



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Modelamiento matemático de la composición de un
detergente biodegradable a base de saponinas de
quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de
aguas grises**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en
Ciencias Ambientales

AUTOR

Oscar Julio NÚÑEZ VENEGAS

ASESOR

Dr. Carlos Francisco CABRERA CARRANZA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

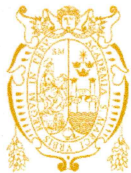
Referencia bibliográfica

Núñez, O. (2025). *Modelamiento matemático de la composición de un detergente biodegradable a base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Oscar Julio Núñez Venegas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07042855
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0482-0992
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Francisco Cabrera Carranza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	17402784
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5821-5886
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01066653
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Carlos Del Valle Jurado
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10266187
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.16.0.15 Recursos hídricos. ODS 6: Agua limpia y saneamiento
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Ciudad Universitaria Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.056423 Longitud: -77.084332
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Ciencias del medio ambiente: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los diecisiete días del mes de diciembre del año dos mil veinticinco, siendo las diez horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000419-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 11 de diciembre del 2025, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA COMPOSICIÓN DE UN DETERGENTE BIODEGRADABLE A BASE DE SAPONINAS DE QUINUA PARA UN EFICIENTE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES»

Presentado por el Mg. **OSCAR JULIO NÚÑEZ VENEGAS**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES**.

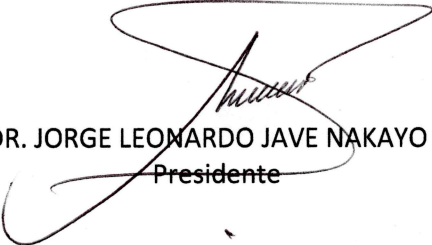
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° F16A1-20250000680, de fecha 21 de octubre del 2025, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

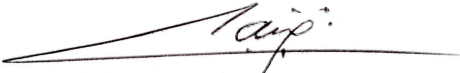
Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Muy Bueno (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **OSCAR JULIO NÚÑEZ VENEGAS**.

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Presidente


DR. CARLOS DEL VALLE JURADO
secretario


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Miembro


DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Asesor



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen Nº 000345-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «**MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA COMPOSICIÓN DE UN DETERGENTE BIODEGRADABLE A BASE DE SAPONINAS DE QUINUA PARA UN EFICIENTE TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES**», presentado por el **MG. OSCAR JULIO NÚÑEZ VENEGAS** para optar el grado académico de **DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **14%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**.

Lima, 8 de junio del 2026

Firma del Asesor: _____

Nombres y Apellidos del asesor: Carlos Francisco Cabrera Carranza

DNI: 17402784

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mi familia.

A mis padres

A mis hermanos

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser nuestro guía espiritual, a nuestros padres por inculcarnos el espíritu de superación.

Agradezco a la UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS por haberme brindado la oportunidad para desarrollar este trabajo de investigación en favor de la educación.

De manera especial, agradecer al Doctor Carlos Francisco Cabrera Carranza, asesor de mi tesis, por sus valiosas enseñanzas.

Deseo hacer extensivo mi agradecimiento a todos los profesores por transmitirnos sus conocimientos y experiencias que nos servirán para mejorar en nuestra vida profesional y por ende mejorar la educación en nuestro país.

Asimismo, doy mis más sinceros agradecimientos a todos mis compañeros por sus palabras de aliento y apoyo incondicional que me brindaron para poder realizar este trabajo de investigación.

ÍNDICE

	Pág.
Acta de Sesión.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice.....	v
Lista de Tablas.....	viii
Lista de Figuras.....	x
Resumen	xi
Abstract.....	xii
Nomenclatura.....	xiii
 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	 1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. Justificación teórica	3
1.3.2. Justificación práctica.....	5
1.3.3. Justificación ambiental.....	6
1.4. Objetivos de la Investigación	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	 8
2.1. Marco Filosófico o epistemológico de la investigación.....	8
2.1.1. Epistemología	9
2.1.2. Variable	10
2.1.3. Paradigma de investigación y Epistemología Regional.....	12
2.2. Antecedentes de investigación	15
2.2.1. Antecedentes Internacionales	15
2.2.2. Antecedentes Nacionales	24

