Se tiene suministro continuo de agua, proveniente del acueducto de CENICAFE quien no cuenta con concesión para uso para el recurso. El agua es tratada pero se han evidenciado problemas de turbidez alta y contaminación microbiológica. La continuidad del servicio es buena según lo manifestado por el personal.

Abastecimiento

El agua de la empresa proviene de una fuente superficial, es captada en los predios de CENICAFE en la parte alta de una ladera montañosa con importante presencia de bosque natural y con un grado de intervención bajo. El flujo a la empresa es por gravedad y llega con presión suficiente para todos los usos requeridos. Semanalmente se traen entre 500 y 600 litros de agua potable del municipio de Manizales o de Chinchiná para la preparación de medios de cultivo.

Calidad para los usos de la empresa

De acuerdo a las actividades y necesidades de la empresa se establecieron dos estándares de calidad para el agua consumida. El primero debe cumplir con los requerimientos para aguas de enfriamiento de tal manera que se protejan los equipos y las superficies de intercambio de calor de corrosión e incrustaciones. El segundo estándar corresponde al de agua potable con énfasis en la calidad microbiológica. El objetivo debe ser cero microorganismos contaminantes en las aguas para preparación de medio líquido, para uso de empleados y para lavado de tal manera que se proteja la salud del personal y se minimice el riesgo de contaminación con microorganismos en todas las etapas del proceso.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA

Para la caracterización respecto al uso de agua potable se seleccionaron los parámetros mínimos recomendados por las guías para el diseño de sistema de tratamiento de filtración en múltiples etapas [60]. Respecto al uso para enfriamiento, los parámetros seleccionados corresponden a los requeridos para evaluar el índice de Langelier [40].

Se monitoreó la turbidez durante periodos de tiempo seco y tiempo lluvioso para encontrar un rango de valores máximo y mínimo. Los valores de los demás parámetros corresponden a una muestra puntual tomada durante tiempo seco en el grifo del área de lavado de la empresa. La toma y transporte de la muestra se hizo siguiendo las recomendaciones de la referencia [66]. Los recipientes fueron suministrados por los laboratorios que realizaron los análisis.

A excepción de la prueba de turbidez, todos los demás ensayos se realizaron en los laboratorios de calidad de agua de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales y de la Universidad Tecnológica de Pereira utilizando las normas APHA-AWWA [67]. Ambos laboratorios se encuentra certificados por el IDEAM. La Tabla 31 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 31: Resultados caracterización de agua cruda

Parámetro	Valor
Turbiedad mínima (periodo seco)	3 NTU [‡]
Turbiedad máxima (periodo lluvioso)	38 NTU [‡]
Coliformes fecales	10 UFC/100ml
Color aparente	5 UND Pt-Co
Temperatura máxima sistema de enfriamiento	27°C
pH	7,93
Solidos disueltos totales	87 mg/L
Alcalinidad	59,52 mg CaCO ₃ /L
Dureza cálcica	14,41 mg CaCO ₃ /L
Dureza total	63,44 mg CaCO ₃ /L

[‡] Unidad nefelométrica de turbidez.

La escasa contaminación microbiológica y el bajo valor de turbidez en periodo seco sugieren que el agua es de calidad aceptable para la aplicación de desinfección como una barrera de tratamiento antes de la potabilización

[59]. Sin embargo, el aumento de la turbidez durante episodios de lluvia hace la desinfección insuficiente para el control del riesgo de contaminación biológica. En este sentido debe proponerse una alternativa de tratamiento que incluya unidades de control de turbidez de tal forma que la desinfección sea segura. No se consideró necesario un estudio exhaustivo de calidad como el sugerido en la resolución 2115 de 2007 por el mínimo grado de intervención de la fuente.

Para determinar la calidad del agua respecto al uso industrial se utilizó el índice de Langelier (LSI por sus siglas en inglés). Un LSI de cero indica aguas completamente estables que no requieren tratamiento, un valor de 3 o más, indica aguas incrustantes y un valor de -3 o menor es indicador de aguas corrosivas (ver ecuaciones 1 y 2).

$$LSI = pH - pH_s \quad \text{Ec. 1}$$

$$pH_s = 9,30 + A + B - (C + D) \quad \text{Ec. 2}$$

Las variables A , B , C y D dependen de la concentración de sólidos disueltos, de la temperatura del sistema de enfriamiento, de la dureza cálcica y de la dureza total respectivamente. Los datos de estas variables se tomaron de tablas en la referencia [40] de acuerdo a los resultados de la caracterización presentada en la Tabla 31. Para el agua cruda de la empresa se tiene:

$$LSI = 7,93 - 9,30 + 0,07 + 1,88 - (0,83 + 1,9)$$

$$LSI = -0,59$$

Este valor indica que el agua está muy cerca de ser estable, lo que sugiere que puede utilizarse sin problemas como agua de enfriamiento.

3.1.3. ÁREA DE PROCESO

Grifería, duchas, sanitarios y equipo de lavado

La empresa opera en una construcción de unos 20 años de antigüedad que no cuenta con tecnologías ahorradoras en llaves duchas o inodoros. El lavado de superficies y equipos se hace con mangueras comunes de jardín.

Medición y mantenimiento

No se tienen medidores de consumo y el mantenimiento es principalmente correctivo.

Sistema de calidad y mejoramiento

La empresa está certificada en calidad por la entidad Bureau Veritas. Se llevan controles estrictos de calidad para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de la autoridad sanitaria que regula la fabricación de productos para control biológico.

Balance de agua

Se instalaron micromedidores durante una semana de producción convencional de 6 días para realizar el monitoreo de los consumos de agua en la empresa. Los datos se tomaron diariamente para las actividades en cocina, lavado, esterilización y secado (agua de enfriamiento). Un medidor adicional se instaló a la entrada de la empresa para determinar el consumo total. El gasto en inodoros se estableció llevando un registro de las descargas durante la semana de monitoreo y el gasto en preparación de medio líquido industrial se tomó de los datos de producción durante el mismo periodo. Para calcular los vertimientos, se utilizaron coeficientes de retorno C_R dependiendo de la actividad [68]. El consumo promedio horario se obtuvo de dividir el consumo

promedio diario durante las 8 horas de la jornada laboral. La Tabla 32 resume los resultados obtenidos incluyendo el coeficiente de desviación estándar de las medidas de los consumos diarios.

Tabla 32: Balance de agua

Actividad	Consumo (L)				C _R	Vertimiento generado (L)	
	Semanal (6 días)	Promedio diario	Cv [‡]	Promedio horario		Promedio horario	Promedio diario
Preparación medio líquido industrial	480	80,0	--	10,0	0	0	0
Lavado	3 800	633,3	0.18	79,2	0,80	63,3	506,6
Cocinas duchas y lavamanos (agua gris)	397	66,2	0.22	8,3	0,9	7,4	59,5
Agua de enfriamiento	13 860	2 310,0	0.17	288,8	1	288,8	2 310,0
Autoclave	1 239	206,5	0.31	25,8	0	0	0
Inodoros	3 000	500	0.25	62,5	0,98	61,3	490

[‡] Coeficiente de variación estándar frente a los consumos promedio diario medido en un período de una semana laboral.

3.1.4. GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Criterios de descargas a cumplir

Los criterios se establecen según el escenario vigente correspondiente al decreto 1594 de 1984, y según el escenario previsto por el decreto 3930 de 2010 (ver Tabla 33).

Tabla 33: Exigencias vertimientos y resultados caracterización del agua residual industrial.

Decreto 1594		Decreto 3930 [‡]		Resultados caracterización	
Parámetro	Valor o remoción	Parámetro	Valores máximos permisibles	Parámetro	Valor obtenido
pH	5-9	pH	6-9	pH	7,08
Temperatura	≤ 40°C	Temperatura	40°C	Temperatura	17°C
DBO5	≥80%	DBO5	200 mg/L	DBO5	2 052 mg/L
SST	≥80%	SST	200 mg/L	SST	4 126 mg/L
Grasas y Aceites	≥80%	DQO	400 mg/L	DQO	3 832 mg/L
Material flotante	Ausente	SSED	2 mL/L	SSED	8 mL/L
		Fosforo Total	5 mg/L	Fosforo Total	5,92 mg/L

[‡] Parámetros basados en el quinto borrador de la resolución que reglamenta el artículo 28 del decreto 3930.

Caracterización de aguas residuales

Las aguas residuales de la empresa pueden agruparse como aguas de enfriamiento, aguas de lavado, aguas grises (cocina, ducha y lavamos), y aguas de inodoros. El único cambio del agua de enfriamiento es en su temperatura dándose un incremento de hasta 10 grados. Las aguas de lavado contienen detergentes, desinfectantes, residuos de cultivos y remanentes de producto provenientes de equipos, bandejas de secado de molinos, material de vidrio y superficies. En este caso se realizaron dos campañas en las que se caracterizaron las aguas de lavado en los principales parámetros exigidos para empresas identificadas con el código CIU 2012. Los valores se tomaron del borrador número 5 del proyecto de resolución que reglamenta al decreto 3930 de 2010. La última columna de la Tabla 33 muestra los resultados promedio para las dos campañas. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de calidad del agua de Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales y están basados en las normas APHA-AWWA-WEF/edición 21/2005 [67]. El muestreo, conservación y transporte de las aguas de lavado se realizó siguiendo las recomendaciones de la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas [69].

Oportunidades de aprovechamiento de vertimientos en riego o uso pecuario

En las cercanías de la empresa no se desarrollan actividades que permitan este tipo de aprovechamiento.

Identificación de corrientes de agua residual que pueden disminuir el consumo de materias primas

Las aguas del lavado de los procesos de molido y secado acarrean fracciones del mismo sustrato que se utiliza para la fermentación en estado sólido. En este sentido dicha corriente tiene una característica que podría permitirle sustituir materias primas y hacer viable su valorización dentro del proceso.

Cuerpo de agua donde se realiza el vertimiento

La empresa no cuenta en la actualidad con un sistema de tratamiento ni con permiso de vertimientos. Las descargas de aguas residuales llegan directamente al río Chinchiná. En las cercanías del punto de descarga se realiza extracción de material de arrastre del río y algunos kilómetros atrás se permite el uso industrial para generación eléctrica. En este sentido la fuente superficial puede recibir vertimientos siempre y cuando se cumplan los parámetros para las descargas.

3.2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO

3.2.1. RESTRICCIONES

Restricciones legales

El suministro de agua se realiza por intermedio de terceros, pero estos no cuentan con una concesión de agua.

3.2.2. SELECCIÓN DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO

- La única opción mejor que la actual sería obtener agua potable, pero hay dificultades por la distancia respecto al punto de suministro más cercano. Por lo anterior la fuente actual sigue siendo válida para la empresa. En este sentido la empresa se encuentra en el escenario 5 de la Tabla 7, "Empresa en funcionamiento con prestador de servicio sin potabilización".

3.2.3. FORMULACIÓN/SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE CAPTACIÓN, CONDUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA CRUDA

No aplica para la empresa puesto que la captación y la conducción es responsabilidad de terceros. Como el suministro de agua no presenta problemas de discontinuidad, no es imperativa la construcción de estructuras para almacenamiento de agua cruda.

3.2.4. EVALUACIÓN DEL RIESGO POR VARIACIONES DE CALIDAD

Ya que la intervención de la fuente es baja y debido a que se tiene información concreta de la variación de su calidad, se omite el proceso de evaluación sugerido en el capítulo 2.

3.3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA ADECUACIÓN DE AGUA CRUDA

3.3.1. RESTRICCIONES

Restricciones normativas

No hay una norma que de manera explícita indique la calidad del agua que se debe utilizar para la fabricación de biocontroladores. Sin embargo, para cumplir con los estándares de calidad exigidos por la autoridad sanitaria en el producto terminado, se requiere agua libre de contaminación microbiológica con características similares a las del agua potable.

Restricciones de variación en la contaminación

Debido a las variaciones en la calidad de la fuente durante episodios de lluvia, la desinfección debe complementarse con unidades de tratamiento previo que permitan la reducción de la turbidez en períodos de lluvia.

Restricciones de calidad para agua de enfriamiento

De acuerdo al valor obtenido para el índice de Langelier, el agua cruda puede utilizarse sin tratamiento en sistemas abiertos [40].

Restricciones técnicas

Las diferencias de altura en el predio de la empresa imposibilita el uso de sistemas de filtración lenta que requieren flujo abierto por gravedad [36]. El flujo cerrado por gravedad no es limitante ya que el sistema de conducción cuenta con buena presión.

3.3.2. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA CRUDA

Para niveles de turbidez de hasta 40 NTU basta con una unidad de filtración (F) para hacer apto el efluente para desinfección. Para valores más altos de turbidez las alternativas pueden incluir unidades de coagulación-floculación (CF), sedimentadores (S) y filtros rápidos (FR). Los esquemas que se evalúan sin incluir el paso de desinfección son los siguientes:

- Filtración (F).
- Coagulación + floculación + sedimentación (CF + S).
- Coagulación + floculación + sedimentación + filtración (CF + S +FR).

3.3.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Criterio: Confiabilidad del sistema de tratamiento

Para la empresa es prioritario contar con agua sin contaminación microbiana. El factor crítico es el de amortiguación de cambios en la calidad de la fuente. Los factores de independencia del uso de energía eléctrica y disponibilidad de recursos para reparaciones no tienen gran impacto en la valoración pues el servicio eléctrico es continuo y la empresa está ubicada en una zona con buena disponibilidad de recursos. La Tabla 34 muestra la matriz de evaluación de las posibles alternativas que se podrían implementar para el tratamiento de agua cruda de la empresa.

Tabla 34: Matriz de evaluación de alternativas para tratamiento de agua cruda

Factor		Alternativa 1: (F)		Alternativa 2 (CF+S)		Alternativa 3: (CF+S+FR)	
Descripción	Coficiente	Puntaje	Ponderación	Puntaje	Ponderación	Puntaje	Ponderación
Amortiguación de cambios en la calidad de la fuente	0,4	2	0,8	4	1,6	5	2
Facilidad operaciones de mantenimiento	0,3	5	1,5	4	1,2	3	0,9
Disponibilidad de recursos para reparaciones	0,2	5	1	4	0,8	4	0,8
Independencia del uso de energía eléctrica	0,1	5	0,5	4	0,4	4	0,4
Sumatoria	1		3,8		4		4,1

Selección de alternativas

No hay diferencias altas entre las alternativas bajo el criterio evaluado. De acuerdo a la prioridad de la empresa, se selecciona la alternativa de coagulación-floculación con unidad de sedimentación y posterior filtración rápida, ya que obtuvo la mayor calificación en confiabilidad dentro del contexto del caso de estudio.

En cuanto a la desinfección no se hace la evaluación y se opta directamente por luz ultravioleta dado que la presencia de cloro residual derivado de las alternativas convencionales se consideró desfavorable para la fermentación líquida.

3.4. ALTERNATIVAS PARA EL ÁREA DE PROCESO (PARTE A)

Las siguientes son las algunas alternativas de manejo integral que se proponen para el área de proceso, y se basan en los resultados del diagnóstico.

3.4.1. TECNOLOGÍAS PARA EL AHORRO EN EL CONSUMO DE AGUA

- Sustitución de llaves de cocina, área húmeda y lavamanos por grifería ahorradora.
- Adecuar válvulas ahorradoras a los baños.
- Adquirir hidrolavadora y suspender el lavado con la manquera de jardinería.
- Reemplazar la bomba del sistema de secado al vacío por una con menor consumo de agua.

3.4.2. BUENAS PRÁCTICAS DE MANEJO DE AGUA

- Instalación de medidores de flujo de agua para realizar el seguimiento de los consumos y fijar objetivos de ahorro.
- Separación de agua residual industrial de agua residual doméstica.
- Implementación de un plan de manejo integral de agua que pueda integrarse al programa de gestión de calidad de la empresa.
- Capacitaciones periódicas en buenas prácticas para el manejo del agua.

3.5. ALTERNATIVAS PARA EL ÁREA DE PROCESO (PARTE B): SELECCIÓN DE UNA RED INTEGRADA DE AGUA

3.5.1. CONSIDERACIONES INICIALES

La formulación de las alternativas de integración de manejo de agua en esta área se hacen teniendo en cuenta que el agua de enfriamiento no pasa por el proceso de potabilización pues se desperdiciarían recursos llevando el agua cruda a una calidad por encima de las necesidades requeridas para enfriamiento.

Adaptación de la metodología NNA (Anexo 1)

La metodología para el establecimiento de los objetivos de calidad “material recovery rinch diagram” (MRPD), y para la generación de la red de consumo mínimo “nearest neighbors algorithm” (NNA), implican que solo existe una fuente de agua que es externa al proceso. Para el caso de estudio, el tratamiento se haría como parte del proceso de la empresa y se contaría con dos fuentes: La primera es el agua cruda para el sistema de enfriamiento y demás usos que no requieren agua inocua, y la segunda fuente es el efluente del sistema de tratamiento para los usos más restrictivos.

Para adaptarse a este caso se propone utilizar el algoritmo NNA con la las siguientes modificaciones:

- I. Incluir el sistema de tratamiento como demanda y como una fuente de agua. El flujo de agua requerido y entregado por la unidad de tratamiento se iguala a la sumatoria de los flujos de todas las demandas que requieren agua de mejor calidad que la ofrecida por la fuente de agua cruda.

Para este caso según el balance de agua (Tabla 32) y los requerimientos del proceso:

$$Q_{TRATAMIENTO} = Q_{MLI} + Q_{LAVADO} + (Q_{COCINA} + Q_{DUCHAS} + Q_{LAVAMANOS}) \quad \text{Ec. 3}$$

Con los datos de la Tabla 32 entonces se obtiene:

$$Q_{TRATAMIENTO} = 97,4L/h$$

- II. Empezar emparejando el flujo de la fuente de tratamiento con los flujos de las demandas que requieren el agua tratada. El resto del procedimiento se hace según el algoritmo NNA.

Los cambios sugeridos permiten la recirculación de aguas de proceso en el mismo sistema de tratamiento interno con lo que podrían lograrse ahorros adicionales a los que se obtendrían si se considerara que la fuente de agua es externa.

3.5.2. SELECCIÓN DE CONTAMINANTE CLAVE

Para la aplicación de la metodología se selecciona como contaminante clave la turbidez porque es representativo de los riesgos de contaminación microbiológica, de los riesgos de formación de depósitos en tuberías y por ser rápida, fácil y económica de medir.

Ya que la metodología implica la solución de balances de materia, en este trabajo se propone realizar los cálculos con un contaminante hipotético Y en unidades de mg/L, que es función de la turbidez y que está dado por la expresión:

$$Y = \alpha \times \text{Turbidez} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde α es un coeficiente con unidades de mg/L/NTU. Esta interpretación es válida pues la turbidez es causada por partículas en el agua susceptibles de diluirse o concentrarse. Inclusive varios autores han propuesto correlaciones de tipo lineal entre los sólidos suspendidos y la turbidez [70].

El valor del coeficiente α , puede asignarse de manera arbitraria, debido a que los balances de materia son ecuaciones lineales homogéneas y dicho parámetro se cancela al quedar multiplicando todos los términos del balance como se verá más adelante. Para el caso especial en que α es 1mg/L/NTU, la concentración del contaminante Y en mg/L toma los mismos valores numéricos de la turbidez.

3.5.3. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES, DEMANDAS Y RESTRICCIONES

Para esta sección las restricciones tienen que ver con las concentraciones máximas y mínimas que se admiten al sistema de tratamiento. Las Tablas 35 y 36 presentan la información detallada.

Concentraciones máximas permisibles de contaminante clave en las demandas

Para las actividades que requieren agua inocua se debe garantizar una turbidez de cero. Para el ingreso a la planta de tratamiento de agua cruda se asignó un valor de 50 NTU, según lo recomendado en sistemas con unidades de coagulación/floculación [71]. En el caso del sistema de enfriamiento el valor se estableció en 10 NTU según las guías para el tratamiento de aguas industriales [40].

Concentraciones de contaminante clave en las fuentes

Para la salida del sistema de tratamiento se asignó un valor de cero, según los requerimientos del proceso. Para la salida del sistema de enfriamiento se asumió que no ocurren cambios de turbidez. Para aguas grises e inodoros, los datos corresponden a valores típicos reportados en la literatura [53], [72], [73]. Para el agua cruda se toma el valor de turbidez en condiciones de tiempo seco (Tabla 31).

3.5.4. TABLAS DE FUENTES Y DEMANDAS

Las Tablas 35 y 36 resumen la información para la construcción de la red de manejo de agua, incluyendo el sistema de tratamiento de agua cruda. Los flujos se tomaron de los datos del balance de agua y del caudal que debe adecuarse en el sistema de tratamiento. Para facilitar la comprensión y lectura del diagrama que presenta la red de manejo de aguas, se asignó un código a todos los valores de la turbiedad.

Tabla 35: Demandas de agua dentro del proceso

Demandas	Flujo (L/h)	Turbiedad máxima permisible
D ₁ - Flujo de agua para preparación de medio líquido industrial	10,0	CD ₁ =0
D ₂ - Flujo de agua para lavado	79,2	CD ₂ =0
D ₃ - Flujo de agua para cocina, duchas y lavamanos	8,3	CD ₃ =0
D ₄ - Flujo de agua para autoclave	25,8	CD ₄ =10
D ₅ - Flujo de agua para enfriamiento	288,8	CD ₅ =10
D ₆ - Flujo de agua para tratamiento	97,4	CD ₆ =50
D ₇ - Flujo de agua para inodoros	62,5	CD ₇ =90

Tabla 36: Fuentes de agua dentro del proceso

Fuentes	Flujo L/h	Turbiedad
F ₀ – Flujo de agua cruda	--	CF ₀ =3
F ₁ - Flujo de salida sistema del tratamiento	97,4	CF ₁ =0
F ₂ – Flujo de salida del sistema de enfriamiento	288,8	CF ₂ =10
F ₃ - Flujo de aguas grises (aguas residuales de lavado cocina duchas y lavamanos)	7,4	CF ₃ =90
F ₄ - Flujo de aguas de lavado	63,3	CF ₄ =250
F ₅ - Flujo de aguas de inodoros	61.3	CF ₅ =250

3.5.5. RED DE MANEJO DE AGUA DE CONSUMO MÍNIMO:

Alternativa 1

La Figura 5 muestra la red de manejo de agua de consumo mínimo obtenida con los datos de las Tablas 35 y 36, y aplicando el algoritmo NNA.