2.3. Bases teóricas.....	27
2.3.1. Historia de los detergentes	27
2.3.2. Saponinas	30
2.3.3. Composición del detergente biodegradable	39
2.3.4. Mezclas.....	41
2.3.5. Tratamiento de aguas grises.....	43
2.4 Marco Conceptual	46
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	48
3.1. Hipótesis de la investigación.....	48
3.1.1. Hipótesis General	48
3.1.2. Hipótesis Específicas	48
3.1.3. Matriz de consistencia	49
3.2. Variables de investigación	50
3.2.1. Variable dependiente	50
3.2.2. Variable independiente	51
3.2.3. Matriz de operacionalización de variables	52
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	54
4.1. Tipo y diseño de investigación.....	54
4.2. Unidad de análisis	56
4.3. Población y muestra	57
4.3.1. Población	57
4.3.2. Muestra	57
4.3.3. Selección de muestra	57
4.4. Técnicas de instrumentación de recolección de datos.....	58
4.4.1. Técnicas de investigación.....	58
4.4.2. Instrumentos de investigación.....	58
4.4.3. Análisis e Interpretación de la información	62
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
5.1. Resultados No Experimentales.....	66
5.1.1. Recolección de datos de saponinas de quinua.....	66
5.1.2. Recolección de datos del modelamiento matemático	71

5.1.3. Recolección de datos de las aguas grises.....	77
5.2. Resultados inferenciales.....	86
5.2.1. Prueba de Hipótesis	86
5.2.2. Validación del Modelo.....	87
5.3. Discusión de resultados.....	88
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	97

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del agua en función de su calidad.....	27
Tabla 2. Desarrollo histórico de los productos detergentes	29
Tabla 3. Estructura de saponinas identificadas en quinua (Chenopodium quinua Willd)	38
Tabla 4. Matriz de consistencia.....	49
Tabla 5. Matriz de operacionalización de variables	52
Tabla 6. Medición de los parámetros físico – químicos de las etapas del proceso de tratamiento de aguas grises	57
Tabla 7. Componentes de un detergente a base de saponinas de quinua.....	58
Tabla 8. Componentes para el detergente biodegradable	60
Tabla 9. Datos del pH teórico de cada componente del detergente biodegradable.....	60
Tabla 10. Promedio de pH de cada componente.....	61
Tabla 11. Valores del pH de cada fila de la matriz de Mezcla	62
Tabla 12. Coeficientes de regresión estimados para pH (proporciones del componente)	63
Tabla 13. Valores de p del Modelamiento matemático del detergente biodegradable.....	64
Tabla 14. Resumen del Modelo lineal, cuadrática y cúbica	64
Tabla 15. Concentraciones de saponinas (%) calculadas a partir de tiempos y solventes	66
Tabla 16. Coeficientes de regresión lineal estimados para pH (proporciones del componente).....	71
Tabla 17. Resumen del modelo lineal.....	71
Tabla 18. Datos de los pesos, y coeficientes puros, binomios, y ternarios del modelo matemático.....	72
Tabla 19. Obtención del pH del detergente	73
Tabla 20. Valores límites de iB (Índice de Biodegradabilidad)	75
Tabla 21. Límites de Composición (Constraints).....	76
Tabla 22. Consumo Mensual de Agua Potable (120 personas)	77
Tabla 23. Comparativa Tarifaria Mensual (Edificio de 120 personas)	78

Tabla 24. Recibo mensual en el Distrito de La Molina.....	78
Tabla 25. Recibo mensual en el Distrito de Surco	79
Tabla 26. Recibo mensual en el Distrito de Comas	79
Tabla 27. Cuadro de Pagos por Familia (Consumo Dividido entre 30).....	80
Tabla 28. Ahorro Total del Edificio (Mensual)	80
Tabla 29. Potencial de Generación de Aguas Grises (Mensual).....	80
Tabla 30. Ahorro Mensual por Reúso de Aguas Grises (120 personas).....	81
Tabla 31. CAPEX (Planta 16.22 m ³ /día) en el Distrito de La Molina	82
Tabla 32. Costo fijo en el Distrito de La Molina	83
Tabla 33. Comparativa de CAPEX según Volumen de Agua Gris.....	83
Tabla 34. Costos Fijos Mensuales (OPEX Fijo)	84
Tabla 35. Costos Variables Mensuales (CV) en el distrito de La Molina	84
Tabla 36. Costos Variables Mensuales (CV) en el Distrito de Surco.....	85
Tabla 37. Costos Variables Mensuales (CV) en el Distrito de Comas.....	86
Tabla 38. Utilidad Mensual en los Distritos: La Molina, Surco y Comas	86
Tabla 39. Tiempo para recuperar la inversión	86