Para el esquema de consumo mínimo se requieren 139,5 L/h de agua fresca y se generan 85,9 L/h de vertimientos. El diagrama muestra que el consumo mínimo se logra reciclando toda el agua de enfriamiento (F₂) y reutilizando las aguas grises (F₃) y parte del agua residual de lavado, para alimentar el sistema de potabilización (D₆). Adicionalmente se debe reutilizar una fracción del agua residual de lavado como alimentación a los tanques de inodoros (D₇). Lo anterior implica un sistema de enfriamiento en ciclo cerrado con bomba y torre de enfriamiento, un pozo de bombeo con tubería para recuperación de aguas grises y de lavado, una estructura de homogeneización para mezclar el agua cruda, las aguas grises y las aguas de lavado a reutilizar en la planta de potabilización, y un esquema de recirculación de agua de lavado para el llenado de tanques de inodoros.

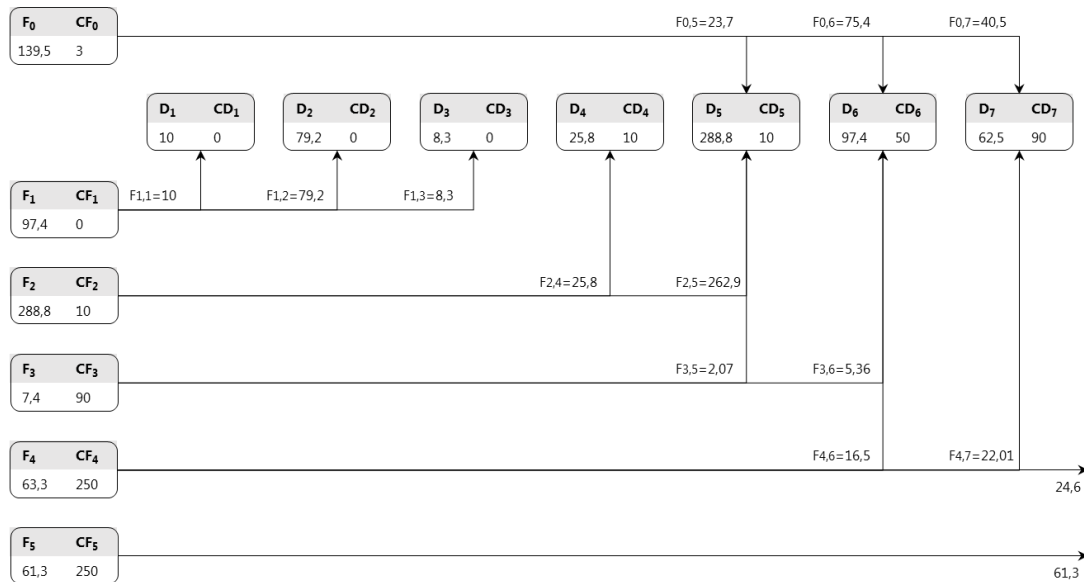


Figura 5: Red integrada de consumo mínimo de agua

Los primeros pasos del algoritmo con el que se obtuvo la red fueron los siguientes:

- I. Satisfacer las demandas que requieren agua tratada: El flujo F_1 se repartió en tres partes $F_{1,1}$, $F_{1,2}$ y $F_{1,3}$ para satisfacer las demandas D_1 , D_2 , y D_3 respectivamente.
- II. Satisfacer la demanda D_4 : Como existe una fuente de igual calidad, se satisface directamente con ella. En este caso se utilizan 25,8 L/h de la fuente F_2 y sobran 262,9 L/h para las siguientes demandas.
- III. Satisfacer la demanda D_5 : Primero se utiliza lo que sobró de la fuente de igual calidad F_2 . Como los 262,9 L/s que quedaron no alcanzan, se debe completar con una mezcla de agua de las fuentes de calidad por encima y por debajo que estén más cercanas, en este caso las fuentes 0 y 3

Para obtener los flujos de las fuentes 0 y 3 ($F_{0,5}$ y $F_{3,5}$) que requiere la demanda D_5 se resolvieron las siguientes ecuaciones de balance.

Balance de flujos (asumiendo volúmenes aditivos): el flujo que sobró de la fuente 2 y los flujos desde las fuentes 0 y 3 deben igualar el flujo requerido por la demanda 5:

$$269,9L/s + F_{0,5} + F_{3,5} = D_5 \quad \text{Ec. 5}$$

Balance de materia por componente: la cantidad de contaminante de los flujos que salen de las fuentes 0, 2 y 3 debe ser igual a la cantidad de contaminante de la demanda 5. En este caso el balance corresponde al del componente hipotético definido previamente en función de la turbidez.

$$269,9/s \times (\alpha \times CF_2) + F_{0,5} \times (\alpha \times CF_0) + F_{3,5} \times (\alpha \times CF_3) = D_5 \times (\alpha \times CD_5) \quad \text{Ec. 6}$$

En esta última ecuación es claro que el parámetro α se cancela y por ello los resultados son independientes del valor que se le asigne. Por esta razón los valores de turbidez pueden tratarse como de manera análoga a una concentración de contaminante.

Con los datos las Tablas 35 y 36:

$$269,9L/h + F_{0,5} + F_{3,5} = 288,8L/h$$

$$269,9L/h \times 10mg/L + F_{0,5} \times 3mg/L + F_{3,5} \times 10mg/L = 258,8L/h \times 10mg/L$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$F_{3,5} = 2,07L/h; \quad F_{0,5} = 23,7L/h$$

De manera similar se obtienen los valores de los flujos $F_{0,6}$, $F_{3,6}$, $F_{4,6}$, $F_{0,7}$ y $F_{4,7}$ que se presentan en la Figura 5.

3.5.6. REDES ALTERNATIVAS DE MANEJO DE AGUA:

Como puede advertirse el anterior esquema es bastante complejo e implica que el sistema de potabilización opere con un afluente de calidad pobre, lo que va en contravía del propósito inicial de minimizar los riesgos de contaminación microbiológica en el agua de proceso. En este sentido se proponen alternativas derivadas del esquema de la Figura 5, que no implican la mezcla del agua cruda con aguas residuales para la alimentación del sistema de tratamiento. Las Figuras 6 y 7 muestran las redes de manejo de agua para las diferentes alternativas.

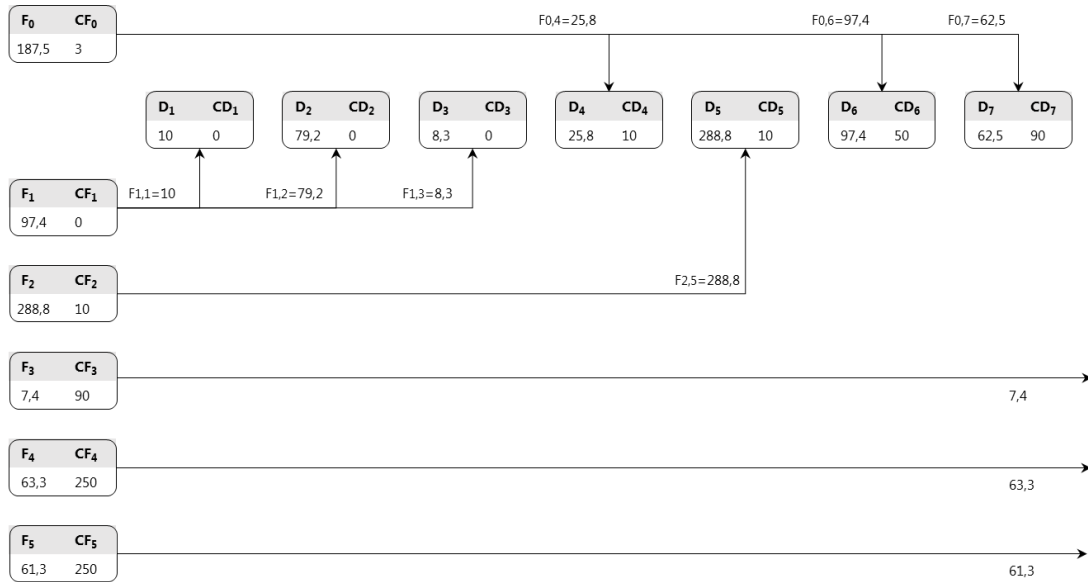


Figura 6: Reciclaje de agua de enfriamiento – Alternativa 2

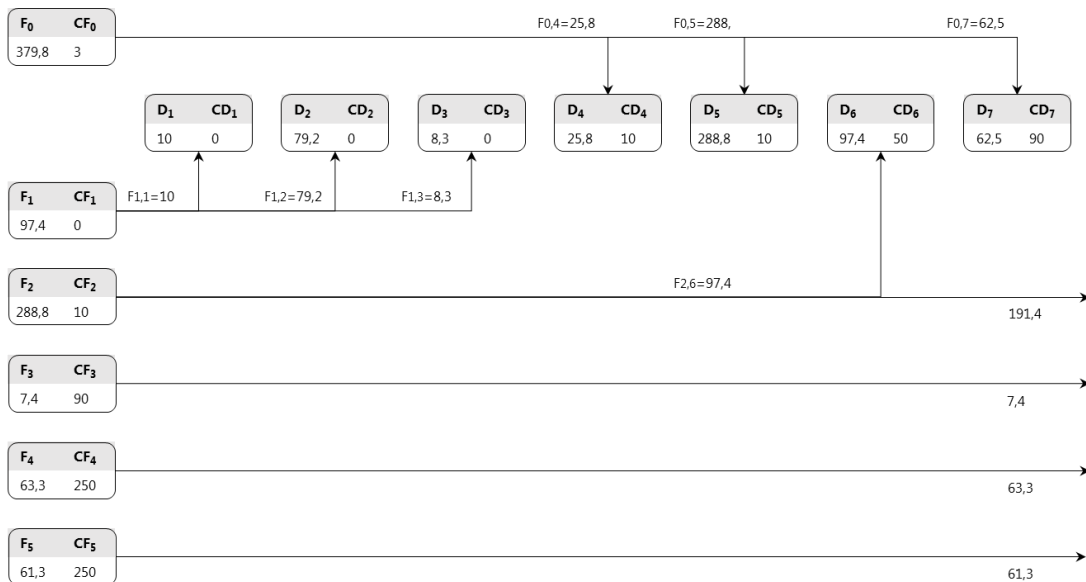


Figura 7: Reutilización del agua de enfriamiento en la planta de tratamiento - Alternativa 3

Alternativa 2

En la primera red simplemente se elimina la reutilización de aguas grises como alimentación al sistema de tratamiento. El flujo se compensa con agua cruda fresca. Esta red implica nuevamente todo lo necesario para un sistema de enfriamiento en ciclo cerrado: bombeo y torre de enfriamiento. En este caso el consumo de agua aumenta a 187,5 L/h, y los vertimientos a 132 L/h.

Alternativa 3

La segunda red consume agua fresca para el sistema de enfriamiento, y su efluente se utiliza como alimentación del sistema de potabilización. Este esquema requiere bombeo y un tanque para almacenamiento de agua antes en la entrada del sistema de potabilización, ya que no todos los días se realizan operaciones de secado y debido a que el caudal de salida del sistema de enfriamiento puede superar eventualmente la demanda de agua potable. El consumo de agua fresca para la alternativa es de 379,8 L/s y la generación de aguas residuales es de 323.4 L/s.

3.5.7. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Criterio de evaluación: Complejidad en la operación de las alternativas

La Tabla 37 muestra los factores bajo los cuales se realiza la evaluación. Para la ponderación de factores, se consideró de mayor importancia el relacionado con los requerimientos de personal, pues las nuevas actividades podrían recargar a los operarios de la empresa causando dificultades operativas. El siguiente factor en importancia fue el de necesidades de mantenimiento, ya que a pesar de que puede ser eventual, este puede implicar paradas en la producción, lo que se traduce en dificultades operativas. El factor relacionado con la energía se consideró de bajo impacto ya que la continuidad es buena.

Tabla 37: Matriz de evaluación de alternativas para redes integradas de manejo de agua de proceso

Factor		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Descripción	Coefficiente	Puntaje	Ponderación	Puntaje	Ponderación	Puntaje	Ponderación
Requerimientos de personal	0,4	5	2	3	1,2	1	0,4
Requerimientos de mantenimiento	0,3	5	1,5	3	0,9	1	0,3
Requerimientos de insumos	0,2	5	1	0	0	0	0
Requerimientos de continuidad en el servicio eléctrico	0,1	5	0,5	4	0,4	3	0,3
Sumatoria	1		5		2,5		1

3.5.8. SELECCIÓN

Nuevamente es claro el compromiso entre la complejidad en la operación de la alternativa y el consumo de agua fresca y la generación de vertimientos. Para las particularidades de la empresa se considera que la alternativa 2 brinda el mejor balance entre consumo y complejidad en la operación. La alternativa 1 presenta una complejidad muy alta, y la empresa cuenta con recursos suficientes para operar una alternativa más compleja que la 3.

3.6. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA GESTIÓN DE VERTIMIENTOS

3.6.1. RESTRICCIONES

Restricciones normativas

La Tabla 33 mostró las máximas concentraciones permisibles y/o los valores de remoción exigidos en el sistema de tratamiento, aunque se requiere el trámite de permiso de vertimientos.

Restricciones técnicas

La empresa maneja regularmente una serie de sustancias químicas para desinfección con el fin de controlar la contaminación de los cultivos. Periódicamente o ante episodios de contaminación microbiológica, se realizan campañas de desinfección por áreas en las que se utilizan grandes cantidades de desinfectante. Estas sustancias son posteriormente acarreadas durante el lavado de las áreas, generando vertimientos momentáneos con altas concentraciones de desinfectantes. Debido a que la mayoría de los sistemas de tratamiento biológico son sensibles a las cargas choque con altas concentraciones de algunas de las sustancias desinfectantes utilizadas en la empresa, se considera inapropiado su uso para este caso.

Restricciones externas

No existen en los alrededores de la empresa áreas de cultivo permanentes o actividades ganaderas donde puedan aprovecharse los vertimientos para riego o uso pecuario.

3.6.2. ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE VERTIMIENTOS

Valorización de aguas residuales

Una fracción de las aguas residuales de lavado tiene alto potencial de ser valorizada y sustituir materias primas. El capítulo 4 presenta un estudio preliminar del aprovechamiento de esta corriente de agua residual industrial, que parte de este sencillo hallazgo en el proceso de diagnóstico.

Alternativas para el tratamiento de aguas residuales

Debido a las limitaciones para la utilización de mecanismos de tratamiento biológico se proponen dos alternativas que involucran tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales industriales mediante unidades de coagulación - floculación.

Alternativa 1

Tratamiento de aguas residuales domésticas en sistema séptico convencional y tratamiento de aguas residuales de lavado mediante esquema fisicoquímico integrado por sedimentador primario (SP) y sistema de coagulación - floculación con sedimentación secundaria (CF-SS).

Alternativa 2

Tratamiento conjunto de aguas residuales domésticas e industriales en el esquema fisicoquímico mencionado.

Eficiencias de las alternativas propuestas

La eficiencia del sistema séptico para el tratamiento de aguas residuales domésticas ha sido comprobada en múltiples casos y hace parte de las recomendaciones de tratamiento adoptadas por las autoridades ambientales en Colombia [74].

Las eficiencias típicas para las tecnologías incluidas en el sistema de tratamiento fisicoquímico se muestran en la Tabla 38 [71], [75].

Tabla 38: Eficiencias de remoción típicas en unidades de tratamiento de aguas residuales

Sistema	Eficiencia de Remoción DBO5[‡]	Eficiencia de Remoción DQO[‡] (%)	Eficiencia de Remoción SST[‡] (%)
Sedimentación primaria (SP)	40	40	60
Coagulación – floculación con sedimentación secundaria (CF_SS)	85	85	90

[‡] DBO5: Demanda bioquímica de oxígeno; DQO: Demanda química de oxígeno; SST: Sólidos suspendidos totales

Teniendo en cuenta los datos de eficiencia se obtuvieron las cargas contaminantes intermedias, la remoción total del sistema, la eficiencia global y las concentraciones de salida de DBO5, DQO y SST. Los resultados se resumen más abajo en la Tabla 39. Los siguientes cálculos muestran el procedimiento para el caso de la DBO5.

Carga de DBO5 a la entrada del sedimentador primario SP

Corresponde a los kilogramos de DBO5 que se acarrean diariamente en el agua de lavado. Se calcula con concentración de DBO5 obtenida en la caracterización del agua residual (ver Tabla 33) y con el volumen promedio diario de agua residual de lavado (VARDL) tomado del balance de agua para un día convencional de 8 horas de operación (ver Tabla 32).

$$Carga\ entrada\ SP = DBO5(mg/L) \times VARDL(L/dia) \times (1kg/1 \times 10^{-6}mg)$$

$$Carga\ entrada\ SP = 2\ 052\ mg/L \times 506\ L/dia \times (1kg/1 \times 10^{-6}mg)$$

$$Carga\ entrada\ SP = 2\ 052\ mg/L \times 506\ L/dia$$

$$Carga\ entrada\ SP = 1,04\ kg/dia$$

Carga de DBO a la salida del sedimentador primario (SP)

Se obtiene con la carga de DBO5 a la entrada y con la eficiencia del sedimentador primario (SP) para remover DBO5 (ver Tabla 38).

$$Carga\ salida\ SP = Carga\ de\ entrada\ SP \times \left(1 - \frac{\%Eficiencia\ remocion\ SP}{100\%}\right)$$

$$Carga\ salida\ SP = 1,04\ kg/dia \times \left(1 - \frac{40\%}{100}\right)$$

$$Carga\ salida\ SP = 0,62\ kg/dia$$

Carga de DBO5 a la salida del sistema coagulación-floculación con sedimentador secundario (CF_SS)

Se obtiene con la carga de DBO5 a la salida del sedimentador primario (SP) y con la eficiencia del sistema CF_SS para remover DBO5 (ver Tabla 38).

$$Carga\ salida\ CF_SS = Carga\ de\ salida\ SP \times \left(1 - \frac{\%Eficiencia\ remocion\ SS}{100\%}\right)$$

$$Carga\ salida\ CF_SS = 0,62\ kg/dia \times \left(1 - \frac{85\%}{100\%}\right)$$

$$Carga\ salida\ CF_SS = 0,093\ kg/dia$$

Remoción global de DBO5 en el sistema de tratamiento

Se calcula como la diferencia entre la carga de DBO5 a la entrada del sedimentador primario (SP), y la carga de DBO5 la salida del sistema CF_SS.

$$Remoción\ global = Carga\ entrada\ SP - Carga\ salida\ CF_SS$$

$$Remoción\ global = 1,04\ kg/dia - 0,093\ kg/dia$$

$$Remoción\ global = 0,947\ kg/dia$$

Eficiencia global del sistema de tratamiento en la remoción de DBO5

Se obtiene a través del cociente entre la remoción global de DBO5 y la carga de DBO5 a la entrada del sedimentador primario (SP).

$$\%Eficiencia\ global = \frac{Remoción\ global}{Carga\ de\ entrada\ SP}$$

$$\%Eficiencia\ global = \frac{0,947\ kg/día}{1,04\ kg/día} \times 100$$

$$Eficiencia\ global = 0,91\%$$

Concentración promedio de DBO5 a la salida del sistema de tratamiento

Se calcula con la carga de DBO5 a la salida del sistema CF_SS y con el volumen diario del agua residual de lavado (ARDL).

$$Concentración\ Salida = \frac{Carga\ de\ salida\ CF_SS}{VARDL} \times (1 \times 10^6 mg/1kg)$$

$$Concentración\ Salida = \frac{0,093\ kg/día}{506\ L/día} \times (1 \times 10^6 mg/1kg)$$

$$Concentración\ Salida = 183,8\ mg/L$$

Tabla 39: Estimación de eficiencias, remociones y concentración de contaminantes en el efluente, con las alternativas propuestas

Parámetro	Carga SP		Carga CF_SS		Remoción global	Eficiencia global	Concentración salida
	Entr. kg/día	Sal. kg/día	Entr. kg/día	Sal. kg/día	Kg/día	%	mg/L
DBO5	1,04	0,62	0,62	0,09	0,94	91	183,8
DQO	1,94	1,16	1,16	0,17	1,76	91	344,88
SST	2,09	0,84	0,84	0,08	2,00	96	165,04

La eficiencia global calculada en el sistema de tratamiento es superior a la exigida por el decreto 1594 de 1984, y las concentraciones de salida en la DBO5, la DQO y los SST son inferiores a los límites permisibles establecidos parcialmente en el decreto 3930 de 2010 (ver Tabla 33).

3.6.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Criterio de evaluación: requerimientos en gastos de operación

Para este caso la evaluación se realiza con base en los requerimientos en gastos de operación de ambas alternativas. No se considera la evaluación respecto a los costos de inversión dado que el gasto adicional en el sistema séptico en la primera alternativa, puede equipararse al costo de diseñar un sistema de mayor capacidad para la segunda alternativa.

La Tabla 40 muestra los factores asociados que son relevantes para las alternativas formuladas. El factor de mayor ponderación fue el de requerimientos de personal por las horas extra que pueda implicar el manejo de lodos de cada alternativa.