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Consumo de ablandadores de agua para ajustar dureza cero partes de millón.....	18
Figura 2. Costo de ablandamiento en función de la dureza del agua de alimentación.....	18
Figura 3. Tipos de esqueletos de geninas encontradas en las 3 clases principales de saponinas	31
Figura 4. Aglicón: ócido fitolacagénico, sustituyente en el C3 β -D-Glc (1 $\rightarrow$ 3)- α -L-Ara	32
Figura 5. Aglicón: ácido fitolacagénico y un sustituyente en el carbono 3: α -L-Ara	32
Figura 6. Aglicón: hederagenina y con un sustituyente en el carbono 3: β -D-Glc(1 3)- α -L-Ara.....	33
Figura 7. Aglicón del ácido oleanólico con un sustituyente en el carbono 3: β -DGlcA	33
Figura 8. Estructuras de agliconas de saponinas elucidadas en quinua.....	34
Figura 9. Tipos de diseños de experimentos para mezclas	41
Figura 10. Ejemplos de diseños simplex reticular y simplex con centroide con tres componentes	42
Figura 11. Tratamiento de Aguas grises en Colombia	44
Figura 12. Preparación de cada una de las 20 mezclas propuestas	56
Figura 13. Algoritmo para corregir el pH del detergente biodegradable.....	59
Figura 14. Probabilidad normal del Modelamiento matemático del detergente biodegradable	65
Figura 15. Probabilidad de residuos de datos de saponinas de quinua.....	67
Figura 16. Prueba de igualdad de varianzas: Residuos vs. Tiempo; Solventes	68
Figura 17. Probabilidad normal (la respuesta es pH)	72
Figura 18. Optimizador de respuesta par el pH igual a 11.5965.....	73
Figura 19. Optimizador de respuesta par el pH igual a 10.5064.....	74
Figura 20. Optimizador de respuesta par el pH igual a 10.50.....	74
Figura A1. Herramientas de análisis de alternativas de producción incorporando el Análisis de Ciclo de Vida	98

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se ha estudiado el modelamiento matemático de la composición de un detergente biodegradable a base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises, para mitigar la cantidad de agua potable, debido a la escasez de este recurso hídrico y su impacto en la sociedad en el futuro. Debido a los reactivos de los detergentes sintéticos que destruyen al ecosistema, se utilizó el detergente biodegradable formado por las saponinas de quinua como alternativa de reemplazo del agente tensoactivo. Las aguas grises se obtienen de la operación de limpieza del detergente a base de saponinas y por los residuos del agua potable y el detergente a base de saponinas. El agua que se usó para la limpieza con el detergente se denomina aguas grises, y son recuperadas mediante un eficiente tratamiento. El tipo de investigación es aplicada, cuantitativa y no experimental. Se diseñó una matriz de seis componentes aplicado en mezcla del software Minitab 22, y con este mismo programa se evaluó para un pH distinto utilizando los pH de cada componente, creando un modelo matemático del detergente biodegradable. Se encontró los valores que limitan la composición del detergente biodegradable. Se demostró que el costo de reutilizar aguas grises tratadas es menor que el costo del agua potable.

Palabras Clave: saponinas de quinua, composición de un detergente biodegradable, tratamiento de aguas residuales, modelamiento matemático con el uso de software Minitab 22, costos

ABSTRACT

In the present research work, the mathematical modeling of the composition of a biodegradable detergent based on quinoa saponins has been studied for efficient treatment and reuse of gray water, to mitigate the amount of drinking water, due to the scarcity of this water resource and its impact on society in the future. Due to the reagents of synthetic detergents that destroy the ecosystem, the biodegradable detergent formed by quinoa saponins was used as an alternative to replace the surfactant agent. Gray water is obtained from the cleaning operation of the saponin-based detergent and from the residues of drinking water and the saponin-based detergent. The water that was used for cleaning with the detergent is called gray water, and is recovered through efficient treatment. The type of research is applied, quantitative and non-experimental. A matrix of six components was designed applied in a mixture of the Minitab 22 software, and with this same program it was evaluated for a different pH using the pH of each component, creating a mathematical model of the biodegradable detergent. The values that limit the composition of the biodegradable detergent were found. It was demonstrated that the cost of reusing treated greywater is lower than the cost of potable water.