Tabla 40: Matriz de evaluación de alternativas para la gestión de vertimientos

Factor		Alternativa 1		Alternativa 2	
Descripción	Coficiente	Puntaje	Ponderación	Puntaje	Ponderación
Requerimientos de personal	0,4	3	1,2	4	1,6
Requerimientos en insumos	0,3	3	0,9	4	1,2
Requerimientos en disposición de residuos	0,3	4	1,2	4	1,2
Sumatoria	1		3,3		4

3.6.4. SELECCIÓN

Para este caso se escoge la alternativa 1 por sus menores requerimientos en costos. En ésta se separan las aguas residuales industriales y domésticas, se consumen menos insumos químicos porque solo se agregan para las aguas de lavado y el manejo de lodos implica menos horas de trabajo, al retenerse buena parte de ellos en el sistema séptico, de donde solo se retiran una o dos veces por año. La Figura 8 presenta un esquema de la empresa con la ubicación tentativa de los sistemas de manejo de aguas.

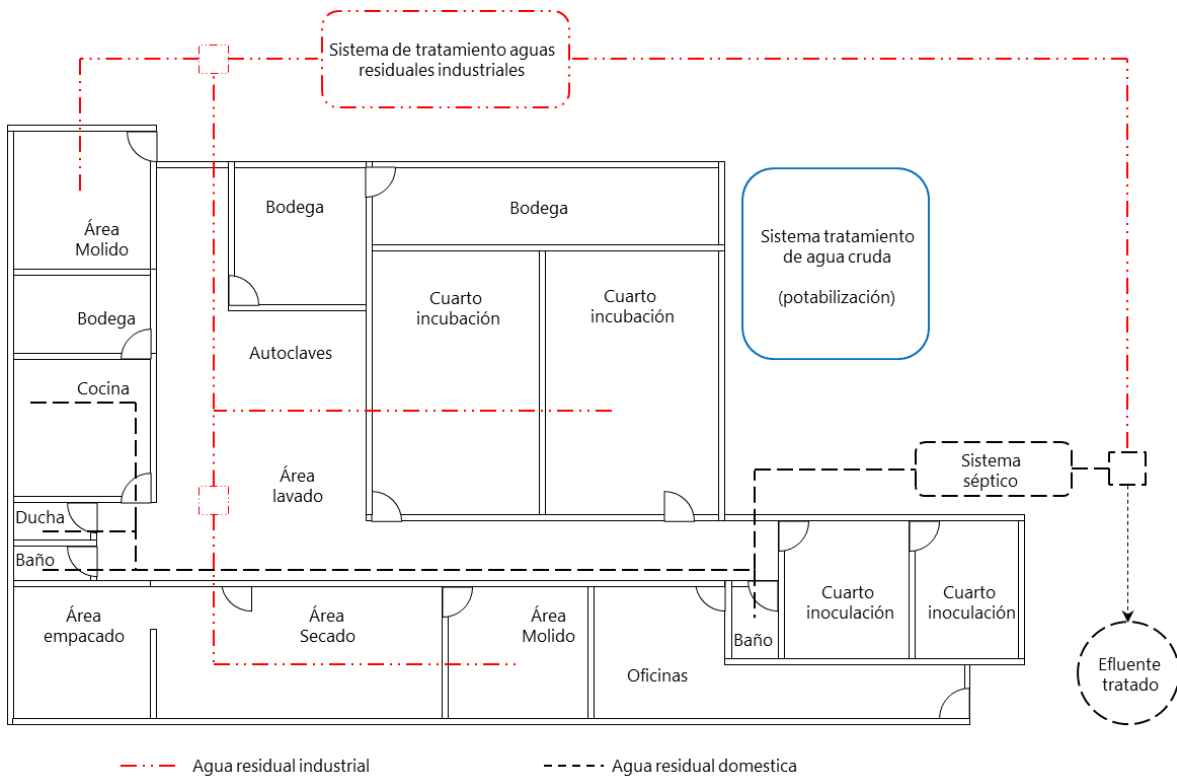


Figura 8: Distribución sugerida para los sistemas de tratamiento de aguas en la empresa del caso de estudio.

3.7. RESUMEN DE LA PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL DE AGUAS EN LA EMPRESA DEL CASO DE ESTUDIO

3.7.1. ABASTECIMIENTO DE AGUA

- Solicitar al intermediario prestador del servicio de abastecimiento de agua, el trámite del permiso de concesión de aguas para asegurar el suministro del recurso de la empresa.

3.7.2. TRATAMIENTO DE AGUAS CRUDAS

- Se propone un esquema de tratamiento fisicoquímico que consta de unidad de coagulación – floculación, unidad de sedimentación, filtro rápido y desinfección con luz ultravioleta. El sistema debe tratar un caudal suficiente para la preparación del medio líquido industrial, el lavado, y los usos domésticos.
- Para el enfriamiento puede utilizarse agua cruda ya que presenta una estabilidad aceptable.

3.7.3. MANEJO DE AGUAS DE PROCESO

Para la gestión de las aguas del proceso se hacen las siguientes recomendaciones:

- Sustituir las llaves de cocina, área húmeda y lavamanos por grifería ahorradora.
- Adecuar válvulas ahorradoras en los tanques de los baños.
- Adquirir hidrolavadora y suspender el lavado con la manquera de jardinería.
- Reemplazar la bomba del sistema de secado por una más eficiente para disminuir el consumo de agua de enfriamiento.
- Instalación de medidores de flujo de agua para realizar el seguimiento de los consumos y fijar objetivos de ahorro.
- Implementación de un plan de manejo integral de agua que pueda integrarse al programa de gestión de calidad de la empresa.
- Capacitaciones periódicas en buenas prácticas para el manejo del agua.
- Separar las redes de recolección de agua residual industrial de agua residual doméstica.
- Para la integración de las aguas de proceso se recomienda reciclar el agua de enfriamiento de la bomba, instalando torre de enfriamiento y sistema de bombeo.

3.7.4. GESTION DE VERTIMIENTOS

- Tramitar permiso de vertimientos.
- Realizar un estudio para el aprovechamiento de las aguas residuales de lavado en las áreas de molido y secado.
- Implementar un sistema séptico para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, y un sistema de tratamiento fisicoquímico para las aguas residuales de proceso (esencialmente aguas de lavado), integrada por sedimentador primario, unidad de coagulación - floculación y unidad de sedimentación secundaria.

3.8. CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto permite el cumplimiento de la normatividad ambiental de vertimientos tanto en el escenario vigente dado por el decreto 1594 de 1984, como en el escenario tentativo establecido en el decreto 3930 de 2010.

Los flujos para la red integrada de consumo mínimo de agua se obtuvieron utilizando la turbidez como contaminante clave, gracias a que esta propiedad se correlaciona con la concentración de los sólidos suspendidos y a que los balances de materia son homogéneos. Esto facilitó la aplicación de la metodología propuesta, pues la turbidez es una medida económica y sencilla de tomar.

Los cambios propuestos en el algoritmo NNA permitieron incluir en la red integrada de agua de consumo mínimo dos aspectos particulares como: una fuente de agua fresca con concentración de contaminante diferente de cero y la presencia de una unidad interna de tratamiento de agua. De esta manera se aplicó con facilidad la metodología a las condiciones específicas de la empresa.

3.9. REFERENCIAS

- [61] C. Oréstez, Métodos artesanales de producción de bioplaguicidas a partir de hongos entomopatógenos y antagonistas. La Habana: Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal INISAV, 2006, p. 61.
- [62] C. I. Nicholls, Control biológico de insectos: un enfoque agroecológico. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2008, p. 294.
- [63] A. Monzón, "Producción, uso y control de calidad de hongos entomopatógenos en Nicaragua," Manejo Integr. Plagas, vol. 63, pp. 95–103, 2001.
- [64] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, "Anuario Meteorológico Cafetero 2011." p. 567, 2012.
- [65] "El comportamiento de la industria cafetera colombiana 2011." Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bogotá, p. 37, 2011.
- [66] G. Nava Tovar and A. Vargas, "Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio." Instituto Nacional de Salud - Subdirección Red Nacional de Laboratorios, Bogotá, p. 95, 2011.
- [67] Water Pollution Control Federation - American Public Health Association - American Water Works Association, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. Baltimore, Maryland, 2005, p. 1288.
- [68] "Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título D." Ministerio de Desarrollo Económico, Bogotá, 2000.
- [69] IDEAM, "Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas." IDEAM, Bogotá, p. 82, 2003.
- [70] J. M. Murillo, "Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México)," Boletín Geológico y Min., vol. 120, no. 2, pp. 169–184, 2009.
- [71] Dirección Nacional de Agua y Saneamiento básico, "Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título C." Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.
- [72] O. T. Komesli, K. Teschner, W. Hegemann, and C. F. Gokcay, "Vacuum membrane applications in domestic wastewater reuse," Desalination, vol. 215, no. 1–3, pp. 22–28, Sep. 2007.

- [73] A. Durán, J. Hernández, C. E. Roth, C. Durán, B. Frontana, and R. Rosa, "Tratamiento de aguas residuales mixtas e industriales utilizando el reactivo de Fenton electrogenerado," *Tecnol. Cinencia Ed.*, vol. 18, no. 1, pp. 10–15, 2003.
- [74] Dirección Nacional de Agua y Saneamiento básico, "Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J." Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.
- [75] D. Wei, Z. Tan, and Y. Du, "Toxicity-based assessment of the treatment performance of wastewater treatment and reclamation processes," *J. Environ. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 969–978, Jun. 2012.

CAPÍTULO 4

4. ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI)

4.1. INTRODUCCIÓN

El control de plagas y arvenses a través de agentes de control biológico es una estrategia que ha tomado importancia durante las últimas décadas. Una de las principales limitantes de las empresas que buscan masificar su producción es de carácter económico. En este sentido, el uso de aguas residuales resulta de interés, ya que su contenido de nutrientes puede ser apto para el crecimiento de algunas especies fúngicas. Consecuentemente, pueden lograrse ahorros en la compra de materias primas y sustratos, contribuyendo a hacer viable y económica la producción en masa.

El uso del agua residual como medio de cultivo trae beneficios adicionales asociados al manejo integral de aguas. En este contexto, el aprovechamiento de una corriente residual, reduce la carga contaminante vertida a cuerpos de agua, disminuye los costos de tratamiento, minimiza el consumo de agua y agrega valor a una corriente que de otra forma se trataría como residuo. En términos ambientales también se favorece el cumplimiento de la normatividad ambiental de vertimientos, que en el caso Colombiano se hace más exigente con la entrada en vigencia del decreto 3930 de 2010.

En este capítulo se presenta un estudio para el aprovechamiento de una parte de las aguas residuales de la empresa, y se analizan unos resultados económicos preliminares. En el estudio se utilizaron las especies fúngicas *Trichoderma harzanium*, *Paecilomyces lilacinus* y *Beauveria bassiana* para determinar la viabilidad de su cultivo en el agua residual industrial, proveniente de la etapa de molido y formulación.

En la selección de la estrategia de cultivo se tuvieron en cuenta dos opciones de inoculación para obtener una mezcla microbiana de las tres especies, y dos técnicas para el control de la contaminación. Las variables medidas en los cultivos fueron la concentración de unidades formadoras de colonia y la concentración de esporas. Finalmente se determinó la viabilidad de cultivar de manera individual las tres especies en el agua residual sin ningún tipo de suplemento nutritivo, y utilizando el autoclavado como técnica de control de contaminación.

El orden de magnitud de la concentración de unidades formadoras de colonia estuvo entre 10^6 y 10^7 UFC/ml, muy cercano al registrado en el medio líquido utilizado en la producción industrial de la empresa. El análisis económico de la estrategia de aprovechamiento muestra beneficios en la implementación del proceso.

4.2. MARCO GENERAL

4.2.1. CRECIMIENTO DE HONGOS

Los hongos son organismos inmóviles, unicelulares o multicelulares cuyos grupos más representativos son los hongos filamentosos, las levaduras y las setas. Su alimentación es estrictamente heterótrofa ya que obtienen su alimento absorbiendo sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en el ambiente. Cuando el sustrato es demasiado complejo, los hongos realizan un proceso conocido como digestión extracelular. Este consiste en la segregación de enzimas y otros compuestos que degradan la fuente de alimento transformándola en moléculas más simples que pueden ser absorbidas con facilidad [76].

Los hongos filamentosos, también conocidos como mohos, tienen estructuras multicelulares conformadas principalmente por hifas. Las hifas son células vegetativas en forma de filamentos que pueden poseer varios núcleos [77]. Las especies *B. bassiana*, *P. lilacinus* y *T. harzanium* corresponden a un conjunto especial de hongos filamentosos donde la reproducción de tipo sexual es desconocida o atípica. Por lo anterior, fueron tradicionalmente clasificados como hongos imperfectos o deuteromicetos. Sin embargo, este grupo se considera arbitrario y estudios recientes basados en técnicas moleculares, han permitido reagrupar algunos deuteromicetos dentro de las divisiones formales Ascomycota y Basidiomycota.

El ciclo de vida de las tres especies antes mencionadas comienza con un propágulo; nombre genérico para una célula con capacidad de reproducirse, que puede ser un fragmento de hifa o un conidio. Los conidios son esporas asexuales cuyo tipo depende de la especie de hongo y de las condiciones de crecimiento. Bajo un ambiente apropiado las esporas germinan y se transforman en una hifa. Un fragmento de hifa o una nueva hifa puede continuar alargándose y ramificándose hasta formar una estructura más compleja conocida como micelio. Cuando el micelio ha alcanzado la madurez, algunas de las hifas comienzan a transformarse para dar lugar a estructuras especializadas donde se generan los distintos tipos de esporas. La mayoría de las esporas son más resistentes que las hifas por lo que pueden sobrevivir mayores periodos de tiempo y resistir condiciones adversas. Estas características y el transporte por las masas de aire permiten al hongo alcanzar otros territorios, donde las esporas pueden germinar y así comenzar un nuevo ciclo [78].

En fase líquida, el cultivo discontinuo comienza con la adición del inóculo. El inóculo se compone de un soporte líquido en el cual están dispersos los propágulos del hongo; estos provienen generalmente de un cultivo sólido maduro. Al principio, las células viables del inoculo se adaptan al medio líquido, y no existe crecimiento del propágulo o generación de biomasa. Una vez superada la fase de adaptación los propágulos siguen el ciclo de vida que se describió anteriormente. Las hifas crecen a gran velocidad formando redes intrincadas que en algunas especies toman el aspecto de pellets. Durante esta fase de crecimiento en muchas especies el radio del pellet aumenta de manera lineal respecto al tiempo [79]. Una vez el espacio y los nutrientes empiezan a ser limitados, la generación de biomasa se frena y se entra en un período estacionario. Finalmente se entra en la fase de muerte, donde la viabilidad celular empieza a disminuir. La producción de esporas inicia en la fase de crecimiento rápido y va hasta la fase final o de muerte.

4.2.2. MÉTODOS COMERCIALES DE PRODUCCIÓN DE AGENTES FUNGICOS PARA CONTROL BIOLÓGICO (BCA's)

Actualmente se producen varias especies de hongos que funcionan como agentes de control biológico y promotores de crecimiento vegetal. Para producir estos microorganismos con fines comerciales, existen dos métodos básicos, la fermentación líquida y la fermentación en estado sólido [61]. En la fermentación líquida el hongo puede crecer sumergido en el medio, o superficialmente. En la fermentación sólida se utilizan una variedad de sustratos sólidos, que a la vez sirven como soporte físico para el crecimiento del hongo.

La fermentación bi-fásica es una técnica de producción común a pequeña escala y corresponde a una simple combinación de los métodos básicos. Primero se inocula un medio líquido con el hongo, donde se desarrolla por períodos que van de tres a cinco días. Luego el caldo de fermentación se mezcla con el sustrato sólido que se deja incubando, hasta que el hongo lo colonice completamente.

En la fermentación en estado sólido se requieren tiempos de incubación del orden de semanas y se favorece la producción de esporas aéreas. Estas son comunes en los productos comerciales debido a que permiten la venta de concentrados en polvo o granos, gracias a su resistencia al proceso de deshidratación y a su estabilidad durante períodos que van desde algunos meses hasta años.

En la fermentación bi-fásica se reduce el tiempo de fermentación en fase sólida, principalmente por que los propágulos recién desarrollados en el medio líquido, colonizan con facilidad el medio sólido. Sin embargo, se requiere una mayor cantidad de operaciones manuales lo que aumenta los costos y dificulta la producción a gran escala [61].

En la fermentación líquida el tiempo de producción es reducido y se producen principalmente estructuras miceliales. La fermentación líquida resulta de gran interés por dos aspectos fundamentales: primero, por la alta capacidad de colonización o de infección de las estructuras fúngicas, y segundo, por la reducción de costos.

Para aprovechar la primera ventaja se vienen estudiando una serie de métodos que permiten la estabilización o conservación del micelio por mayores períodos de tiempo. Técnicas como el almacenando al vacío con refrigeración, la incorporación de azúcares la disminución del pH y el encapsulando en alginatos, han posibilitado la entrada al mercado de algunos productos de este tipo [80]. En cuanto a la reducción de costos, la fermentación líquida es atractiva, porque requiere pocas operaciones manuales, y es posible utilizar aguas residuales como única fuente de nutrientes [81]–[84]. De esta manera se logran ahorros significativos en los costos de producción, y se evita la competencia por insumos de alto valor como los cereales, que tienen demanda directa o indirecta en el mercado de alimentos.

4.2.3. VARIABLES DE OPERACIÓN PARA FERMENTACIÓN SUMERGIDA EN SISTEMAS DISCONTINUOS

En medios líquidos con una agitación apropiada, el micelio se aglomera en forma de pellets que aumentan de tamaño dentro volumen del líquido, en lo que se conoce como fermentación sumergida. Este tipo de fermentación, ha sido ampliamente desarrollada con diferentes especies de hongos filamentosos. En el medio de cultivo se manipulan variables como fuente de carbono, relación carbono/nitrógeno, pH inicial y temperatura. Con ellas se busca aumentar el número de esporas, mejorar la infectividad y aumentar la eficiencia o tasa de mortalidad en las plagas y patógenos. A escala industrial aparecen factores adicionales que introducen nuevas variables como el tiempo de fermentación, la aireación, la agitación, la adición de antibióticos, antiespumantes etc. [80].

Algunos de los factores limitantes en cultivos de hongos filamentosos con volúmenes considerables son la resistencia a la transferencia de masa y el control de contaminación. El aumento en la resistencia a la transferencia de masa se debe a que los pellets implican una barrera física para la absorción de nutrientes que se incrementa en la medida en que se llega al centro de la estructura. Esta resistencia se refuerza con las dificultades para distribuir apropiadamente el aire en reactores de gran volumen [79]. Por otro lado, existen especies de hongos y bacterias contaminantes casi en todos los ambientes, que son difíciles de eliminar y cuya presencia en los cultivos debe ser cuidadosamente evitada. Algunos de estos contaminantes tienen metabolismos rápidos que les permiten colonizar a gran velocidad los medios de cultivo, con lo que relegan el desarrollo de las especies deseadas [85].

Una de las opciones para manejar estos inconvenientes viene de los métodos tradicionales de producción, donde la fermentación sumergida se realiza en volúmenes pequeños. Esta práctica es coherente con uno de

los principios de la intensificación de procesos que busca reducir limitaciones como las de transferencia de masa [86]. Esto significa que en cultivos con pequeños volúmenes, la aireación uniforme deja de ser una preocupación y la contaminación solo afecta algunas unidades de reacción en lugar de lotes enteros de producción.

Un parámetro importante para el caso específico de entomopatógenos, es la capacidad infectiva del inóculo, ya que esta se pierde en la medida en que el hongo se cultiva repetidamente en medios artificiales. Para restablecer la infectividad se recurre al cultivo en hospederos vivos, para obtener un ciclo infectivo completo sobre la especie diana. Los propágulos obtenidos se trasladan luego a un medio artificial como un cereal, o un agar donde se permite la colonización del hongo en periodos de entre una y dos semanas. Este cultivo se mantiene conservado y puede ser repetido por transferencia de propágulos a nuevos sustratos, y servir como inóculo o preinóculo en la producción comercial de biocontroladores con alta capacidad para penetrar el cuerpo del hospedero[87].

La Tabla 41 presenta algunas de las condiciones típicas para la fermentación sumergida de tres especies filamentosas. Dos de estas, *B. bassiana* y *P. lilacinus*, han sido cultivadas exitosamente a temperaturas que van desde los 25°C a los 28°C [88], [89]. Para éstos hongos se ha determinado que la relación carbono : nitrógeno (C:N) es un factor clave en la esporulación. Algunos estudios concluyen que la esporulación se beneficia con relaciones C:N que están el rango de 10 a 40 [90], [91]. Para la tercera especie, *Trichoderma* spp., la temperatura no es un parámetro crítico. En ambientes naturales el crecimiento es aceptable entre los 20°C y los 30 °C, recomendándose para el cultivo, una temperatura de 25 °C. La relación C:N del medio también puede afectar la esporulación de *Trichoderma* spp., encontrándose que relaciones muy bajas tienen impactos negativos [92].

Las fuentes de carbono y nitrógeno suelen ser diversas, prefiriéndose las fuentes de carbono simples y las fuentes de nitrógeno económicas. El pH se procura mantener en valores cercanos al neutro, ya que en general valores de pH muy ácidos o básicos afectan negativamente el crecimiento y la esporulación [93].

Tabla 41: Condiciones típicas para fermentación sumergida

Parámetro	Trichoderma		Paecilomyces		Beauveria	
	Valor	Ref.	Valor	Ref.	Valor	Ref.
Temperatura (°C)	25-30	[94][92]	28	[88][95]	26-28	[96]
pH	5-7	[82][93]	5-6	[88]	5	[90]
C:N	9:1 – 40:1	[92][91]	10:1-40:1	[91]	10:1	[90]
Concentración inicial (esporas/ml)	1x10 ⁵ - 1x10 ⁶	[92][97]	1x10 ⁵ - 1x10 ⁶	[88][90]	1x10 ⁵ - 1x10 ⁶	[90]
Concentración final en líquido (esporas/ml)	1x10 ⁸	[98]	1x10 ⁹	[95]	1x10 ⁸	[90]
Tiempo (hr)	72 – 120	[97][94]	96	[90][88]	144-169	[99][90]
Agitación (rpm)	150-180	[97][92]	150-300	[100][101]	180-300	[99][90]

4.2.4. MEDIDAS DE CRECIMIENTO MICROBIANO

El crecimiento microbiano puede establecerse a través de diferentes medidas que normalmente se clasifican en dos grupos: medidas directas e indirectas. Cuando se mide una variable como número de células o biomasa, se habla de medidas directas. En las indirectas, se miden otro tipo de variables como turbidez o absorbancia, que luego son relacionadas de alguna manera con las variables directas.