Keywords: quinoa saponins, composition of a biodegradable detergent, wastewater treatment, mathematical modeling using Minitab 22 software, costs

NOMENCLATURA

pH	Potencial de hidrógeno, es una escala logarítmica de 0 a 14
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (mg/L de O ₂)
DQO	Demanda Química de Oxígeno (mg/L de O ₂)
r	Relación o grado de asociación entre ambas.
Ox	Variable Independiente
Oy	Variable Dependiente
[OH ⁻]	Concentración de iones oxidrilo
iB	Índice de Biodegradabilidad
CAPEX	Gastos de Capital
OPEX	Gastos operativos
mL	Mililitros
CMC	Carboximetilcelulosa
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sodio
STPP	Tripolifosfato de sodio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
Esteroidales (27)	Contiene 27 carbonos
Triterpenoides (30)	Contiene 30 carbonos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

La escasez de agua a nivel mundial va en aumento debido al mal uso de las aguas grises. Estas aguas se pueden volver a reutilizar siempre y cuando se realiza un tratamiento adecuado a bajo costo.

A nivel mundial, en Europa, el país de Alemania tiene cultura hídrica y en Sudamérica como el caso de nuestro país no tenemos cultura hídrica.

La ciudad de Lima tiene tres ríos: Rímac, Chillón y Lurín, y están disminuyendo sus caudales y la preocupación en los próximos años seremos más de 10 millones de habitantes.

Un destino de gran relevancia para el agua residual tratada es su empleo en actividades agrícolas, sector que constituye el principal usuario de recursos hídricos con aproximadamente el 70% del volumen disponible (FAO, 2011). Las proyecciones indican que la demanda asociada a la producción agrícola aumentará de forma considerable, estimándose un crecimiento cercano al 55% para el 2030 y alrededor del 80% hacia el 2050 (Sci. Adv. / AGU, 2021).

Los detergentes actuales tienen tripolifosfato de sodio y este compuesto crea un crecimiento excesivo de algas en las salidas de los ríos hacia el mar.

Es menester realizar el estudio de un detergente biodegradable cuyos componentes sean amigables para un mejor tratamiento de las aguas grises.

La presencia de los detergentes en las aguas residuales afecta a los diferentes procesos de tratamiento y también a la biota, que es un conjunto de especies de plantas, animales y otros organismos que ocupan un área dada.

Los detergentes presentes en cuerpos de agua, en concentraciones de más de 3 mg/L y donde la concentración de oxígeno disuelto es reducida constituye un peligro real para los peces.

(López, 1998) menciona: Este es el nuevo contrato social que es necesario en el mundo contemporáneo, el objeto de la renegociación de las relaciones entre ciencia y sociedad: ajustar la ciencia y la tecnología a los estándares éticos que ya gobiernan otras actividades sociales, i.e. democratizarlas, para estar entonces en condiciones de cambiar sus prioridades y objetivos, reorientándolos hacia las auténticas necesidades sociales, hacia la gente y las naciones más pobres y necesitadas.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Es posible desarrollar un modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua, para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises?

1.2.2. Problemas Específicos

¿En qué medida el modelamiento matemático correlaciona entre la composición del detergente a base de saponinas de quinua con el pH permite predecir el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises?

¿Cuáles son los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises?

¿Cuál es la viabilidad económica del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises en comparación con el costo del agua potable?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

La quinua es una especie herbácea de ciclo anual originaria de la región andina, donde destaca por su amplia adaptación agroclimática. Bolivia y Perú concentran cerca del 88% de su producción global, destinándose principalmente al consumo interno —ya sea como grano

o en forma de harina— en países como Perú, Bolivia y Argentina (Cardozo & Tapia, 1979). En el contexto peruano, uno de los subproductos más relevantes es la obtención de saponinas, compuestos que constituyen la base para la formulación de detergentes con propiedades biodegradables. Debido a su configuración molecular, estas sustancias pueden ser removidas parcialmente mediante procesos simples de lavado con agua (Chauhan et al., 1999).

A diferencia de los detergentes derivados de insumos fósiles —los cuales presentan dificultades para su degradación natural y demandan tratamientos más costosos y complejos—, las saponinas ofrecen una alternativa de menor impacto ambiental. En este sentido, se vuelve imprescindible desarrollar un modelo matemático que permita definir la composición óptima de un detergente biodegradable elaborado a partir de saponinas de quinua, con el fin de reducir la presencia de componentes que complican el tratamiento y la reutilización de aguas grises.