La elección del tipo de medida está estrechamente relacionada con el propósito de la medición. En control biológico una de las variables más relevantes es el número de estructuras con capacidad de reproducirse y colonizar un nuevo ambiente. Las formulaciones comerciales de controladores biológicos deben pasar por pruebas de calidad para asegurar un número mínimo de estructuras viables. Cuando se trata de cultivos líquidos de organismos unicelulares como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, las estructuras viables corresponderán esencialmente a las células vivas dentro del medio. Para los hongos filamentosos que crecen en fermentación sumergida, las estructuras viables podrán ser cualquier tipo de propágulo con capacidad de reproducirse, bien sea un fragmento de micelio o algún tipo de espora.



Figura 9: Colonias de *T. Harzanium* en agar rosa de bengala

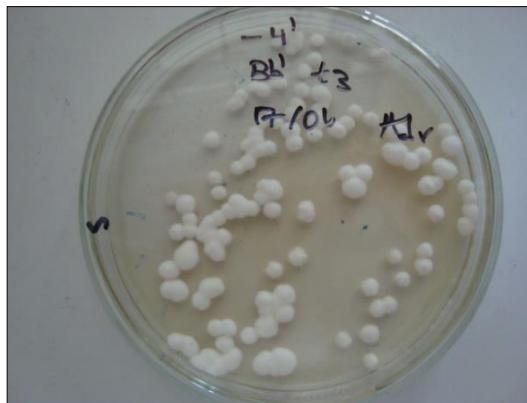


Figura 10: Colonias de *B. bassiana* en agar sabouraud

Las estructuras viables se establecen a través de una técnica conocida como recuento en placa. En ésta técnica, se parte del supuesto que cada estructura viable tiene la capacidad de reproducirse y generar una colonia. Para contabilizar las estructuras viables se toman muestras del cultivo generalmente diluidas y se siembran en un medio sólido especial o agar, como se muestra en las Figuras 9 y 10. Luego se cuentan las colonias formadas, se corrigen por el factor de dilución y se reportan las estructuras viables en unidades formadoras de colonia (UFC) [102].

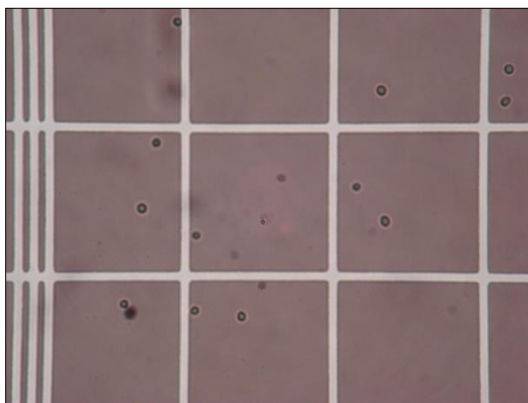


Figura 11: Sección de cámara de Neubauer con esporas de *T. harzianum*

Cuando se elaboran controladores biológicos en presentaciones secas o en polvo, las únicas estructuras que pueden reproducirse son las esporas, ya que normalmente los fragmentos de micelio no sobreviven a los procesos de secado [80]. Para estos casos se realiza otro tipo de conteo que determina el número total de esporas, incluyendo viables y no viables. La técnica utiliza un microscopio y un elemento conocido como cámara de conteo (Figura 11) en donde se deposita una pequeña porción de una muestra diluida. Luego se establece

el número de esporas teniendo en cuenta el factor de dilución de la muestra y el factor de corrección de la cámara [103].

4.2.5. CONTROL DE CONTAMINACIÓN MICROBIANA

El control de contaminación microbiana es importante en la producción de agentes de control biológico (BCA's) para evitar la interferencia de organismos indeseables en los medios de cultivo. Básicamente existen técnicas físicas y químicas que pueden ser de destrucción o inhibición de crecimiento. La efectividad de una técnica depende de una serie de factores como condiciones ambientales, características del microorganismo, concentraciones, entre otros.

Poblaciones indeseables de microorganismos en altas concentraciones, requieren mayor tiempo de exposición o mayor concentración del agente de control de contaminación. En cuanto a las características del microorganismo, se ha encontrado que aquellos en fases de latencia como las esporas, son menos vulnerables gracias a la resistencia de sus membranas o paredes celulares y al escaso intercambio de sustancias con el exterior. La presencia de materia orgánica en suspensión es otro factor que afecta negativamente el control microbiano. Por un lado ofrece resguardo a los microorganismos haciendo más difícil la penetración del agente controlador y por otro puede inhibir la acción de algunos químicos antimicrobianos [102].

En medios de cultivo para producción de biocontroladores fúngicos normalmente se utiliza una combinación de técnicas de destrucción y de control de crecimiento. La destrucción, también conocida como esterilización, se realiza para garantizar que al momento de la inoculación, el medio no contenga microorganismos contaminantes. El control de crecimiento se utiliza para evitar el desarrollo de los contaminantes contraídos durante el proceso fermentativo. En la producción de hongos es común la utilización de sustancias químicas bacteriocidas o bacteriostáticas como el cloranfenicol y el ácido láctico, que atacan específicamente a las bacterias, controlando su población sin afectar el desarrollo del hongo. Sin embargo, es difícil tomar medidas frente a hongos contaminantes pues las sustancias que los atacan, también pueden afectar la especie del hongo que se desea cultivar [77].

Para la destrucción de contaminantes en medios de cultivo, se utiliza con frecuencia una técnica de esterilización por calor húmedo conocida como autoclavado. Esta técnica de esterilización hace uso de un dispositivo conocido como autoclave, que permite el contacto entre el material a esterilizar y vapor a presión, para alcanzar temperaturas superiores a la de ebullición. Los tiempos normales de esterilización son del orden de 15 minutos. Este tiempo puede hacerse mayor, por ejemplo si se tienen recipientes voluminosos, para lograr que todo su contenido alcance la máxima temperatura de autoclavado (aproximadamente 121°C).

4.2.6. APROVECHAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI)

El agua residual del molido de la empresa del caso de estudio tiene un gran potencial de aprovechamiento. Este residuo líquido contiene agua, arroz molido, esporas viables, biomasa fúngica inerte y los contaminantes acarreados durante el lavado.

El arroz, es el sustrato remanente luego de la etapa de fermentación sólida, y la biomasa fúngica corresponde a las estructuras miceliales y esporas producidas. Éstas se mantienen viables tanto en el agua residual como en el producto comercial, por lo que bajo condiciones apropiadas podrían servir para un nuevo ciclo reproductivo. La combinación de sustrato disponible, presencia de esporas de las especies cultivadas y carga microbiana derivada únicamente de las superficies de lavado, hacen a ésta agua residual especialmente atractiva para el estudio de su potencial como medio de crecimiento.

El escenario del agua residual con mayor diversidad microbiana se da en el caso de la elaboración de Tropimezcla, ya que pueden aparecer al mismo tiempo esporas de *T. harzanium*, *B. bassiana* y *P. lilacinus*. Lo anterior debido a que en la elaboración de este producto se mezclan cultivos que contienen las tres especies.

4.2.7. IMPORTANCIA DEL USO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PRODUCCIÓN DE AGENTES DE CONTROL BIOLÓGICO (BCA'S)

Algunas de las ventajas del uso de los agentes biológicos radican en que no resultan nocivos para el ser humano, no generan contaminación para el ambiente y animales vertebrados, poseen gran especificidad en el control de ciertos insectos y plagas, y el suelo puede restablecer rápidamente su equilibrio natural cuando se suspende la aplicación del biocontrolador [80]. Estas características hacen idóneo su uso en un mercado de demanda creciente como es el de los productos orgánicos.

La transición en el uso de compuestos químicos al uso de agentes de control biológico, requiere esfuerzos desde diversos frentes. La masificación de la producción, la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos implícitos en el control biológico, la estandarización de las formulaciones comerciales, cambios culturales en los hábitos de cultivo y cambios en hábitos de consumo, son algunos de los campos de trabajo más importantes que deben abordarse.

Una de las principales limitantes para lograr masificar su producción es de carácter económico, ya que el precio de los biocontroladores aún no se percibe de una forma competitiva por parte del agricultor [87]. Adicionalmente, para lograr mejores resultados es necesario aplicarlos de manera preventiva, es decir cuando el patógeno o insecto plaga no se ha manifestado, o aún después que su población se haya controlado [87].

Un gran número de investigaciones en el desarrollo de controladores biológicos a escala comercial apuntan al uso de aguas residuales para disminuir los costos de producción y hacer viable su producción en masa [81]–[84]. Para la empresa del caso de estudio, el uso de su agua residual industrial para el cultivo de agentes de control biológico es bastante llamativa puesto que está acorde con dos de sus intereses actuales: encontrar sustratos más económicos e incursionar en el mercado con un producto a partir de fermentación líquida.

Otros beneficios del uso del agua residual industrial como medio de cultivo están asociados al manejo integral de aguas. En este contexto, el aprovechamiento de una corriente residual reduce la carga contaminante vertida a cuerpos de agua, disminuye los costos de tratamiento, minimiza en el consumo de agua, agrega valor a una corriente que de otra forma se trataría como residuo, e incluso favorece el cumplimiento de la normatividad ambiental.

La propuesta de aprovechar el agua residual industrial de la empresa, como medio de cultivo para agentes de control biológico, se hace atractiva por los siguientes aspectos:

- Contribuye al conjunto de conocimientos en un área de alto interés ambiental, porque se desarrolla en el marco de una producción agrícola más limpia, que busca entre otros la sustitución o complemento en el uso de agroquímicos para el manejo sanitario agropecuario
- Esta acorde a los principios del manejo integral del agua con sus implicaciones positivas desde lo ambiental y económico.
- Se ubica en las tendencias investigativas de mayor potencial que abarca el área de la producción de agentes microbianos para control biológico de insectos plagas y enfermedades en cultivos de importancia comercial.
- Es de interés específico para la empresa del caso de estudio, desde el punto de vista económico y comercial.

4.2.8. MODO DE ACCIÓN DE LOS BIOCONTROLADORES

El control biológico con hongos se fundamenta en el conocimiento de la ecología microbiana, aprovechando diversos tipos de interacciones entre la planta o fruto que se desea proteger, el hongo con el que se ejerce la acción de control y la plaga o patógeno a controlar (hongo, insecto o maleza). Regularmente se buscan interacciones negativas entre el agente de control y la plaga, de manera que esta última resulte perjudicada, pero desde una visión más amplia, también son de utilidad las interacciones positivas o efectos sinérgicos entre el agente de control y otros elementos del medio [87].

Las interacciones son consecuencia del impacto que los organismos generan en su medio ambiente, ya que todas las poblaciones toman sustancias, las modifican y generan otras que de alguna forma cambian las condiciones de su entorno. Cuando dos organismos que se desarrollan en un mismo ambiente, generan cambios de tal forma que se favorecen entre sí, hablamos entonces de la existencia de un efecto sinérgico [104].

En control biológico, un ejemplo de efecto sinérgico, es aquel donde dos agentes de control son más exitosos en su crecimiento cuando comparten un mismo hábitat. Sin embargo, este tipo de interacciones no se han explorado ampliamente ya que es difícil predecir el resultado final. Por lo anterior, es común que se recurra a procedimientos de ensayo y error, para posteriormente intentar explicar “el porqué” de los resultados [62]. Más adelante, en el marco del presente estudio, se explorarán interacciones entre biocontroladores inoculando simultáneamente varias especies en un mismo medio de cultivo.

En cuanto a interacciones negativas, las que más ocurren entre hongos controladores y plagas, son el parasitismo y el antagonismo. El parasitismo es aprovechado por un grupo de hongos conocidos como entomopatógenos, ya que causan enfermedades en insectos. El antagonismo es más común cuando se tratan de controlar malezas u hongos patógenos de plantas [62].

En los entomopatógenos, la acción patogénica empieza cuando la estructura reproductiva del hongo se adhiere al huésped. Posteriormente, esta estructura inicia la penetración con sus tubos germinales. Los tubos germinales se alargan y ensanchan convirtiéndose en hifas que proliferan en las cavidades naturales del insecto, a través de su fluido circulatorio o hemocel. La muerte del organismo puede ser causada por el aumento de la viscosidad del hemocel, por la destrucción de órganos internos, o por la liberación de toxinas [63].

Dentro de los hongos entomopatógenos, las especies *B. bassiana* y *P. lilacinus* tienen gran acogida, ya que atacan un amplio espectro de plagas tan importantes como el picudo, la broca, áfidos y nematodos que afectan cultivos de café, algodón, plátano y tomate entre otros [63], [105], [106].

En los hongos antagonistas, la acción del agente control se debe a su interferencia o a la inhibición de alguno de los procesos vitales de los patógenos vegetales. El antagonismo se ejerce de distintas maneras, dentro de las que se destacan la competencia y la antibiosis. En la primera, el agente controlador entra en disputa por los nutrientes y/o el espacio necesarios para el crecimiento del patógeno. En la antibiosis, el controlador libera sustancias al medio ambiente que inhiben actividades metabólicas en su competidor [107].

El hongo *Trichoderma* spp. es una de las especies más usadas en cultivos ya que antagoniza con numerosos hongos patógenos dentro de los que se tienen: *Plasmidiophora brassicae* causante de la hernia de las crucíferas, *Sclerotium cepivorum* causante de la pudrición blanca del ajo y *Rhizoctonia solani*, responsable del chancro del tallo o costa negra, que ataca cultivos de tubérculos [108]. *Trichoderma* spp. se utiliza también como biofertilizante, ya que funciona como promotor de crecimiento radicular, acelerando el desarrollo de la planta [109] y mejorando la asimilación de nutrientes, [110].

El papel de *Trichoderma* spp. como promotor de crecimiento y biofertilizante es otro ejemplo de sinergismo en biocontroladores. Este se fundamenta en la capacidad del hongo para colonizar las raíces, solubilizar fosfatos, liberar factores de crecimiento y degradar materia orgánica, facilitando la asimilación de nutrientes en las plantas [111], [112]. En cuanto a la acción antagonista, esta puede explicarse por diferentes aspectos: su rápido metabolismo le permite competir exitosamente por el espacio y los nutrientes donde se desarrolla, adicionalmente *Trichoderma* spp. libera toxinas que causan cambios drásticos en el funcionamiento de las células de organismos patógenos, llevándolas incluso hasta la lisis o muerte celular [113].

4.2.9. CONDICIONES DE FERMENTACIÓN SUMERGIDA EN LA EMPRESA DEL CASO DE ESTUDIO

En la empresa del caso de estudio, se utiliza la fermentación líquida como una de las etapas del proceso de fermentación bi-fásica. El objetivo es usar el cultivo obtenido en medio líquido como inóculo para el sustrato sólido. En este sentido la fermentación sumergida debe producir estructuras con alta capacidad de colonización y crecimiento para que el tiempo de fermentación en estado sólido sea más corto.

El medio de cultivo para la fermentación sumergida de las especies *T. harzanium*, *B. basiana* y *P. lilacinus* es esterilizado en autoclave a 15 psi durante 30 minutos antes de la inoculación. La Tabla 42 presenta las especificaciones del medio de cultivo industrial.

Tabla 42: Medio líquido industrial (MLI)

Descripción	Cantidad
Agua (ml)	1 000
Carbohidratos (gr)	17,8
Proteína (gr)	5,1
Sodio (gr)	1,9
Calcio (gr)	0,8
Antibacterial (gr)	0,05

Para la fermentación se utilizan 200 mililitros de medio de cultivo en frascos de 500 mililitros. Para el inóculo se emplean cepas procedentes del Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFE. Las cepas provienen de hospederos vivos recién infectados y se trasladan a cultivos sobre arroz, en los que al cabo de 2 y 3 semanas se registra abundancia de esporas aéreas.

Las cepas se conservan refrigeradas en períodos de entre 2 y 4 semanas, luego de lo cual se solicitan nuevos cultivos a CENICAFE de manera que se mantenga la infectividad de los hongos para los procesos de producción masiva. Para el inóculo pueden utilizarse muestras de los cultivos provenientes de CENICAFE, resiembras de estos cultivos en agar nutritivo con edades de entre 7 y 15 días, o muestras de cultivos de arroz altamente esporulados.

El inóculo es preparado en una solución de 1 200 ml agua esterilizada con 0,2% (v/v) de ácido láctico. A la solución se agregan entre 10 y 15 gramos de cultivo sólido en agar o arroz. De esta manera se obtiene una suspensión de esporas cuya concentración oscila entre 10^5 y 10^6 esporas/ml. A cada frasco con 200 ml de medio se agregan 10 mililitros de inóculo, con lo que se logra una concentración inicial de esporas en el medio de cultivo de entre 10^4 y 10^5 esporas/ml. Los frascos inoculados se tapan para evitar ingreso de polvo y contaminantes. El sistema de fermentación permite la circulación del aire, ya que el cierre no es completamente hermético. Luego de la inoculación los frascos son trasladados a un agitador orbital, en un cuarto con temperatura controlada. Las variables del proceso de fermentación sumergida en la empresa se resumen en la Tabla 43.

Tabla 43: Variables de operación para la fermentación sumergida en la empresa

Variable	Valor
Tiempo (días)	4-6
Volumen de reacción (ml)	200
Temperatura (°C)	28
Agitación (rpm)	100
pH inicial	6-7
Concentración inicial de esporas (esporas/ml)	$10^4 - 10^5$

Al final del proceso fermentativo, se obtienen cultivos con alta presencia de estructuras miceliales en forma de pellets. En el cultivo de *T. harzanium* los pellets alcanzan diámetros de hasta diez milímetros. Los pellets de *P. lilacinus* y *B. bassiana* suelen ser más pequeños con tamaños de alrededor de 7 y 5 milímetros respectivamente (Figura 12).

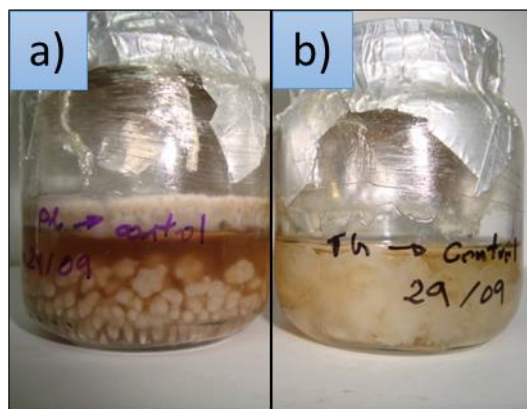


Figura 12: Cultivos de laboratorio donde se evidencian los pellets de: a) *Paecilomyces. lilacinus* y b) *Trichoderma harzanium*

En la empresa se realiza control de calidad de la fermentación sumergida a través de evaluaciones de contaminación microbiana. Para identificar la presencia de bacterias, las muestras del cultivo se siembran en agar nutritivo. Para hongos contaminantes en el ambiente o en muestras de cultivo, se utilizan medios selectivos como el agar sabouraud o el agar rosa de bengala suplementado con cloranfenicol. Éstos permiten el crecimiento de hongos filamentosos y levaduras, pero inhiben el crecimiento de bacterias.

Además de los contaminantes, también se evalúa el porcentaje de esporas viables en los productos en polvo. Para esto, se compara el número total de esporas y el número de esporas viables en muestras de producto comercial. El número total de esporas se determina por conteo en cámara de Neubauer, y las esporas viables por conteo de unidades formadoras de colonia en siembras sobre agar sabouraud.

4.3. METODOLOGÍA GENERAL PARA EL ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DEL ARI

La metodología propuesta buscó el aprovechamiento del ARI como sustrato para cultivos en fase líquida de una o varias de las tres especies producidas en la empresa. La metodología general se dividió en dos fases que se describen a continuación.

4.3.1. FASE 1: CULTIVOS EN MEDIO LÍQUIDO INDUSTRIAL (MLI)

En la primera fase se realizaron cultivos individuales de *T. harzanium*, *P. lilacinus* y *B. bassiana* en medio líquido industrial (MLI) y un cultivo con inóculo simultáneo de las tres especies cuyo propósito fue la obtención de una mezcla microbiana.

Para los cultivos individuales se realizó un seguimiento temporal de la concentración de unidades formadoras de colonia y de la concentración de esporas. Para el cultivo simultáneo de las tres especies se midió únicamente la concentración de unidades formadoras de colonia. Lo anterior debido a la incertidumbre en la diferenciación de las esporas de cada especie por conteo en cámara de Neubauer. Las fermentaciones se realizaron durante períodos que van de los 7 a los 8 días. Adicionalmente, en los cultivos individuales se tomó una medida de control para concentración de esporas, entre 10 y 15 días después de iniciada la fermentación.

El propósito de la fase 1 fue obtener un punto de referencia para comparar con los resultados de los cultivos realizados en el agua residual industrial (ARI).

4.3.2. FASE 2: CULTIVOS EN AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI)

En la segunda fase se realizaron una serie de cultivos en agua residual. Para establecer algunas de las condiciones de los cultivos se siguió un procedimiento secuencial que buscó el mejor resultado, atendiendo a las restricciones encontradas durante la experimentación. Como mejor resultado, se consideró la estrategia de aprovechamiento de menor costo y más cercana a los intereses particulares de la empresa. La estrategia de menor costo es aquella en la que los cultivos no requieren uso de barreras de contaminación, o aquella que use la barrera de contaminación más económica. En cuanto a los intereses de la empresa, se buscó en la medida de lo posible obtener en el cultivo una mezcla microbiana en fase líquida, por el interés comercial en incursionar en el mercado con un producto de este tipo.