Las diversas composiciones del nuevo detergente biodegradable formado por las saponinas, tripolifosfato de sodio y otros componentes permitirán un eficiente tratamiento de aguas grises.

El costo actual del agua potable demanda una tarifa alta al usuario debido a que todas las aguas usadas terminan como efluentes en los ríos, lagunas y océanos.

El crecimiento poblacional de la ciudad de Lima necesita ahorrar agua en su totalidad en el futuro cercano.

Se puede aplicar estos conocimientos en los complejos de viviendas futuras y también realizar la reingeniería del tratamiento y reutilización de aguas grises.

1.3.2. Justificación práctica.

El estudio de modelar matemáticamente detergentes biodegradables a partir de las saponinas de la quinua garantiza la sostenibilidad ambiental, y con mayor razón si estas aguas grises formadas por el uso del detergente mencionado con el menor costo se realicen los respectivos tratamientos de aguas.

La falta del recurso hídrico en el Perú, sobre todo en la capital que se encuentra con más 10 millones de habitantes, necesita la solución urgente de recuperar estas aguas grises para derivarlos en regadíos de verduras, tubérculos, y otros en huertos ubicados en los parques principalmente.

El estudio del surfactante saponina es el principal componente de la formación de un detergente biodegradable a partir de la quinua para formar los detergentes en reemplazo de los hidrocarburos, siendo una alternativa saludable de la sostenibilidad ambiental para las futuras generaciones. Debido a la empatía de los vecinos en organizarse y cuidar las aguas grises para su tratamiento de aguas inmediatamente, y observando las limitaciones del agua, se unirán con la oportunidad de organizarse y decidir en utilizar la recuperación de este recurso en lugares prioritarios en obtener productos alimenticios, aseo de áreas de parqueos, regadíos de plantas, arbustos y árboles, con el regadío de estas aguas recuperadas.

La falta de agua se incrementará paulatinamente y la oportunidad de construir el sistema de recuperación se logrará en su debido momento.

La investigación en este tema permitiría a los profesionales del ambiente construir varios softwares aplicado a otros equipos con el menor costo y el espacio disponible.

Es necesario realizar un estudio teórico y práctico, porque permitirá resolver y conservar el ambiente para las nuevas generaciones.

1.3.3. Justificación ambiental

La justificación ambiental para desarrollar un modelo matemático para un detergente biodegradable y la reutilización de sus aguas grises se centra en la minimización del impacto ecológico y la optimización de los recursos hídricos.

El modelo puede determinar la concentración mínima efectiva del detergente necesaria para una limpieza adecuada. Esto asegura que se libere la menor cantidad posible de materia activa (saponinas) y coadyuvantes al medio ambiente y la Menor Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el agua residual.

Evita la acumulación de contaminantes persistentes en ecosistemas acuáticos, previniendo la eutrofización y protegiendo la vida acuática.

El modelo es esencial para validar la calidad del agua residual para su reutilización:

El modelo permite predecir la concentración de los componentes del detergente que quedan en el agua gris después del lavado y antes del tratamiento.

Al optimizar la fórmula y el proceso de reutilización, se logra una doble reducción:

El uso de ecuaciones simultáneas minimiza la dependencia de quelantes costosos o perjudiciales (como los fosfatos en detergentes convencionales) y maximiza el uso de componentes de bajo impacto como el Carbonato de Sodio y Citrato.

Debido a los altos costos operativos y de reactivos asociados a la experimentación a escala de laboratorio para detergentes biodegradables, se optó por el modelado y la simulación matemática. Este enfoque permite una optimización costo-eficiente, identificando la viabilidad del producto y reduciendo significativamente la inversión inicial en materiales y equipos sin comprometer la precisión del diseño técnico.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

1.4.2. Objetivos específicos

Determinar el modelamiento matemático que correlaciona la composición del detergente a base de saponinas de quinua con el pH para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

Determinar los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

Determinar la viabilidad económica del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises mediante la comparación de sus costos operativos frente al costo de adquisición del agua potable.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Filosófico o Epistemológico de la Investigación

La presente investigación se basa en el enfoque o paradigma *de la cuna a la cuna* (Braungart et al., 2007), sustentado en principios de la ecología, el cual concibe al ser humano como parte integrante del sistema natural.