Para el manejo de contaminación en el ARI se propusieron las siguientes técnicas:

Sin autoclavado

- Uso del ARI directamente para las fermentaciones.
- Adición de ácido láctico al ARI antes de iniciar la fermentación.

Con autoclavado

- Esterilización del ARI por autoclavado.

La metodología para obtener la mejor estrategia de aprovechamiento se muestra esquemáticamente en el diagrama de la Figura 13. Allí se propone un procedimiento secuencial en dos direcciones. En la dirección horizontal se procura obtener la mezcla microbiana dentro de una misma técnica de control de contaminación, proponiendo incluso la inoculación del ARI con una mezcla de esporas. Cuando la estrategia de control de contaminación resulta poco efectiva, se avanza verticalmente en el diagrama y se pasa a una estrategia de control de contaminación más agresiva.

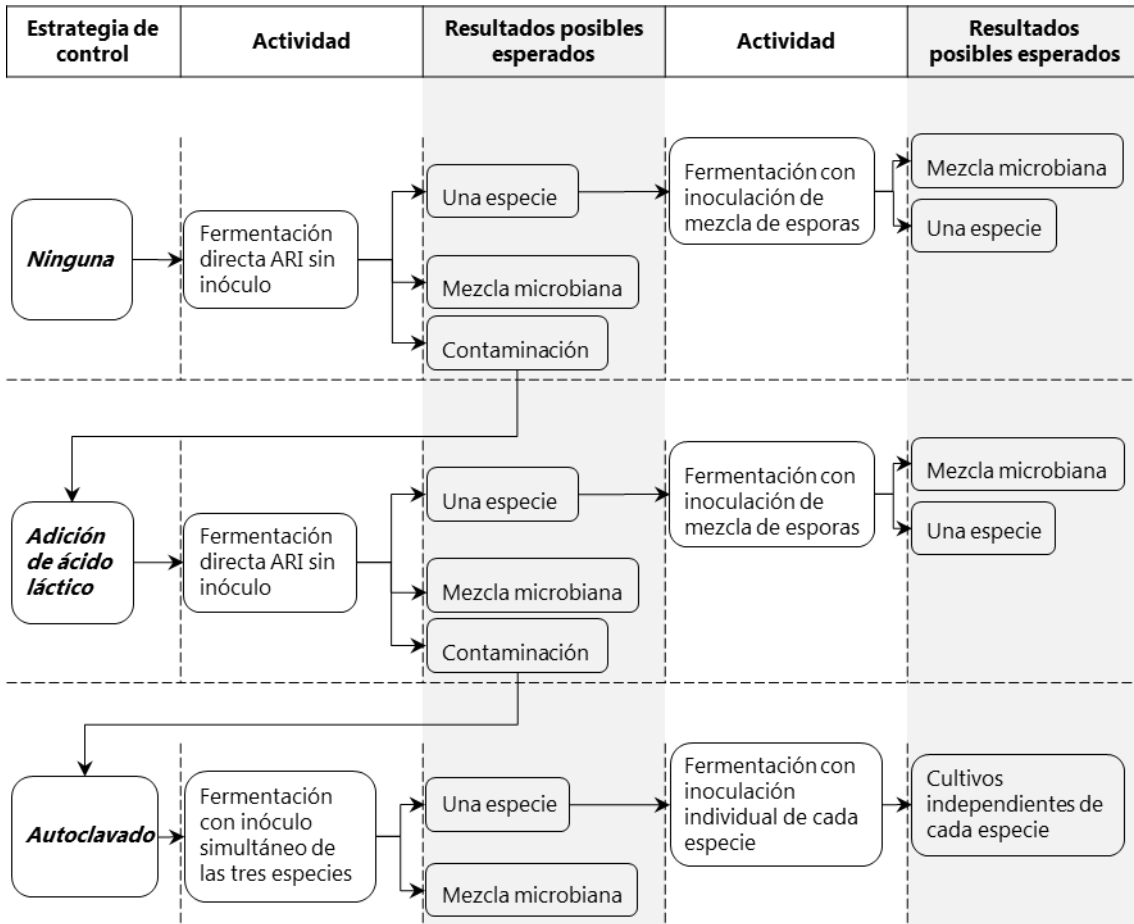


Figura 13: Esquema metodológico para la Fase 2

Como se muestra en el diagrama, cuando no se hace uso del autoclavado, la fermentación se realiza inicialmente sin adición de inóculo, ya que como se resaltará más adelante el ARI utilizada contiene esporas viables de *T. harzanium*, *B. bassiana* y *P. lilacinus*. Si la contaminación es baja, y el resultado de la fermentación corresponde a un cultivo que contiene esencialmente esporas de una sola especie, aún es posible intentar obtener la mezcla adicionando al ARI inóculo con esporas de las especies faltantes.

Tabla 44: Tipos de medidas en cada fase experimental

Fase	Descripción experimento	Medida realizada		Frecuencia de la medida	
		UFC	Esporas	Diaria	Única
1	Especies individuales en MLI	x	x	x	
	Mezcla microbiana en MLI	x		x	
2	Cultivos en ARI	x			x

Para el caso en el que se requiere autoclavado, la primera opción es la adición de inóculo de las tres especies para obtener la mezcla microbiana. La inoculación es necesaria en este caso, debido a que con el autoclavado las esporas presentes en el ARI quedan inviables. Si el resultado de la fermentación no es una mezcla microbiana, se procede a realizar cultivos de las especies individuales en el ARI. En el diagrama de la Figura 13, también se esquematiza esta ruta experimental.

Para la fase 2 únicamente se tomaron medidas de unidades formadoras de colonia al final del tiempo de fermentación. El conteo de esporas no se realizó ya que no es representativo de las especies que se desean cultivar, pues incluye esporas de contaminantes y esporas del producto comercial que perdieron su capacidad reproductiva por la esterilización. La Tabla 44 resume las características de las medidas en cada fase.

4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de control de calidad de la empresa Soluciones Microbianas del Trópico Ltda.

4.4.1. CONSERVACIÓN DE CEPAS

Las cepas fueron cultivadas en medio a base de arroz durante 10 a 15 días hasta obtener esporulación abundante y posteriormente se llevaron a refrigeración a 4°C por períodos no superiores a un mes. Semanalmente según la necesidad, se prepararon repiques sobre agar sabouraud, que fueron mantenidos por períodos de 10 a 15 días, a una temperatura promedio de 21 °C.

4.4.2. PREPARACIÓN DE INÓCULO

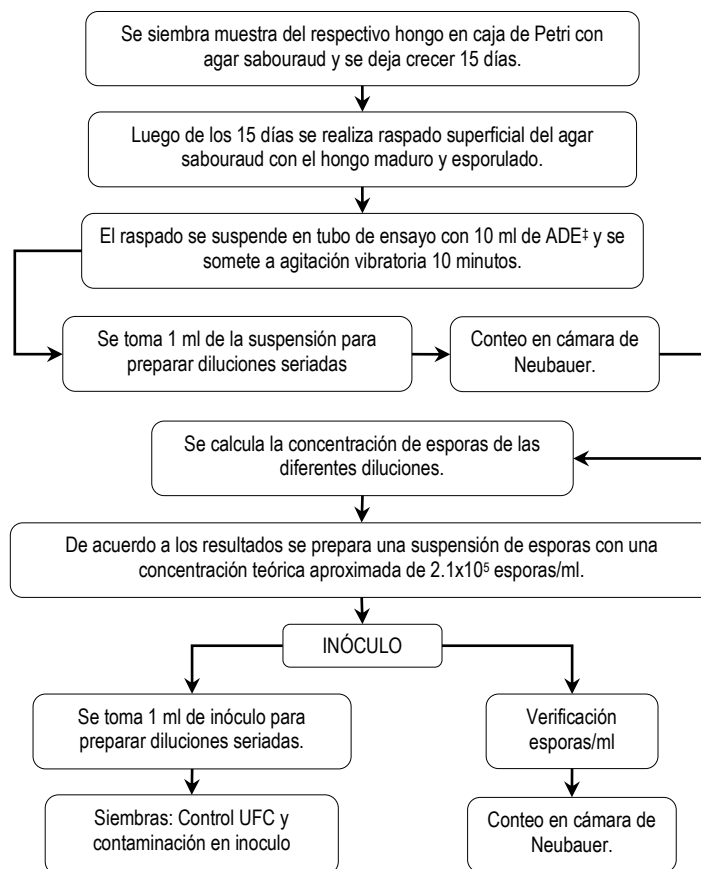


Figura 14: Diagrama de flujo preparación de inóculo

Para las fermentaciones sumergidas de las especies individuales, se preparó una suspensión con esporas obtenidas del raspado superficial de un cultivo del hongo sobre agar sabouraud. La edad de los cultivos estuvo alrededor de los 15 días. El raspado se adicionó a un tubo de ensayo con una solución de tween 80 al 0.1 % (v/v). La mezcla se sometió a agitación vibratoria intensa durante 10 minutos para lograr la separación de las esporas. La concentración se ajustó aproximadamente a 2.1×10^5 esporas por mililitro diluyendo la suspensión inicial. Los conteos de esporas fueron realizados en cámara de Neubauer.

Para el ensayo de la mezcla microbiana en el que se inocularon simultáneamente las tres especies, se siguió un procedimiento análogo al anterior. En este caso se preparó una suspensión de esporas con una concentración aproximada de cada especie, correspondiente a 2.1×10^5 esporas por mililitro, para una concentración total de 6.3×10^5 esporas por mililitro. El diagrama mostrado en la Figura 14 resume el procedimiento descrito.

4.4.3. MEDIOS PARA LAS FERMENTACIONES

Para la fase 1 se utilizó medio líquido industrial (ver Tabla 42). Para la fase 2 se utilizó agua residual industrial proveniente del molido de un producto a base de un consorcio microbiano, con el fin de obtener una mayor diversidad en el ARI, pues en este caso existen esporas viables de *T. harzanium*, *B. bassiana* y *P. lilacinus*.

4.4.4. RECOLECCIÓN Y MANEJO DEL ARI

Luego del molido de lotes de reproceso, se recolectó toda el agua residual en canecas de 40 litros (Figura 15 a). Para lograr una composición homogénea, se mezcló el agua contenida en la caneca y luego se sumergió un tubo largo para tomar columnas de agua desde el fondo. El agua del tubo se transfirió a frascos de 500 ml (Figura 15 b). Para los ensayos con ARI, el contenido de los frascos se sometió a agitación con barra magnética para homogeneizar la mezcla, y de allí se sacaron los volúmenes requeridos en los diferentes experimentos. Cuando se necesitó ARI esterilizada, el frasco y su contenido fueron autoclavados previamente. Todo el material utilizado en los experimentos fue previamente esterilizado.

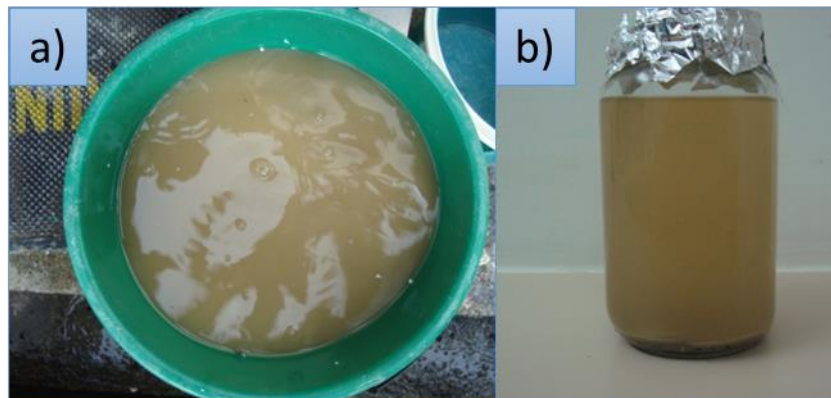


Figura 15: a) Recipientes para recolección de agua residual industrial (ARI); b) Frasco con muestra de (ARI)

4.4.5. CONDICIONES DE FERMENTACIÓN

La temperatura, agitación y pH fueron los mismos que se utilizan en la empresa (Tabla 43), el volumen de reacción utilizado para los ensayos fue de 40 mililitros de medio líquido industrial o de agua residual industrial, según el experimento. La cantidad de inóculo utilizada fue siempre de 2 mililitros. En la fase 1, el tiempo de fermentación fue regularmente de entre 7 y 8 días para el seguimiento temporal de la concentración de esporas

y UFC, y de 10 a 15 días, para los cultivos de control. Para la fase 2, los tiempos de fermentación fluctuaron entre 8 y 10 días.

4.4.6. SEGUIMIENTO TEMPORAL UFC Y ESPORAS EN LA FASE 1

Debido a la dificultad en obtener muestras homogéneas en biorreactores de laboratorio donde se cultivan hongos filamentosos, se propuso una estrategia de muestreo alternativa. Para cada experimento se inocularon 20 frascos con 40 ml de medio líquido. Aproximadamente cada día, se tomaron dos frascos para obtener resultados por duplicado, y con cada uno se realizó el procedimiento esquematizado en la Figura 16.

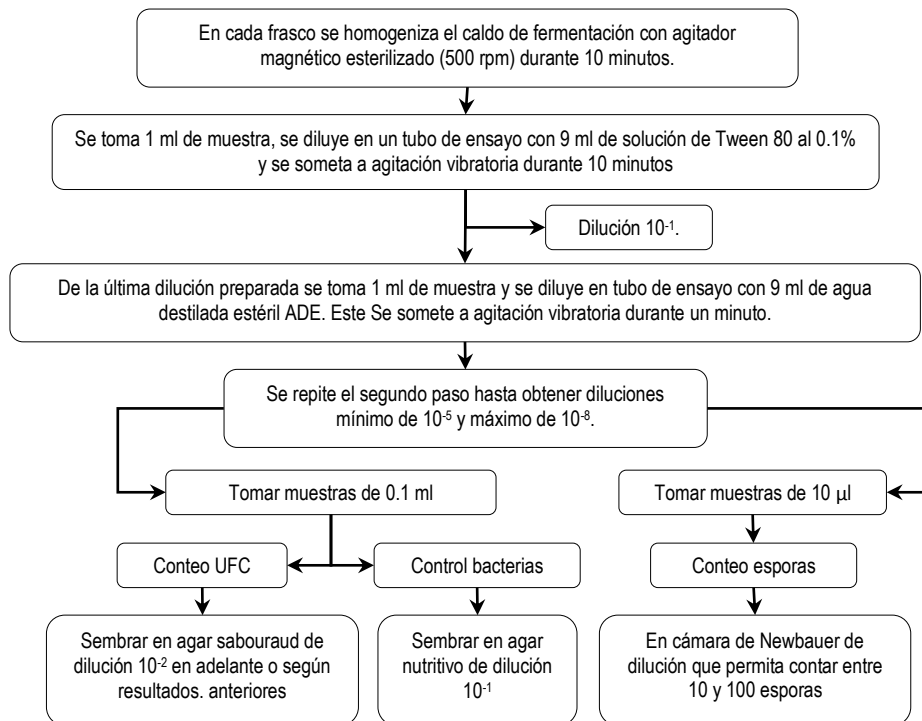


Figura 16: Procedimiento para obtención de UFC y conteo de esporas

Primero el caldo de fermentación de cada frasco se mezcla de manera intensa con agitador magnético durante 10 minutos, tiempo suficiente para verificar la destrucción del pellet y la homogeneización del contenido. Luego de esto, se toma un mililitro del caldo de fermentación con micropipeta y se deposita en un tubo de ensayo con 9 mililitros de solución de tween 80 al 0.1%. Esta solución se somete a agitación vibratoria intensa durante 10 minutos para lograr el desprendimiento de las esporas. De esta solución se prepararan diluciones decimales seriadas hasta concentraciones de entre 10^{-6} y 10^{-8} . De las diluciones se toman muestras de 0.1 ml para realizar siembras sobre agar sabouraud y sobre agar nutritivo. Las siembras en agar sabouraud se utilizan para las lecturas de UFC, las de agar nutritivo para control de contaminación bacteriana. Para el caso de los cultivos con especies puras luego de haber realizado las siembras en agar sauboraud, se toman muestras de las diluciones decimales para realizar conteos en cámara de Newbauer y determinar la concentración de esporas. Como se mencionó anteriormente, el conteo de esporas se obvia en el caso de la mezcla microbiana por la dificultad en la distinción de las esporas de las diferentes especies.

El procedimiento descrito se realizó durante siete u ocho días. Para los cultivos con especies puras, se dejaron dos frascos como muestras de control cuya concentración de esporas y de UFC, se evaluó entre 13 y 18 días después. Los frascos adicionales inoculados se mantuvieron para respaldo ante alguna contingencia. Las

siembras en agar nutritivo y sauboraud se examinaron diariamente para realización de los conteos respectivos. Día de por medio se realizaron controles ambientales de contaminación dejando placas de agar sauboraud abiertas durante los procedimientos.

4.4.7. CONTROL DE CONTAMINACIÓN

Para la barrera de contaminación con ácido láctico a 40 ml de ARI, se adicionó un mililitro de una solución de ácido láctico al 86% (v/v). En la segunda barrera el ARI fue sometido a un proceso de esterilización en autoclave horizontal, a una presión de 15 psi, durante 30 o 40 minutos.

4.4.8. DETERMINACIÓN DE UFC Y ESPORAS EN LA FASE 2.

En la fase 2, únicamente se trabajó con 2 frascos con 40 ml de medio para cada uno de los experimentos requeridos, según el procedimiento secuencial de la Figura 13. Al cabo del tiempo de fermentación definido, se tomaron muestras de los dos frascos y se realizaron siembras en agar sauboraud y nutritivo para determinación de UFC y contaminantes respectivamente.

4.5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las dos fases experimentales. Las tablas con los datos para la elaboración de las gráficas 17 a 22 se presentan en el Anexo II.

4.5.1. RESULTADOS FASE 1: CULTIVOS EN MEDIO LÍQUIDO INDUSTRIAL (MLI)

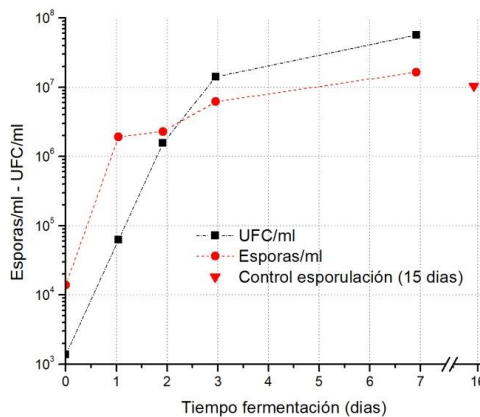


Figura 17: Curva de concentración de UFC y esporas para *B. bassiana*

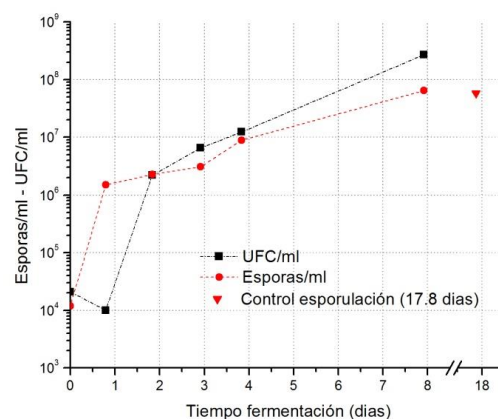


Figura 18: Curva de concentración de UFC y esporas para *P. lilacinus*

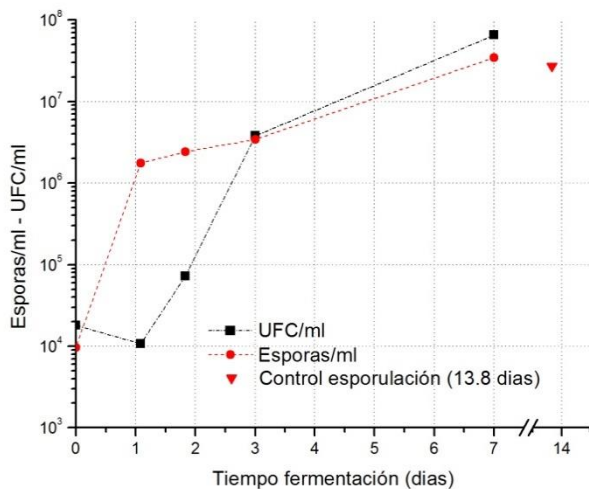


Figura 19: Curva de concentración de UFC y esporas para *T. harzanium*

Las Figuras 17 a 19 presentan los resultados de la fase 1 para las especies cultivadas individualmente. En ellas aparecen simultáneamente las medidas de UFC y de concentración de esporas, además de un punto de control de esporulación tomado entre 13 y 18 días después de iniciada la fermentación.

En las Figuras 17 y 18 correspondientes a *B. bassiana* y *P. lilacinus* respectivamente, las gráficas de concentración de UFC, se mantienen por debajo de la gráfica de concentración esporas durante los primeros dos días. Esto implica que al inicio de la fermentación la concentración de UFC es inferior a la concentración de esporas. Para *T. harzanium* el comportamiento es el mismo, pero se extiende hasta el tercer día.

Luego del tercer día el comportamiento se invierte en todas las especies y la concentración de UFC sobrepasa la concentración de esporas.

En todas las curvas de concentración de UFC y de esporas, las secciones con pendientes más elevadas se presentan entre el primer y el tercer día. A partir de este momento las curvas empiezan a acercarse a distinta medida a una línea horizontal, lo que implica una desaceleración en la producción de esporas y de UFC.

Para cada especie se realizó un control de concentración de esporas, que se midió entre 13 y 18 días después de iniciada la fermentación. En ningún caso dicha concentración tuvo un orden de magnitud mayor al de las concentraciones medidas entre los días 6 y 8.

La curva de concentración de UFC de la especie *B. bassiana*, entra en el orden de magnitud de 10⁷ el tercer día y se mantiene allí los siguientes cuatro días de la fermentación. En el caso de *P. lilacinus*, la curva de concentración de UFC entra en el orden de 10⁷ el cuarto día, y aumenta de orden cuatro días después. Para *T. harzanium* se entra en el orden de 10⁶ el tercer día y se mantiene en 10⁷ hasta el final del período de fermentación.

La máxima concentración de UFC que se alcanza en las especies *B. bassiana* y *T. harzanium* luego de una semana de fermentación tiene un orden de magnitud de 10⁷ UFC/ml. En el caso de *P. lilacinus* la máxima concentración alcanzada tiene un orden de 10⁸ UFC/ml.

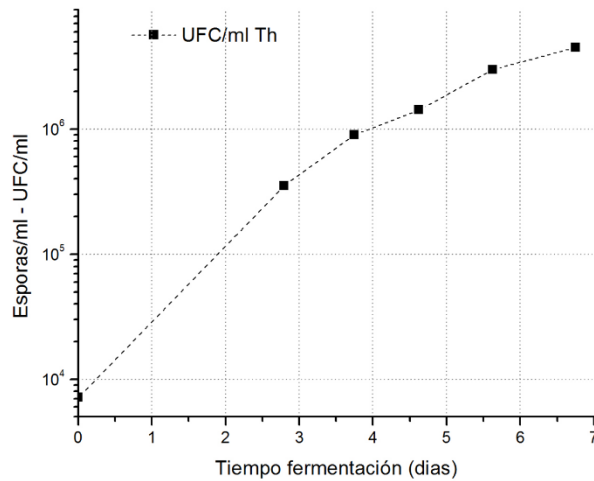


Figura 20: Curva de *T. harzanium* cuando se inoculó simultáneamente con *P. lilacinus* y *B. bassiana*

En los conteos de UFC del cultivo en el que se inocularon simultáneamente *P. lilacinus*, *B. bassiana* y *T. harzanium*, solo se obtuvieron colonias de esta última especie, que presentó la curva de concentración de UFC mostrada en la Figura 20. El orden de magnitud de concentración de *T. harzanium* luego de 7 días de fermentación fue de 10^6 UFC/ml.

4.5.2. CONCLUSIONES FASE 1

Las esporas solo son una fracción de las estructuras reproductivas que se pueden obtener en el medio líquido. Esto se deriva del hecho que al final de las fermentaciones la concentración de UFC, siempre fue mayor a la de esporas.

Las esporas de las especies cultivadas requieren de un tiempo entre dos y tres días para ser viables en el agar, ya que durante los primeros días la concentración de esporas fue mayor a la de UFC.

En todas las especies las máximas concentraciones de esporas estuvieron en el orden de 10^7 esporas/ml.

En términos de concentración de esporas, no tiene sentido aumentar el tiempo de fermentación por encima de 8 días, ya que como se vio en los controles de esporulación entre 10 a 15 días, mayores tiempos no implicaron un aumento en la concentración de esporas.

T. harzanium fue dominante en el medio líquido y debido a su alta tasa metabólica impidió el desarrollo de las demás especies. Por esto, en la siguiente fase, no se realizan ensayos inoculando simultáneamente las tres especies de hongos.

Cuando se inocularon simultáneamente las tres especies no se evidenciaron efectos sinérgicos, en términos de un aumento de la concentración de UFC, ya que ésta disminuyó en un orden de magnitud, con respecto a los cultivos en los se inoculó *T. harzanium* puro.

4.5.3. RESULTADOS FASE 2: FERMENTACIONES EN AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

La Figura 21 resume los resultados de los cultivos en agua residual industrial (ARI) y de agua residual industrial con 2% de ácido láctico en porcentaje volumétrico (ARI + AA). El tiempo de fermentación total fue de 10 días.

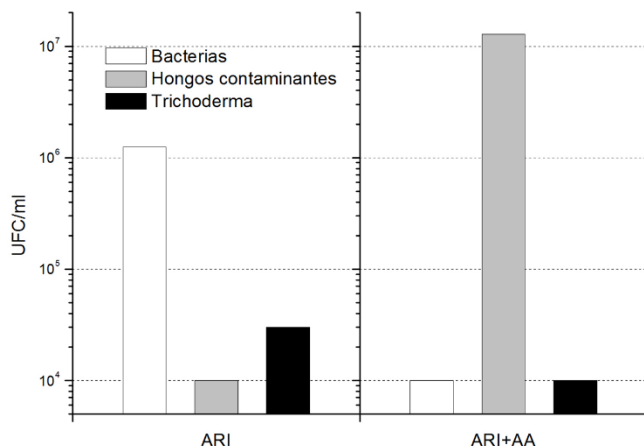


Figura 21: Resumen resultados en cultivos sobre ARI sin esterilizar

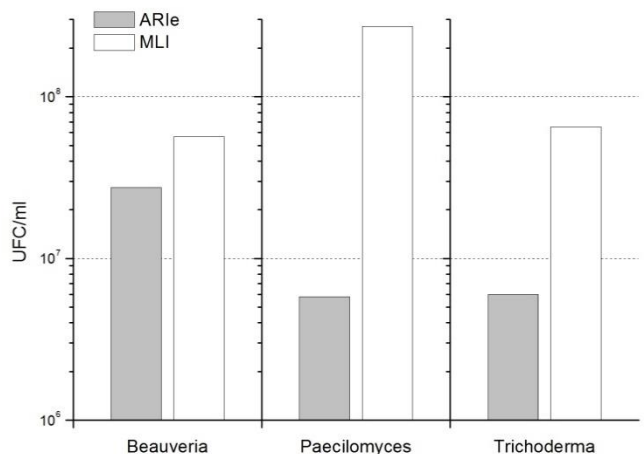


Figura 22: Resultados en ARI esterilizada y MLI

Tanto en el caso del ARI, como en el del ARI+AA se presentaron bacterias, hongos contaminantes y *T. harzanium*. La población de bacterias tiene la mayor concentración en el cultivo que utiliza como medio ARI sin ningún tipo de control de contaminación, y alcanza un orden de magnitud de 10⁶ UFC/ml. En el cultivo al que se adicionó el ácido láctico, la población de bacterias es moderada y la población de hongos contaminantes es alta. En el caso de los hongos contaminantes la concentración de UFC supera en más de tres órdenes de magnitud a la concentración obtenida en el ARI sin ácido láctico. El orden de magnitud de la concentración de UFC de *T. harzanium*, se mantuvo entre 10⁴ UFC/ml y 10⁵ UFC/ml en los dos medios.

La Figura 22, presenta los resultados obtenidos en agua residual industrial esterilizada (ARle), cuando se realizaron cultivos individuales de cada especie. El tiempo de fermentación fue de ocho días. Se incluyen los

resultados de máxima concentración de UFC obtenidos en el medio líquido industrial (MLI) para efectos comparativos.

Para todas las especies, la concentración de UFC/ml obtenida en el ARI, estuvo por debajo de la obtenida en el MLI. En la especie *B. bassiana*, en los dos medios se mantiene el mismo orden de magnitud de 10^7 UFC/ml. En *T. harzanium* la concentración de UFC obtenida en el ARI disminuye en un orden de magnitud respecto al MLI, y en caso de *P. lilacinus* disminuye dos órdenes de magnitud.

4.5.4. CONCLUSIONES FASE 2

Desde el punto de vista técnico es viable utilizar el ARI esterilizada como sustrato para cultivos individuales de *B. bassiana*, *T. harzanium* y *P. lilacinus* ya que la concentración de UFC/ml no estuvo muy lejana de la alcanzada en el medio líquido industrial (MLI). La opción más prometedora corresponde al cultivo de *B. bassiana*, donde la concentración de UFC se mantuvo en el mismo orden de magnitud del MLI. Le siguen en su orden, el cultivo de *T. harzanium* y el de *P. lilacinus*, donde la concentración de UFC estuvo respectivamente uno y dos órdenes por debajo de la obtenida en el MLI.

Es inviable usar ARI sin esterilizar como sustrato para la producción de los agentes de control biológico propuestos debido a los altos niveles de contaminación y la moderada concentración de UFC que alcanzó la especie *T. harzanium*.

El ácido láctico controla parcialmente la población bacteriana en el agua residual industrial. Desafortunadamente, la situación es aprovechada por hongos contaminantes que relegan el desarrollo de la especie *T. harzanium*.

4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

4.6.1. ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO

La viabilidad técnica del cultivo de las especies *T. harzanium*, *B. bassiana* y *P. lilacinus* en el agua residual da pie a un estudio que permita estimar su importancia económica para la empresa. En este sentido se consideraron dos alternativas de aprovechamiento:

- Integración de la biomasa obtenida dentro del proceso convencional de la empresa.
- Elaboración de un nuevo producto comercial.

Para comparar las dos opciones se hizo un análisis simple en el que se determinan los ahorros que se lograrían para la empresa a través de la primera alternativa y los ingresos que generaría la comercialización de un concentrado líquido o pasta gracias a la implementación de la segunda alternativa.

Para establecer el volumen de agua residual aprovechada, se tuvo en cuenta que el procedimiento de lavado generador del vertimiento se realiza generalmente tres veces por semana, y en cada lavado se recogen aproximadamente 40 litros de agua residual. Redondeando se consideró un volumen mensual de 500 litros de agua residual industrial para aprovechar.

Alternativa 1: Aprovechamiento de la biomasa obtenida en el agua residual como inóculo para el sustrato sólido.

Los resultados de concentración de unidades formadoras de colonia para las tres especies en el agua residual, permiten que el caldo de fermentación sea utilizado directamente como inóculo del sustrato sólido que se

emplea para la elaboración de los productos en polvo que fabrica la empresa. En este caso el agua residual industrial del proceso de molido sustituiría el medio líquido industrial.

Con esta estrategia la empresa lograría ahorros en los costos de materias primas introduciendo un solo cambio en el proceso convencional de producción que se presentó en el capítulo 3. El cambio consiste en sustituir el medio líquido industrial por el agua residual recogida.

Alternativa 2: Valorización de la biomasa obtenida en el agua residual industrial para formular un nuevo producto comercial.

Esta alternativa implica la elaboración de un producto comercializable para control biológico cuyo componente activo corresponde a las estructuras viables del hongo cultivado en el agua residual industrial. De nuevo los resultados de la concentración de unidades formadoras de colonia demuestran que el agua residual permite la obtención de una cantidad importante de estructuras viables, sin embargo la biomasa obtenida debe tratarse de manera que la viabilidad no se comprometa durante los periodos de distribución, almacenamiento y venta del producto antes de su uso final.

La formulación de un agente de control a partir de un cultivo en fase líquida requiere de al menos tres procedimientos, el primero es la concentración de la biomasa, el segundo es la adición de suplementos nutritivos y finalmente la disminución de la actividad metabólica del microorganismo. Esto se realiza con el objetivo de aumentar la vida de anaquel del producto y para disminuir costos de almacenamiento y empaque.

El procedimiento para la formulación de agentes de control en pasta se describe a continuación:

- Filtración mecánica del caldo de fermentación para separar la mayor parte del agua libre y formar una pasta que contiene la biomasa con todas sus estructuras reproductivas. La filtración reduce el volumen inicial del caldo de fermentación alrededor de un 60% y deja una pasta con un contenido de humedad libre cercano al 20%.
- Adición de almidón como fuente nutritiva para asegurar la supervivencia del microorganismo durante el almacenamiento. La concentración recomendada de almidón es del 5% en masa.
- Disminución del pH con ácido clorhídrico para reducir la actividad metabólica del microorganismo durante el almacenamiento. De esta forma se optimiza el consumo de nutrientes, se minimiza la producción de desechos metabólicos y se aumenta la vida útil del producto. El pH inicial del caldo de fermentación oscila entre 6 y 7 unidades; para la reducción de la actividad metabólica se recomienda un valor de 3.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea el esquema de producción que se presenta en la Figura 23.

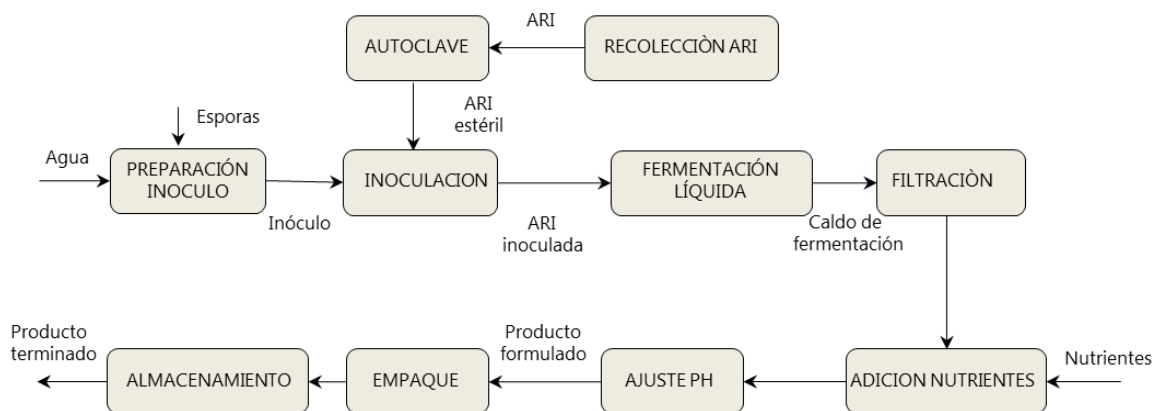


Figura 23: Diagrama de flujo para valorización de la corriente de agua residual

4.6.2. ANÁLISIS ECONÓMICO ALTERNATIVA 1

Únicamente se calculan los ahorros en materia prima y los ahorros en costos de vertimientos. Lo anterior es posible ya que el único cambio respecto al proceso convencional es la eliminación del consumo de materias primas debido a la sustitución del paso de preparación del medio líquido por el de recolección de ARI. Dado que los dos pasos implican el trabajo de un operario por un periodo de tiempo idéntico, no se requieren cambios en los costos de producción.

Ahorros en materia prima (Medio líquido industrial)

El cálculo se realiza con una base de 500 litros de ARI recolectada mensualmente, que equivale a un ahorro de 500 litros de medio líquido industrial. El precio de un litro de medio líquido industrial fue suministrado por la empresa y es de 391 COP. El costo anual se calcula asumiendo operación continua durante todo el año (ver Tabla 45).

Tabla 45: Ahorro en materias primas

Ítem	Mensual	Anual
Volumen de ARI utilizada (L)	500	6 000
Ahorros en materia prima (COP)	195 500	2'346 000

Ahorros en costos de vertimientos

Ya que la totalidad del agua recuperada se integra al proceso sin que se genere una nueva corriente de agua residual, el ahorro en el costo de vertimiento se equipara con el ahorro en pagos de tasa retributiva a la autoridad ambiental debido a vertimientos puntuales sin tratamiento.

Para el cálculo de la tasa retributiva se sigue el procedimiento establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través del decreto 2667 de 2012. En él se toman como parámetros objeto de cobro la demanda biológica de oxígeno (DBO5) y los sólidos suspendidos totales (SST) del vertimiento ya que hasta el momento las autoridades ambientales no han definido los montos mínimos para otros parámetros. La tarifa de cobro para cada uno de estos, se toma como igual a la tarifa mínima fijada para el año 2014 [114]. El monto total a pagar por período se obtiene de la siguiente ecuación [115].

$$MP = \sum_i^n Tm_i \times C_i \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

MP: Monto total a pagar en el periodo

Tm_i: Tarifa mínima para el parámetro *i*

C_i: Carga contaminante del parámetro *i* vertida durante el periodo de cobro en kilogramos.

La Tabla 46 muestra los datos para el cálculo del monto total de la tasa retributiva. La carga mensual se calcula como los kilogramos de contaminante *i*, presentes en 500 litros de ARI.

Tabla 46: Datos tasa retributiva para DBO y SST

Descripción	DBO	SST
Tarifa mínima [114]	118,53	50,72
Concentración promedio en el ARI (mg/L)	2 036,25	3 930
Carga Mensual (kg)	1,018125	1,965
Carga Anual (kg)	12,2175	23,58

De la ecuación anterior y con los datos de la Tabla 46:

$$MP = \left(\frac{118,53 \text{ COP}}{\text{kgDBO5}} \right) \times \left(\frac{12,22 \text{ kgDBO5}}{\text{año}} \right) + \left(\frac{50,72 \text{ COP}}{\text{kgSST}} \right) \times \left(\frac{23,58 \text{ kgSST}}{\text{año}} \right)$$

$$MP = 2\,644,12 \text{ COP/año}$$

Ahorro total

$$\text{Ahorro total anual} = \text{Ahorro materias primas} + \text{Ahorro tasa retributiva}$$

$$\text{Ahorro total anual} = \text{Ahorro materias primas} + MP$$

$$\text{Ahorro total anual} = 2'346\,000 \text{ COP/año} + 2\,644,12 \text{ COP/año}$$

$$\text{Ahorro total anual} = 2'348\,644 \text{ COP/año}$$

4.6.3. ANÁLISIS ECONÓMICO ALTERNATIVA 2

En este caso solo se tienen en cuenta los ingresos esperados, derivados de la venta del nuevo producto y se descartan los ahorros en tasa retributiva por el bajo valor obtenido en el análisis anterior. Los ingresos se calculan como la diferencia entre el precio de venta del producto menos los costos de producción. El precio de venta se establece en dos escenarios: Para un margen de utilidad del 20% de los costos totales del producto, y como la diferencia entre el precio de venta de productos similares en el mercado y el costo total del producto.

De nuevo se toma una base de cálculo de 500 litros de agua residual por mes. Esta cantidad de agua residual permite la obtención de 180 litros de pasta para la venta, teniendo en cuenta una relación volumen inicial a volumen caldo de fermentación del 90% y la extracción de agua en la etapa de filtración (60% del volumen del caldo de fermentación).

El número de unidades producidas por mes se estima en 180 bolsas, para presentación de 1 litro.

A pesar de que el servicio eléctrico es gratuito, la empresa incluye el ítem en los costos de fabricación de todos sus productos. Los costos unitarios de mano de obra y de servicios se presentan en la Tabla 47. Las tarifas corresponden a servicios públicos de tipo industrial para el municipio de Chinchiná en el período 2014.

Tabla 47: Costos unitarios laborales y de servicios

Costos unitarios (COP)	
Hora Laboral operario SMT	2 866
m ³ de agua	1 730
kW-h de energía	393

Costos de producción

Corresponden a los costos de mano de obra, aditivos, insumos y servicios. Las Tablas 48 a 53 presentan los cálculos para un periodo base de un mes.

Tabla 48: Costos de mano de obra

Mano de obra		
Actividad operario	Hora/mes	(COP)/mes
Autoclavado	24	69 264
Recolección ARI	12	34 632
Inoculación ARI	2,5	7 215
Filtración	2,5	7 215
Formulación	6	17 316
Empacado	3,5	10 101
Embalaje	2,5	7 215
Limpieza y Desinfección	4,5	12 987
SUBTOTAL		165 945

Tabla 49: Costos de aditivos

Aditivos				
Descripción	Unidad	(COP)/Unidad	Unidades/mes	(COP)/mes
Ácido Clorhídrico	L	27 600	0,5	13 800
Almidón	Kg	1 723	10	17 230
SUBTOTAL				31 030

Tabla 50: Costos de insumos

Insumos				
Descripción	Unidad	(COP)/Unidad	Unidades/mes	(COP)/mes
Bolsa envase	Unidad	358,4	180	64 512
Hipoclorito	Galón	11 000	0,3	3 300
Desinfectante	Galón	30 000	0,3	9 000
Detergente	3 kg	13 500	0,2	2 700
SUBTOTAL				79 512

Tabla 51: Costo servicio de agua

Servicio de agua		
Detalle uso	m ³ /mes	(COP)/mes
Autoclave	2,2	3 806

Limpieza y Desinfección	1,8	3 114
SUBTOTAL		6 920

Tabla 52: Costos servicio eléctrico

Servicio eléctrico		
Detalle uso	kW/mes	(COP)/mes
Iluminación	2,16	848,8
Autoclave	7 656	3'008 808
Agitador Orbital	125,44	49 297,9
Selladora	0,9	353,7
SUBTOTAL		3'059 308

Tabla 53: Costos de producción

Detalle	(COP)/mes
Mano de obra	165 945
Aditivos	31 030
Insumos	79 512
Servicio de agua	6 920
Servicio eléctrico	3'059 308
TOTAL	3'342 716

Costos de administración

Incluye los salarios de personal administrativo y jefe de producción. Según los datos suministrados por la empresa este rubro es del 23% de los costos de producción.

Costos de ventas

Incluye costos de almacenamiento, distribución y mercadeo. Se estiman en un 20% de los costos de producción.

Costo total del producto

Corresponde a la sumatoria de los costos de producción, administrativos y de ventas. El costo unitario del producto se obtiene de dividir el costo total mensual entre el número de unidades producidas (180 por mes). La Tabla 54 resume los ítems correspondientes al costo total del producto.

Tabla 54: Costos totales

Costo total del producto (COP/mes)	
Costo total de producción	3'342 716
Costos de administración	768 824
Costos de ventas	601 688
TOTAL MENSUAL	4'713 229
COSTO DE PRODUCTO POR LITRO	26 186 COP/Litro

Ingresos esperados por venta del producto.

En el mercado colombiano se encontraron algunos agentes de control biológico formulados en fase líquida. Uno de los más parecidos al producto que se propone elaborar en este estudio tiene un precio de venta de 55 000 pesos. La Tabla 55 presenta los ingresos estimados en los dos escenarios previstos.

Tabla 55: Ingresos esperados por venta del producto

Escenario 1	(COP)	Escenario 2	(COP)
Precio de venta con utilidad del 20 %	31 423	Precio de venta basado en la competencia	55 000
Ganancia unitaria (por litro)	5 237	Ganancia unitaria (por litro)	28 814
Ganancia mensual	924 660	Ganancia mensual	5'186 520
Ganancia anual	1'131 192	Ganancia anual	62'238 240

4.6.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Figura 24 presenta los resultados del análisis económico. Para comparar los resultados, el ahorro de la alternativa 1 se equiparó a una ganancia. Los resultados de la segunda alternativa incluyen los dos escenarios.