UNESCO et al. (2020) argumentan que es necesario evaluar las bondades de los ecosistemas en función de los recursos para que no sucedan cambios no deseados.

La no sostenibilidad proporcionada por los malos hábitos del ser humano con respecto al recurso hídrico, la ONU (2020) asegura que más del 80 % de las aguas residuales del mundo que llegan al mar y a los ríos están sin depurar, y la Organización Mundial de la Salud (OMS) define el agua contaminada como aquella que sufre cambios en su composición hasta quedar inservible.

La sostenibilidad hídrica se viene desarrollando en el contexto de que se haga factible los acuerdos ya existentes para enfrenar los problemas de acceso al agua potable y el saneamiento, aumento de presión sobre los recursos hídricos y ecosistemas, así como los riesgos de sequías e inundaciones, para ello las Naciones Unidas creó el Decenio Internacional para la acción "Agua para el Desarrollo Sostenible", 2018-2028.

Esta investigación está basada en la corriente filosófica del positivismo y en sinergia con el método científico, logra obtener reportes objetivos, respecto a la reutilización de aguas grises

en las zonas rurales y urbanas, obteniendo un modelo matemático de los detergentes biodegradables a base de saponinas de quinua.

2.1.1. Epistemología

La epistemología del Modelamiento Matemático, se centra en la validez de la representación mediante ecuaciones, variables y parámetros que logra representar la compleja realidad la composición del detergente (saponinas de quinua y los coadyuvantes) la compleja realidad del detergente y su efecto en aguas grises y que mediante las propiedades del detergente y su biodegradabilidad se puede tomar decisiones con estos conocimientos. Asimismo, reconoce que un modelo de abstracción simplificada de la realidad, y este conocimiento generado no es “verdad” absoluta, sino una inferencia útil derivada de las premisas y supuestos del modelo.

La epistemología de la Química Aplicada y la ingeniería debe ser validado por datos experimentales del mundo real y que debe ser demostrado en un laboratorio. El estudio no es solo teórico, sino que busca generar conocimiento útil y aplicable que resuelvan problema real que consiste en el tratamiento y reutilización de aguas grises. También mediante el conocimiento Inductivo que se obtienen de las propiedades y parámetros de las saponinas de quinua ya sea como su tensioactividad o toxicidad se basa en la observación y la inducción a partir de múltiples experimentos.

La epistemología de la Interdisciplinariedad obedece a una zona de contacto entre diferentes disciplinas, lo que implica una integración de metodologías y criterios de verdad.

El conocimiento generado es un proceso cíclico: a) Obtener datos sobre las saponinas y las aguas grises. b) el uso de las matemáticas es construir un modelo formal a partir de estos datos. C) Uso del modelo para simular la composición optima y su efecto.

2.1.2. Variable

La identificación de las variables en la tesis sobre Modelamiento Matemático de un proceso se divide en tres categorías principales: Variables de Composición/Diseño (Independientes), Variables de Proceso (Intervinientes), y Variables de Desempeño/Resultado (Dependientes).

Variables Independientes (Variables del Modelo).

Estas son las variables que el investigador manipula o varía en la composición para encontrar la formulación "óptima" y que serán los *inputs* del modelo matemático.

- Concentración de Saponinas de Quinoa: El porcentaje o la cantidad de saponinas extraídas incorporadas en el detergente.
- Concentración de Co-surfactantes/Aditivos: La cantidad de otros componentes complementarios (ej., agentes espesantes, reguladores de pH, potenciadores de espuma, enzimas) usados en la formulación.
- Proporción de Componentes (Diseño de Mezclas): La relación específica entre los diferentes ingredientes de la formulación del detergente.

Variables Dependientes (Resultados del Modelo).

Estas son las variables que se miden y que el modelo matemático debe predecir o cuantificar. Reflejan la eficiencia del detergente:

Desempeño del Detergente (Función Limpiadora).

- Poder Detergente o Capacidad de Remoción de Suciedad: Medido típicamente por el porcentaje de remoción de manchas o grasas en pruebas estandarizadas.

- Nivel de Espuma (Capacidad Espumante): Relevante para la experiencia del usuario, aunque puede variar según el tipo de aplicación.
- Estabilidad del Producto (Vida Útil): La capacidad de la formulación para mantener sus propiedades a lo largo del tiempo.

Eficiencia en el Tratamiento de Aguas Grises (Función Ambiental).

- Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Indicadores clave de la carga orgánica residual en el agua después de usar y tratar el detergente.
- Concentración de Tensoactivos Residuales: Cantidad de surfactantes (saponinas) que quedan en el agua tratada.
- Índice de Biodegradabilidad: La tasa o el porcentaje en que los componentes del detergente (especialmente las saponinas) se degradan biológicamente en el agua residual.
- Propiedades Físico-Químicas del Agua Residual Tratada:
 - pH: El nivel de acidez o alcalinidad.
 - Sólidos Suspendidos Totales (SST): Cantidad de partículas sólidas remanentes.
 - Turbidez: Claridad del agua, un indicador de la calidad para la reutilización.

Variables Intervinientes (Condiciones de Proceso)

Son variables que el investigador debe **controlar o registrar** porque afectan tanto el desempeño del detergente como el modelamiento, pero no son el foco principal de manipulación.

- Temperatura de Lavado/Proceso: La temperatura a la que se realizan las pruebas de limpieza y el tratamiento.

- **Tiempo de Contacto o Reacción:** El tiempo que el detergente está en contacto con la suciedad o el tiempo de tratamiento del agua.
- **Tipo y Concentración Inicial del Agua Gris:** La calidad inicial del agua residual utilizada para la prueba (ej., carga de grasa, DQO inicial).
- **Condiciones Ambientales:** Como el pH inicial del agua de lavado o la dureza del agua.

2.1.3. Paradigma de investigación y Epistemología Regional

El paradigma de investigación y la epistemología que subyacen a la tesis, son el Positivismo o Post-positivismo y la Epistemología de las Ciencias Aplicadas/Ingeniería.

A continuación, se detalla cada componente y la Epistemología Regional (contextualización a la química y la ingeniería):

Paradigma de Investigación: Positivismo/Post-positivismo

El enfoque de la investigación, al basarse en el modelamiento matemático y la búsqueda de la eficiencia (cuantificación), se enmarca en el paradigma cuantitativo.

- **Positivismo (Clásico):** El estudio busca leyes y principios **objetivos** que rigen el comportamiento de la materia (saponinas, aguas grises). Se asume una realidad única y medible.
- **Post-positivismo (Más Probable):** Reconoce que no se puede alcanzar la verdad absoluta, pero se busca la mejor explicación posible mediante la **falsación** de hipótesis y la replicabilidad de los resultados. Se basa en la **evidencia** empírica y la inferencia estadística para validar el modelo.

Epistemología Regional (Ciencias Aplicadas/Ingeniería)

La Epistemología Regional se refiere a la forma específica en que se genera y valida el conocimiento dentro de una disciplina particular. En este caso, la investigación fusiona principios de la Química, la Ingeniería y las Matemáticas Aplicadas.

A. Epistemología de la Ingeniería y las Ciencias Aplicadas

- **Enfoque Instrumental y Pragmático:** El objetivo final del conocimiento es resolver un problema (contaminación de aguas grises) mediante la **creación de** una tecnología (el detergente biodegradable). El conocimiento se valida por su utilidad y efectividad práctica (la eficiencia del tratamiento).

Paradigma de investigación

Elemento	Característica en la Tesis
Ontología (Naturaleza de la Realidad)	Realismo Ingenuo/Crítico: Existe una realidad independiente del investigador (las propiedades de las saponinas, la eficiencia de remoción de contaminantes).
Metodología	Experimental y Cuantitativa: Se utilizan pruebas controladas y modelos matemáticos (ej., diseño experimental, regresión) para cuantificar la relación causa-efecto entre la composición (variable independiente) y la eficiencia de tratamiento (variable dependiente).
Axiología (Valores)	Se busca la objetividad y la neutralidad en la medición y el análisis de datos.

- **Diseño y Optimización:** El proceso epistemológico no solo busca describir la realidad, sino modificarla. El modelamiento matemático opera como una herramienta para la optimización del diseño; se justifica el conocimiento si permite encontrar la *mejor* composición para alcanzar los criterios de calidad preestablecidos.

B. Epistemología del Modelamiento Matemático

- **Abstracción y Representación:** La validez se basa en la capacidad del modelo para abstraer las leyes físico-químicas del sistema real (saponinas, agua, suciedad) y traducirlas a un lenguaje matemático.
- **Criterio de Validación:** La prueba de fuego del conocimiento es la correspondencia entre las predicciones numéricas del modelo y los **datos** experimentales obtenidos en el laboratorio (ej., si el modelo predice una remoción de DQO del 80%, el experimento debe confirmarlo con un margen de error aceptable).