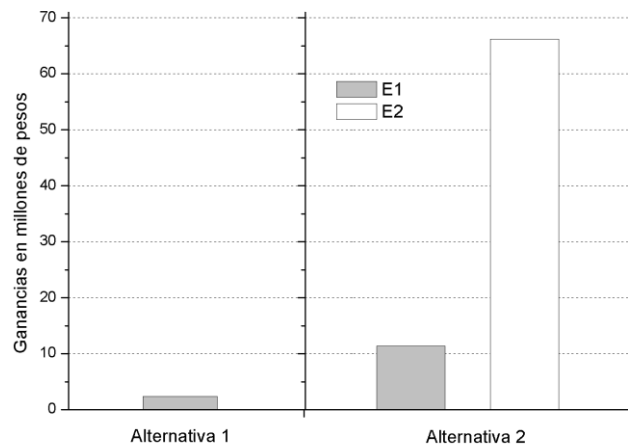


Figura 24: Resultados análisis económico (E1: Escenario 1; E2: Escenario 2)

La diferencia entre las dos alternativas se debe a que los ahorros de materias primas en la primera alternativa son menores en comparación con la ganancia calculada sobre el costo total de fabricación para la alternativa 2.

Desde el punto de vista económico todas las opciones son viables para la empresa. La alternativa 1, en la que el ARI sustituye las materias primas, presenta el beneficio económico más bajo, pero puede ser fácilmente implementada pues el estudio confirmó la presencia de estructuras miceliales que colonizan fácilmente el sustrato sólido, y no se requieren cambios significativos en el proceso.

La alternativa 2 en la que se aprovechan parte de las aguas residuales del proceso en la elaboración de un biocontrolador semi-líquido o en pasta, es bastante atractiva. Desde lo económico, el impacto de una ganancia potencial de 62 millones de pesos anuales es significativa para una empresa del tipo y del tamaño considerado

en este estudio. Desde lo competitivo, la alternativa 2 ofrece ventajas derivadas de la diversificación en la oferta de productos de la empresa como el acceso a otros clientes y mercados con demanda del nuevo producto.

4.7. REFERENCIAS

- [76] C. Starr and Ralph Taggart, *Biología 2. La unidad y diversidad de la vida*, 10th ed. México: Thomson Editores, 2004, p. 345.
- [77] M. Madigan, J. Martinko, and J. Parker, Brock. *Biología de los microorganismos*, 10th ed. Madrid: Pearson, Prentice Hall, 2003, p. 1089.
- [78] H. Curtis, S. Barnes, A. Schnek, and A. Massarini, *Biología*, 7th ed. Buenos Aires: Medica Panamericana, 2008, p. 1160.
- [79] D. S. Clark and H. W. Blanch, *Biochemical Engineering*, 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 1997, p. 702.
- [80] T. M. Butt, C. W. Jackson, and N. Magan, *Fungi as biocontrol agents*, 4th ed. Wallingford - Oxfordshire: CABI Publishing, 2001, p. 390.
- [81] B. Jin, X. Q. Yan, Q. Yu, and J. H. Van Leeuwen, "A comprehensive pilot plant system for fungal biomass protein production and wastewater reclamation," *Adv. Environ. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 179–180, 2002.
- [82] M. Verma, S. K. Brar, R. D. Tyagi, R. Y. Surampalli, and J. R. Valéro, "Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: Panoply of biological control," *Biochem. Eng. J.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–20, Oct. 2007.
- [83] E. Contreras, "Growth kinetics of the filamentous microorganism *Sphaerotilus natans* in a model system of a food industry wastewater," *Water Res.*, vol. 34, no. 18, pp. 4455–4463, Dec. 2000.
- [84] M. Lotz, R. Fröhlich, R. Matthes, K. Schügerl, and M. Seekamp, "Bakers' yeast cultivation on by-products and wastes of potato and wheat starch production on a laboratory and pilot-plant scale," *Process Biochem.*, vol. 26, no. 5, pp. 301–311, 1991.
- [85] D. L. Kirchman, *Processes in Microbial Ecology*. New York: Oxford University Press, 2012, p. 312.
- [86] J. Moulijn and A. Stankiewicz, *Re-Engineering the Chemical Processing Plant: Process Intensification*. New York: CRC Press, 2003, p. 368.
- [87] R. Van Drieshe and R. Reardon, *Control de plagas y malezas por enemigos naturales*. Washington, D.C.: Forest Health Technology Enterprise Team, 2007, p. 765.
- [88] M. A. Jackson, S. Cliquet, and L. B. Iten, "Media and Fermentation Processes for the Rapid Production of High Concentrations of Stable Blastospores of the Bioinsecticidal Fungus *Paecilomyces fumosoroseus*," *Biocontrol Sci. Technol.*, vol. 3157, pp. 23–33, 2003.
- [89] K. Sahayaraj and S. K. R. Namasivayam, "Mass production of entomopathogenic fungi using agricultural products and by products," *African J. Biotechnol.*, vol. 7, no. 12, pp. 1907–1910, 2008.
- [90] F. E. Vega, M. A. Jackson, G. Mercadier, and T. J. Poprawski, "The impact of nutrition on spore yields for various fungal entomopathogens in liquid culture," *J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 19, no. 4, pp. 363–368, 2003.
- [91] L. Gao, M. H. Sun, X. Z. Liu, and Y. S. Che, "Effects of carbon concentration and carbon to nitrogen ratio on the growth and sporulation of several biocontrol fungi.," *Mycol. Res.*, vol. 111, no. Pt 1, pp. 87–92, Jan. 2007.
- [92] L. C. Cruz, "Estandarización del proceso de producción masiva del hongo *Trichoderma Koningii* Th003 mediante fermentación bifásica a escala piloto," Pontificia Universidad Javeriana, 2007.

- [93] R. Lejune, J. Nielsen, and G. V. Baron, "Influence of pH on the morphology of *Trichoderma Reesei* QM 9414 in submerged culture," vol. 17, no. 3, pp. 341–344, 1995.
- [94] H. I. Al-taweil, M. Bin Osman, and U. K. M. Bangi, "Optimizing of *Trichoderma viride* Cultivation in Submerged State Fermentation Aidil," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 7, pp. 1277–1281, 2009.
- [95] D. J. Rayati, N. Aryantha, and P. Arbianto, "The optimization of nutrient factors in spore production of *Paecilomyces fumosoroseus*," in Fifth symposium on Agri-Bioche, 2001, pp. 1–7.
- [96] M. G. Feng, T. J. Poprawski, and G. G. Khachatourians, "Production, formulation and application of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* for insect control: current status," *Biocontrol Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 3–34, Jan. 1994.
- [97] X. Jin, G. Taylor, and E. Harman, "Development of Media and Automated Liquid Fermentation Methods to Produce Desiccation-Tolerant Propagules of *Trichoderma harzianum*," *Biological Control*, vol. 7, no. 3, pp. 267–274, 1996.
- [98] O. F. Vega, "Microorganismos antagonistas para el control fitosanitario," *Manejo Integr. Plagas*, no. 62, pp. 96–100, 2001.
- [99] M. J. Bidochka, T. a Pfeifer, and G. G. Khachatourians, "Development of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* in liquid cultures," *Mycopathologia*, vol. 99, no. 2, pp. 77–83, Aug. 1987.
- [100] M. Torre and H. Cárdenas, "Production of *Paecilomyces fumosoroseus* conidia in submerged culture," *Entomophaga*, vol. 41, no. 3, pp. 443–453, 1996.
- [101] S. Cliquet and M. Jackson, "Influence of culture conditions on production and freeze-drying tolerance of *Paecilomyces fumosoroseus* blastospores.," *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 23, no. 2, pp. 97–102, Aug. 1999.
- [102] G. J. Tortora, B. R. Funke, and C. L. Case, *Introducción a la microbiología*, 9th ed. Buenos Aires: Ed. Médica Panamericana, 2007, p. 959.
- [103] C. G. I. L.-G. R. Díaz, *Manual práctico de microbiología*. Elsevier España, 2005, p. 231.
- [104] S. R. Gliessman, *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Costa Rica: CATIE, 2002, p. 359.
- [105] R. Croshier, G. Montecinos, M. Jimenez, and P. Gallo, "Efectividad de *Paecilomyces lilacinus* Thom . Samson , en el control del nemátodo cecidógeno," *IDESIA*, vol. 8, pp. 27 – 31, 1984.
- [106] O. Elósegui, C. Nieves, R. Díaz, B. P. Noris, and A. Carr, "Comportamiento del hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* (BALS.) VUILL. cepa LBB-1 en Agar Sabouraud Dextrosa producido en Cuba," *Sabouraudia*, vol. 7, no. 2, pp. 49 – 53, 2003.
- [107] J. Jacas, P. Caballero, and J. Avila, *El control biológico de enfermedades y plagas*, 5th ed. Navarra: Universitat Jaume Publicaciones, 2005, p. 225.
- [108] R. Garcia, J. Salas, R. Riera, C. Zambrano, A. Maggiorani, and A. Garcia, "Uso del antagonista *Trichoderma harzianum* para controlar tres enfermedades fungosas del suelo," *INIA Divulg.*, vol. 4, pp. 8–14, 2005.
- [109] C. Altomare, W. A. Norvell, T. Björkman, and G. E. Harman, "Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus," *Appl. Environ. Microb.*, vol. 65, no. 7, pp. 2926–2933, 1999.
- [110] J. Hinojosa, N. Valero, and M. Lauris, "*Trichoderma harzianum* como promotor del crecimiento vegetal del maracuyá," *Agron. Colomb.*, vol. 27, no. 1, pp. 81 – 86, 2009.

- [111] D. Vera, H. Pérez, and H. Valencia, "Aislamiento de hongos solubilizadores de fosfatos de la rizosfera del arazá," *Acta Biol. Colomb.*, vol. 7, pp. 33 – 40, 2002.
- [112] C. R. Howell, "Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: The history and evolution of current concepts," *Plant Dis.*, vol. 87, pp. 4 – 10, 2003.
- [113] R. Belanger, N. Dufour, J. Caron, and B. N., "Chronological events associated with the antagonistic properties of *Trichoderma harzanium* against *Botrytis cinerea*: indirect evidence for sequential role of antibiotics and parasitism," *Biocontrol Sci. Technol.*, vol. 5, pp. 41 – 54, 1995.
- [114] Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena, Resolución 016. Neiva: "Por medio de la cual se fija la tarifa mínima de la tasa retributiva T_m en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) para la vigencia 2014," 2014, pp. 1–2.
- [115] Ministerio del Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Sostenible, Decreto 2667. Bogotá: "Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones", 2012, p. 15

CONCLUSIONES GENERALES

Se elaboró una metodología general para plantear propuestas de manejo integral de agua en MIPYMES del sector agroindustrial. La metodología atiende a las restricciones identificadas en el sector, recoge varias estrategias para lograr múltiples objetivos del manejo integral del agua e incluye un método sencillo para la formulación de alternativas de redes integradas de manejo de agua que buscan minimizar su consumo y disminuir los vertimientos. La metodología se aplicó exitosamente en el caso de estudio, ya que la propuesta de manejo integral de agua obtenida está acorde a los objetivos de calidad de la empresa, permite el cumplimiento de la normatividad ambiental, plantea el reciclaje de corrientes de agua, el aprovechamiento de aguas residuales, y la reducción del consumo de agua fresca y los vertimientos.

La metodología propuesta para evaluación de alternativas pudo adaptarse sencilla y satisfactoriamente a diferentes intereses y restricciones encontrados en la microempresa del caso de estudio. Esto la convierte en una valiosa herramienta para el proceso de toma de decisiones relacionadas a alternativas del manejo del agua en el sector MIPYME agroindustrial.

Las guías para el proceso de diagnóstico demostraron ser útiles para la elaboración de la propuesta de manejo integral de agua en la empresa del caso de estudio. Permitieron identificar la información necesaria de una manera rápida, y organizar los datos para facilitar el proceso de formulación, evaluación y selección de alternativas en cada una de las áreas relacionadas al manejo del agua.

Desde el punto de vista técnico es viable la producción de agentes de control biológico con las aguas residuales industriales utilizadas. La especie *Beauveria bassiana* mostró el mejor comportamiento ya que la concentración de unidades formadoras de colonia se mantuvo en el mismo orden de magnitud presentado en el cultivo realizado en medio líquido industrial. Las especies *Trichoderma harzanium* y *Paecilomyces lilacinus* estuvieron uno y dos órdenes de magnitud por debajo, pero igual proliferaron en el agua residual y presentaron una concentración importante de estructuras reproductivas. Todos estos resultados indican la alta adaptabilidad de estas especies a condiciones de crecimiento diversas, como las impuestas por el agua residual utilizada.

Desde el punto de vista económico es de interés aprovechar las aguas residuales industriales utilizadas, bien sea como un sustituto de materias primas, o para la elaboración de un producto de valor agregado. La alternativa más directa corresponde a la sustitución de la materia prima por agua residual, pero si se quieren aumentar los beneficios económicos, la mejor de las opciones consideradas es la elaboración de una pasta de producto mezclado para su comercialización. En este caso el precio final de venta deberá atender a estudios de mercado. En cualquier caso se requieren investigaciones adicionales que aseguren la calidad de los productos obtenidos a través del aprovechamiento del agua residual, y que permitan calcular con mayor precisión los beneficios económicos.

PERSPECTIVAS

Pueden proponerse nuevos trabajos con el sector MIPYME agroindustrial donde se implemente la metodología desarrollada, para elaborar propuestas de manejo integral de agua, que incluyan el aprovechamiento y valorización de corrientes como un atractivo adicional para fomentar la cultura de la preservación del recurso hídricos en el sector.

Trabajos posteriores deberán enfocarse en la comparación entre el producto final obtenido mediante el proceso de fermentación bi-fásica en el que el sustrato sólido se inocula con el caldo de fermentación obtenido en medio líquido industrial, y el caldo de fermentación obtenido en el agua residual. De esta manera es posible determinar desventajas o ventajas adicionales en la implementación de la alternativa de aprovechamiento en la que el agua residual sustituye las materias primas.

En futuras investigaciones es importante adelantar estudios de infectividad y de estabilidad del producto en pasta propuesto para el aprovechamiento del agua residual. De esta manera pueden determinarse aspectos importantes de calidad relacionados con el precio, como la vida de anaquel y la efectividad en campo. Otras investigaciones pueden desarrollarse ensayando alternativas de estabilización que puedan resultar atractivas desde lo económico o por la buena calidad del producto obtenido.

Los resultados favorables con el agua residual de la empresa y la adaptabilidad de las especies utilizadas, abren el campo para el aprovechamiento de corrientes de agua residual de otras industrias de la región, de manera que sustituyan las materias primas convencionales utilizadas en la producción de agentes de control biológico.

El desarrollo de *Trichoderma harzanium* en el agua residual sin esterilizar plantea un escenario interesante para su crecimiento en vertimientos que sean aprovechadas en riego de cultivos. En este caso el agua podría servir como medio para el desarrollo de estructuras miceliales de alta capacidad de colonización, y como medio para su dispersión en campo. Las principales ventajas podrían ser la reducción de los costos por compra de biocontroladores y por dispersión de estos en campo.

ANEXO 1

METODOLOGÍA PARA OBTENER LA RED INTEGRADA DE CONSUMO MÍNIMO DE AGUA

MATERIAL RECOVERY PINCH DIAGRAM (MRPD)

Este es un método gráfico que permite obtener el mínimo consumo posible de agua, a través de la información de dos curvas conocidas como curva de demanda de agua y curva de fuentes de agua. En el método deben identificarse todas las operaciones o actividades en las cuales salen y/o entran corrientes con agua. Luego se clasifican todas las corrientes con entrada de agua como demandas y todas las corrientes con salida de agua como fuentes. La Figura 25 muestra dos etapas típicas de lavado y reacción señalando los flujos de agua y las concentraciones de un contaminante clave.

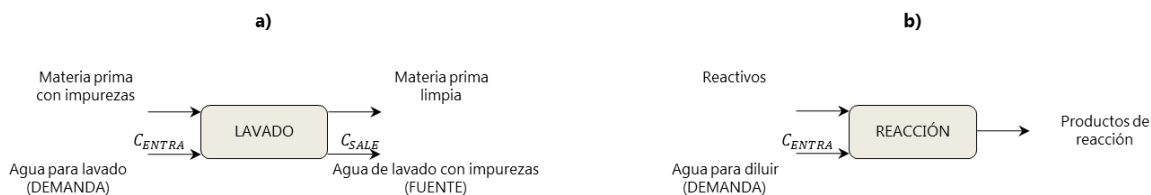


Figura 25: a) Unidad con fuente y demanda de agua b) Unidad solo con demanda de agua

Una misma operación puede actuar como fuente y demanda de agua como en el caso de la operación de lavado, ya que requiere agua a la entrada (demanda) y entrega agua a la salida (fuente) que puede ser reutilizada en otra unidad donde no se necesite agua de excelente calidad. Otras unidades actúan solo como demandas o como fuentes de agua. Un ejemplo es el caso del reactor que requiere agua en la entrada (demanda), pero cuya salida es directamente el producto de reacción.

Para aplicar el método deben conocerse los flujos de las demandas y las fuentes, y seleccionarse un contaminante clave. En las demandas debe especificarse la concentración máxima permisible de dicho contaminante, y en las fuentes debe establecerse su concentración de acuerdo a caracterizaciones, balances de masa y a restricciones de los equipos o de los procesos físicos.

Con esta información se prepara una tabla de fuentes de agua y demandas de agua organizadas en orden creciente de concentración de contaminante. La tabla se complementa con una columna para los flujos, otra columna para la carga contaminante, otra para el flujo acumulado y finalmente una columna para la carga contaminante acumulada. La carga contaminante se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$MD_j = D_j \times CD_j \tag{Ec. 8}$$

$$MF_i = F_i \times CF_i \tag{Ec. 9}$$

Donde:

D_j : Flujo de la demanda j

CD_j : Concentración de contaminante en la demanda j

MD_j : Carga de contaminante en la demanda j

F_i : Flujo de la fuente i

CF_i : Concentración de contaminante en la fuente i

MF_i : Carga de contaminante en la fuente i

La Tabla 56 presenta los datos con los que se especifica un proceso para el que se busca determinar el consumo mínimo de agua. El ejemplo es tomado directamente de la referencia [51]

Tabla 56: Fuentes y demandas

	Concentración de contaminante (g/ton)		Flujo (ton/h)		Carga de contaminante (kg/h)		Flujo acumulado (ton/h)	Carga acumulada (kg/h)
DEMANDAS								
1	CD ₁	20	D ₁	50	MD ₁	1	50	1
2	CD ₂	50	D ₂	100	MD ₂	5	150	6
3	CD ₃	100	D ₃	80	MD ₃	8	230	14
4	CD ₄	200	D ₄	70	MD ₄	14	300	28
FUENTES								
0 (Agua fresca)	CF ₀	0	F ₀	0	MF ₀	0	0	0
1	CF ₁	50	F ₁	50	MF ₁	2,5	50	2,5
2	CF ₂	100	F ₂	100	MF ₂	10	150	12,5
3	CF ₃	150	F ₃	70	MF ₃	10,5	220	23
4	CF ₄	250	F ₄	60	MF ₄	15	280	38

Una vez construida la tabla se elaboran las gráficas de demandas de agua y de fuentes de agua. Estas se trazan con los respectivos puntos de flujos acumulados vs. carga acumulada. La graficas correspondientes a la información de la Tabla 56 se presentan en la Figura 26.

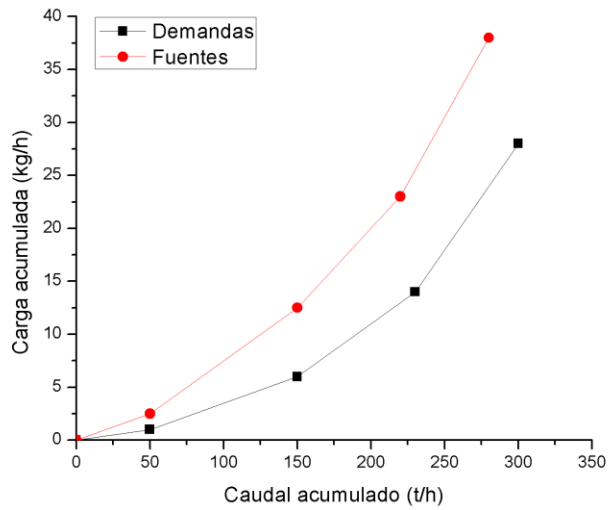


Figura 26: Gráficas de demandas y fuentes de agua

Luego de esto, la gráfica de fuentes se desplaza hacia la derecha hasta que apenas toque en un solo punto la gráfica de demanda. El punto donde se tocan se conoce como punto de pliegue. La distancia horizontal entre el primer punto de la curva de demanda y el primer punto de la curva de fuentes corresponde al requerimiento de agua fresca, y la distancia horizontal entre el último punto de la curva de demanda y el último punto de la curva de fuentes corresponde al mínimo de agua residual que es posible generar. La Figura 27 resume toda esta información para el ejemplo de la Tabla 56.

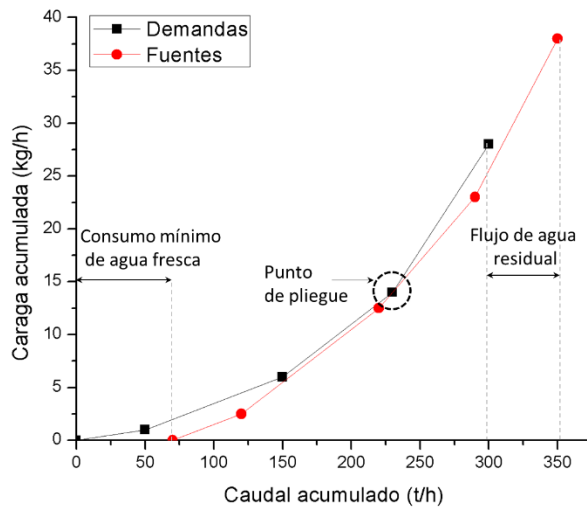


Figura 27: Gráficas de demandas y fuentes de agua con consumo mínimo de agua fresca

NEAREST NEIGHBORS ALGORITHM (NNA)

Con este método se obtiene una red de manejo de agua que se ajusta al consumo mínimo de agua que se determinó con la metodología anterior (MRPD). El algoritmo propone que para satisfacer una demanda de agua, se ubican las dos fuentes de calidad más cercanas, una ligeramente más limpia y la otra ligeramente más contaminada. Luego se mezclan estas dos corrientes de tal manera que la mezcla tenga exactamente la calidad requerida por la demanda de agua. Estas ideas se esquematizan en la Figura 28.

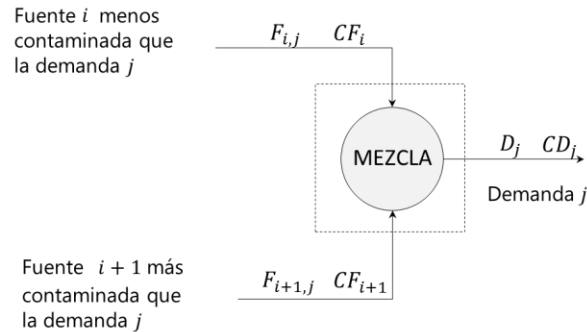


Figura 28: Esquema balance de materia básico para el algoritmo NNA

Las ecuaciones de balance de materia para la mezcla son:

$$F_{i,j} + F_{i+1,j} = D_j \quad \text{Ec. 10}$$

$$F_{i,j} \times CF_i + F_{i+1,j} \times CF_{i+1} = D_j \times CD_j \quad \text{Ec. 11}$$

Donde

$F_{i,j}$: Flujo requerido de la fuente ligeramente más limpia que la demanda j

$F_{i+1,j}$: Flujo requerido de la fuente ligeramente más contaminada que la demanda j

Las únicas incógnitas con los flujos $F_{i,j}$ y $F_{i+1,j}$, requeridos por la demanda D_j . Estos pueden obtenerse fácilmente al resolver las ecuaciones de balance.

Si al gastar toda el agua que ofrece la fuente de calidad inferior F_{i+1} se obtiene una mezcla que tiene mejor calidad que la requerida por la demanda D_j , se pasa a utilizar agua de la siguiente o las siguientes fuentes de inferior calidad de tal forma que la mezcla final tenga exactamente la calidad y cantidad requerida por la demanda que se planea satisfacer. Esta situación se esquematiza en la Figura 29.

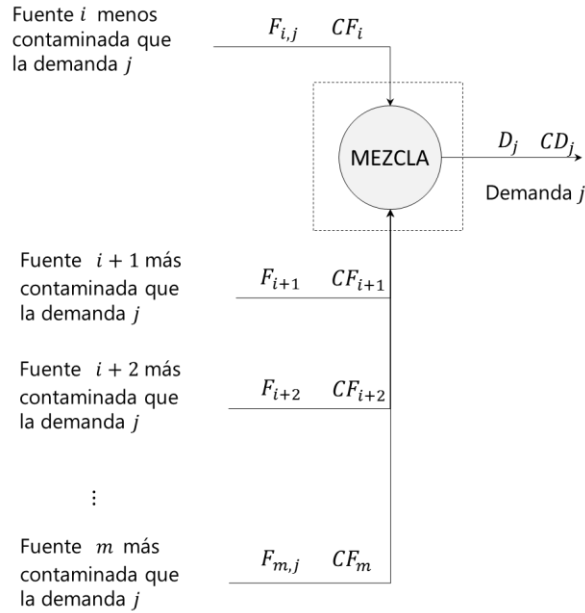


Figura 29: Esquema balance de materia general para el algoritmo NNA

Considerando lo anterior, las ecuaciones generales quedarían:

$$F_{i,j} + \sum_i^{m-2} F_{i+1} + F_{m,j} = D_j \quad \text{Ec. 12}$$

$$F_{i,j} \times CF_i + \left(\sum_i^{m-2} F_{i+1} \times CF_{i+1} \right) + F_{m,j} \times CF_m = D_j \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

F_{i+1} : Flujos de las fuentes más contaminadas que se utilizan en su totalidad.

$F_{m,j}$: Flujo requerido de la fuente más contaminada "m" que no se consume totalmente para satisfacer la demanda D_j .

Nótese que las únicas incógnitas son los flujos $F_{i,j}$ y $F_{m,j}$, ya que los flujos F_{i+1} son iguales a los flujos de las fuentes que se establecen al iniciar el problema, o pueden calcularse fácilmente como la diferencia entre el flujo total de una fuente y lo que ya se gastó para satisfacer una demanda previa D_{j-1} .

Puede surgir un caso especial en el cual una fuente de agua tenga exactamente la calidad requerida por una demanda. Si el flujo de esa fuente es superior al de dicha demanda, entonces el sobrante se utiliza para la siguiente demanda y se sigue el procedimiento descrito previamente. Si el flujo es insuficiente, se utiliza toda el agua de dicha fuente y se sigue el procedimiento identificando las fuentes más cercanas a la demanda que aún no se satisface completamente.

Ejemplo

Para aplicar esta metodología considérese nuevamente la información de la Tabla 56. El primer paso se muestra en la Figura 30 y consiste en generar una matriz grafica de $N + 2$ filas por $P + 1$ columnas donde N es el

número de fuentes de agua y P es el número de demandas de agua. En la posición (1,1) de la matriz se coloca la fuente de agua fresca denominada F_0 . En la primera columna se organizan las demás fuentes empezando con la menos contaminada F_1 en la fila 3 y avanzando hacia abajo en orden creciente de concentración de contaminante hasta la fuente F_N . A lo largo de la fila 2 se acomodan las demandas de agua comenzando en la columna 2 con la demanda más limpia D_1 y avanzando horizontalmente (fila 2, fila 3,...fila $P + 1$) en orden creciente de concentración de contaminante hasta la demanda más contaminada D_P . Tanto para fuentes como para demandas se incluye en la matriz grafica la información de caudales y concentraciones.

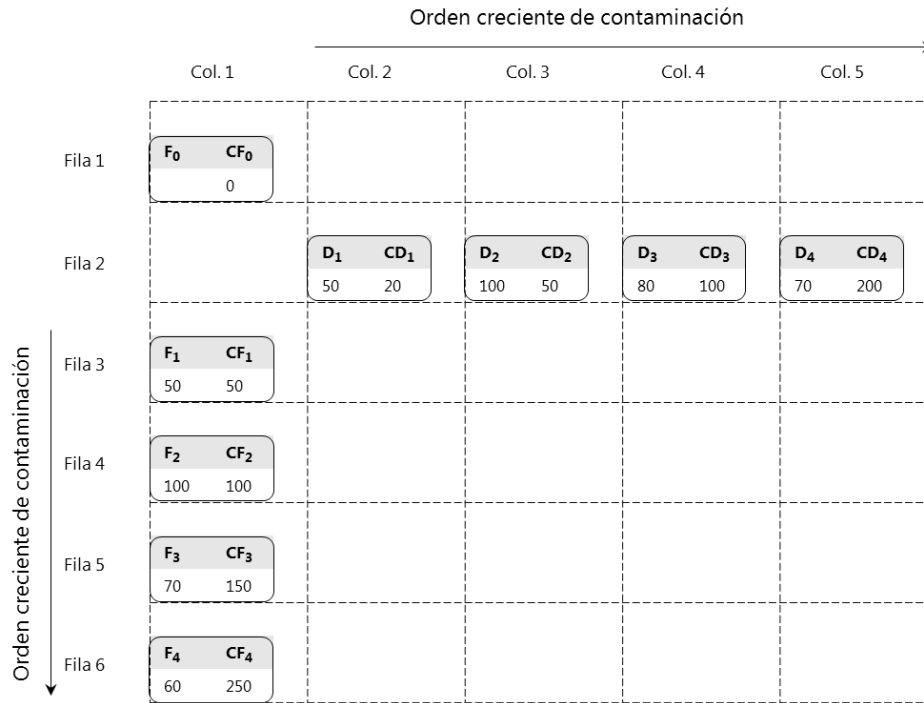


Figura 30: Matriz gráfica para redes integradas de agua

El segundo paso es relacionar en la matriz grafica las fuentes con las demandas a través de líneas de flujo. La magnitud de los flujos de las fuentes a cada demanda se establece resolviendo los balances de materia respectivos. Para el ejemplo, en la primera demanda D_1 , las fuentes de calidad por encima y por debajo más cercanas son F_0 y F_1 . Aplicando Ec. 10 y Ec. 11 los balances a resolver son:

$$F_{0,1} + F_{1,1} = D_1$$

$$F_{0,1} \times CF_0 + F_{1,1} \times CF_1 = D_1 \times CD_1$$

Con los datos de la Figura 30:

$$F_{0,1} + F_{1,1} = 50 \text{ ton/h}$$

$$F_{0,1} \times 0 + F_{1,1} \times 50 \text{ g/ton} = 50 \text{ ton/h} \times 20 \text{ g/ton}$$

Resolviendo las dos ecuaciones:

$$F_{0,1} = 30 \text{ ton/h}$$

$$F_{1,1} = 20 \text{ ton/h}$$

En este caso se consumen 20 ton/h de la fuente F_1 y quedan disponibles 30 ton/h para la demanda D_2 tal y como se muestra en la Figura 31.

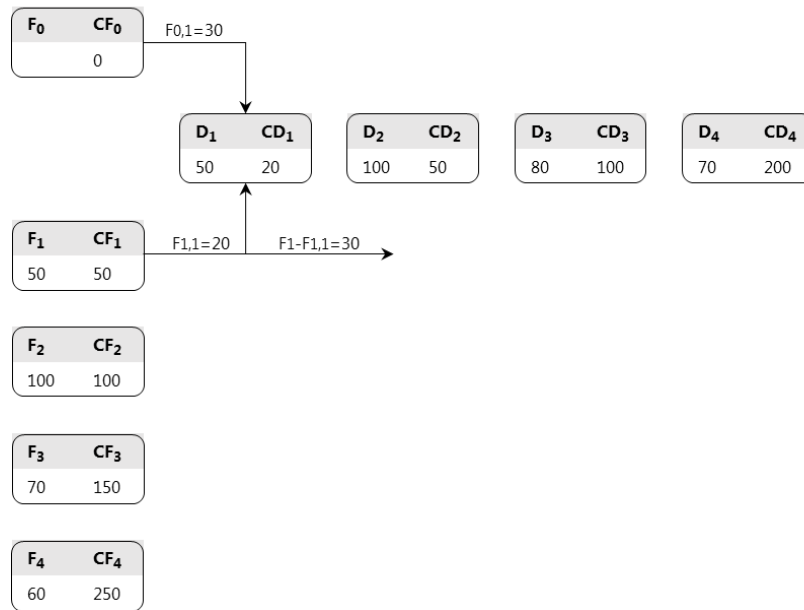


Figura 31: Conexión de fuentes y demandas en el NNA

Sin embargo, puede verificarse que si solo se consume el agua sobrante de la fuente F_1 , y se completa con flujo de la F_0 , la mezcla resultante será de mejor calidad de la requerida por D_2 . En este caso es necesario mezclar agua de la siguiente fuente de peor calidad F_2 y aplicar Ec. 12 y Ec. 13 para obtener:

$$F_{0,2} + F_{1,2} + F_{2,2} = D_2$$

$$F_{0,2} \times CF_0 + F_{1,2} \times CF_1 + F_{2,2} \times CF_2 = D_2 \times CD_2$$

Donde $F_{1,2}$, es conocido e igual a la diferencia $F_1 - F_{1,1} = 30 \text{ ton/h}$. Teniendo en cuenta lo anterior y con los datos de la Figura 30:

$$F_{0,2} + 30 \text{ ton/h} + F_{2,2} = 100 \text{ ton/h}$$

$$F_{0,2} \times 0 + 30 \text{ ton/h} \times 50 \text{ g/ton} + F_{2,2} \times 100 = 100 \text{ ton/h} \times 50 \text{ g/ton}$$

Resolviendo las dos ecuaciones:

$$F_{0,2} = 35 \text{ ton/h}$$

$$F_{2,2} = 35 \text{ ton/h}$$

Con estos resultados quedan disponibles 65 ton/h de la fuente F_2 para las siguientes demandas. El procedimiento se realiza para las demandas restantes obteniéndose la red que se muestra en la Figura 32.

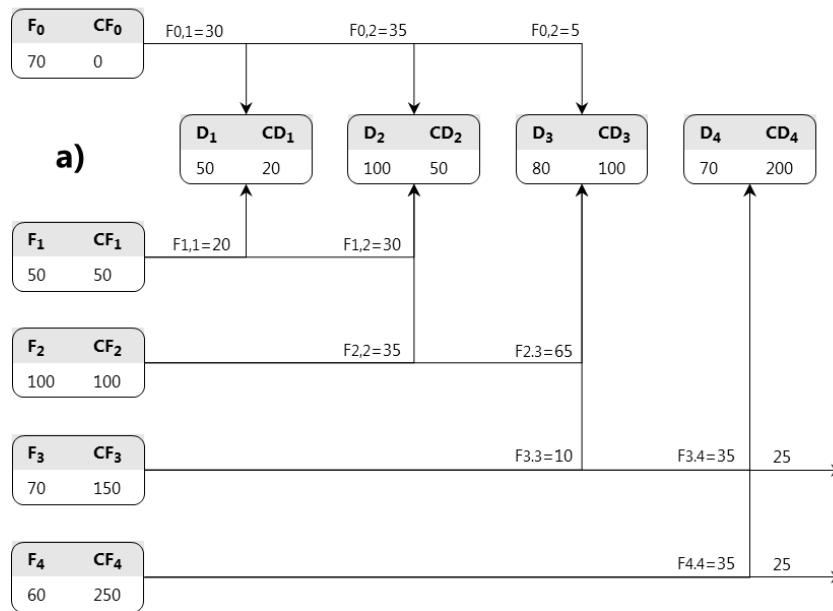


Figura 32: Red integrada de agua de consumo mínimo

La red de agua que se obtuvo en la Figura 32, se adapta perfectamente a flujo mínimo de agua fresca y al caudal mínimo de vertimientos que se estableció con el MRPD. Sin embargo en términos reales una red de este tipo podría ser inviable por consideraciones de seguridad o facilidad en su operación. En este tipo de situaciones puede aumentarse el consumo de agua para reducir la complejidad de la red y obtener procesos mucho más fáciles de operar e incluso más seguros. La Figura 33 a) muestra una alternativa de manejo de agua donde el flujo de agua fresca se incrementa a 80 t/h lo que representa un aumento del consumo del 14%. La alternativa de la Figura 33 b) implica un aumento del 43% del consumo con un flujo de agua fresca de 100 t/h. Las dos alternativas simplifican ampliamente la red inicial mostrada en la Figura 32.

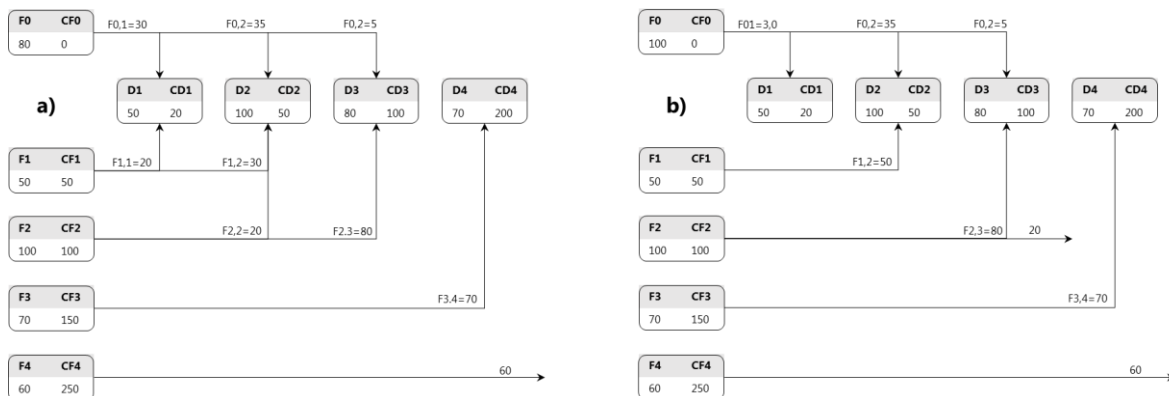


Figura 33: Redes alternativas para manejo integrado de agua

Debe tenerse en cuenta que como todo el diseño se hace en términos de un contaminante clave, es posible que para lograr el aprovechamiento real, haya que hacer adecuaciones intermedias del agua para evitar la interferencia de otros contaminantes. Estas adecuaciones intermedias también pueden ser incluidas como unidades para los esquemas de proceso y permitir reducciones mayores en el consumo de agua fresca y en caudal final de aguas residuales para tratamiento. Algunas de estas etapas intermedias son tanques de almacenamiento, torres de enfriamiento, torres de intercambio iónico, filtros, etc.

ANEXO 2

TABLAS DE DATOS FIGURAS 17-22

Las siguientes tablas muestran los valores utilizados para la elaboración de las figuras 17 a 22. Se incluyen los valores de la desviación estándar (\mathcal{D}) y el coeficiente de variación (\mathcal{D}/\bar{x}) de las medidas.

Tabla 57: Concentración promedio de UFC – *B. bassiana* (Figura 17)

Tiempo (h)	\bar{x} (UFC/ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	$1.38 \cdot 10^3$	--	--
25	$6.25 \cdot 10^4$	$3.54 \cdot 10^3$	0.06
46	$1.55 \cdot 10^6$	$2.19 \cdot 10^5$	0.15
74	$1.41 \cdot 10^7$	$2.05 \cdot 10^6$	0.15
166	$5.65 \cdot 10^7$	$1.13 \cdot 10^7$	0.2

Tabla 58: Concentración promedio de esporas – *B. bassiana* (Figura 17)

Tiempo (h)	\bar{x} (esp./ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	$1.39 \cdot 10^4$	--	--
25	$1.92 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^5$	0.06
46	$2.29 \cdot 10^6$	$5.66 \cdot 10^4$	0.02
74	$6.16 \cdot 10^6$	$1.18 \cdot 10^6$	0.19
166	$1.65 \cdot 10^7$	$1.84 \cdot 10^6$	0.11

Tabla 59: Concentración promedio de UFC – *P. lilacinus* (Figura 18)

Tiempo (h)	\bar{x} (UFC/ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	$2.1 \cdot 10^4$	--	--
19	$1 \cdot 10^4$	$7.07 \cdot 10^2$	0.07
44	$2.21 \cdot 10^6$	$5.83 \cdot 10^5$	0.26
70	$6.5 \cdot 10^6$	--	--
92	$1.23 \cdot 10^7$	$4.35 \cdot 10^6$	0.35
190	$2.72 \cdot 10^8$	$9.69 \cdot 10^7$	0.36

Tabla 60: Concentración promedio de esporas - *P. lilacinus* (Figura 18)

Tiempo (h)	\bar{x} (esp./ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	$1.19 \cdot 10^4$	--	--
19	$1.5 \cdot 10^6$	0	0
44	$2.25 \cdot 10^6$	$3.54 \cdot 10^5$	0.16
70	$3.05 \cdot 10^6$	$6.36 \cdot 10^5$	0.21
92	$8.92 \cdot 10^6$	$5.89 \cdot 10^5$	0.07
190	$6.43 \cdot 10^7$	$6.13 \cdot 10^6$	0.1

Tabla 61: Concentración promedio de UFC - *T. harzanium* (Figura 19)

Tiempo (h)	\bar{x} (UFC/ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	--	--	--
26	$1.08 \cdot 10^4$	$3.89 \cdot 10^3$	0.36
44	$7.25 \cdot 10^4$	$1.77 \cdot 10^4$	0.24
72	$3.78 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^6$	0.29
168	$6.5 \cdot 10^7$	$3.54 \cdot 10^7$	0.54

Tabla 62: Concentración promedio de esporas - *T. harzanium* (Figura 19)

Tiempo (h)	\bar{x} (esp./ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	$1.05 \cdot 10^4$	--	--
26	$1.75 \cdot 10^6$	$1.18 \cdot 10^5$	0.07
44	$2.42 \cdot 10^6$	$5.89 \cdot 10^5$	0.24
72	$3.42 \cdot 10^6$	$1.18 \cdot 10^5$	0.03
168	$3.45 \cdot 10^7$	$5.42 \cdot 10^5$	0.16

Tabla 63: Concentración promedio de UFC - *T. harzanium* (Figura 20)

Tiempo (h)	\bar{x} (UFC/ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
0	$7.14 \cdot 10^3$	--	--
67	$3.5 \cdot 10^5$	$3.54 \cdot 10^5$	1.01
90	$9 \cdot 10^5$	0	0
111	$1.43 \cdot 10^6$	$2.47 \cdot 10^5$	0.17
135	$4 \cdot 10^6$	0	0
162	$4.5 \cdot 10^6$	$7.07 \cdot 10^5$	0.16

Tabla 64: Concentración de UFC en ARI (Figura 21)

UFC/ml	
Bacterias	1.25×10^6
<i>T. harzanium</i>	3×10^4
Hongos contaminantes	1×10^5

Tabla 65: Concentración de UFC en ARI + ácido láctico (Figura 21)

UFC/ml	
Bacterias	1×10^4
<i>T. harzanium</i>	1×10^4
Hongos contaminantes	1.28×10^7

Tabla 66: Concentración promedio de UFC en ARI esterilizada (Figura 22)

Especie	\bar{x} (UFC/ml)	\mathcal{D}	\mathcal{D}/\bar{x}
<i>B. bassiana</i>	2.75×10^7	1.75×10^7	0.39
<i>P. lilacinus</i>	5.8×10^6	2.3×10^6	0.35
<i>T. harzanium</i>	6.0×10^6	2.7×10^6	0.44