C. Epistemología de la Química Verde (Componente Regional Específico)

- **Justificación Ética-Científica:** La elección de las saponinas de quinua (un subproducto natural) no es solo técnica, sino que implica un criterio axiológico (de valor). El conocimiento generado se justifica bajo los principios de la Química Verde, donde se valora la biodegradabilidad y la minimización del impacto ambiental. Este es el componente regional/contextual (uso de un recurso andino como la quinua) que añade una capa de valor al conocimiento científico-tecnológico.

2.2. Antecedentes de la Investigación

2.2.1. Antecedentes Internacionales

Villacrés Alvarez et al. (2019) señalan que el avance industrial ha permitido el desarrollo de productos de mayor utilidad, pero este proceso también ha generado impactos negativos sobre las fuentes de agua, especialmente por la presencia de tensoactivos provenientes de detergentes

convencionales, los cuales forman películas grasas que impiden el intercambio gaseoso y provocan la muerte de organismos acuáticos, además de emitir olores fuertes durante su descomposición. Los autores señalan que en la industrialización de cultivos como la quinua, el chocho y la cabuya, las saponinas presentes en sus procesos son desechadas sin aprovechamiento, ya sea como polvillo resultante de la escarificación, agua de lavado o jugos residuales ricos en estos compuestos. Frente a este desperdicio, se planteó la elaboración de un detergente ecológico utilizando dichas saponinas como materia prima, extrayéndolas mediante etanol al 96% y evaluando sus propiedades fisicoquímicas, obteniendo valores adecuados de densidad, pH, viscosidad y °Brix. El producto final cumplió con la norma NTE INEN 0847 (2009), demostrando alta biodegradabilidad (94%) y ausencia de sustancias contaminantes tradicionales. Asimismo, el análisis económico reveló un proyecto altamente rentable con un VAN de USD 174.074,21, una TIR del 87% y un índice beneficio-costeo de 2,82, evidenciando que la transformación de estos desechos agrícolas en detergente biodegradable es una alternativa técnica y económicamente viable.

García Camacha Gutiérrez (2017) sostiene en su investigación doctoral que la experimentación constituye el núcleo del método científico, ya que permite validar hipótesis y generar conocimiento nuevo a partir del estudio empírico de fenómenos observables. La autora enfatiza que experimentar implica someter un sistema real a condiciones controladas para obtener datos fiables sobre los factores que influyen en su comportamiento, lo que posteriormente posibilita un análisis exhaustivo capaz de producir conclusiones sólidas. Para ello, el diseño adecuado de la prueba experimental y la recolección cuidadosa de la información son esenciales, ya que la calidad del análisis estadístico depende directamente de la precisión y pertinencia de los datos obtenidos. Dada la importancia de esta etapa en múltiples disciplinas, la autora destaca que en la actualidad existe

un creciente interés en el diseño de experimentos como herramienta fundamental para garantizar la validez y rigurosidad de las investigaciones científicas.

Trujillo y Valencia (2017) señalan que la quinua ha formado parte de la alimentación humana desde tiempos precolombinos y que su consumo requiere un proceso de lavado destinado a eliminar las saponinas, las cuales suelen considerarse desechos. Los autores explican que, en Ecuador, existe una fuerte demanda por cosméticos como los champús, productos que normalmente se elaboran con tensoactivos sintéticos que mejoran su presentación y capacidad espumante. Ante ello, propusieron optimizar un método de extracción de saponinas provenientes del lavado de la quinua para evaluar su potencial como tensoactivo natural en la formulación de champú. Para desarrollar la metodología, realizaron cinco tratamientos experimentales y un control sin saponinas, logrando extraer $1,68 \pm 0,18$ mg mediante un proceso húmedo a 50 °C durante cinco minutos. Los resultados mostraron que el tratamiento con mayor contenido de saponinas obtuvo niveles adecuados de pH, formación de espuma y viscosidad, demostrando su funcionalidad en aplicaciones cosméticas. Finalmente, el análisis financiero del proyecto reportó indicadores positivos —incluyendo un VAN de USD 127.041, una relación beneficio-coste de 1,80 y una TIR del 47,89%—, lo que confirma la factibilidad técnica y económica de emplear saponinas de quinua como alternativa ecológica en productos capilares.

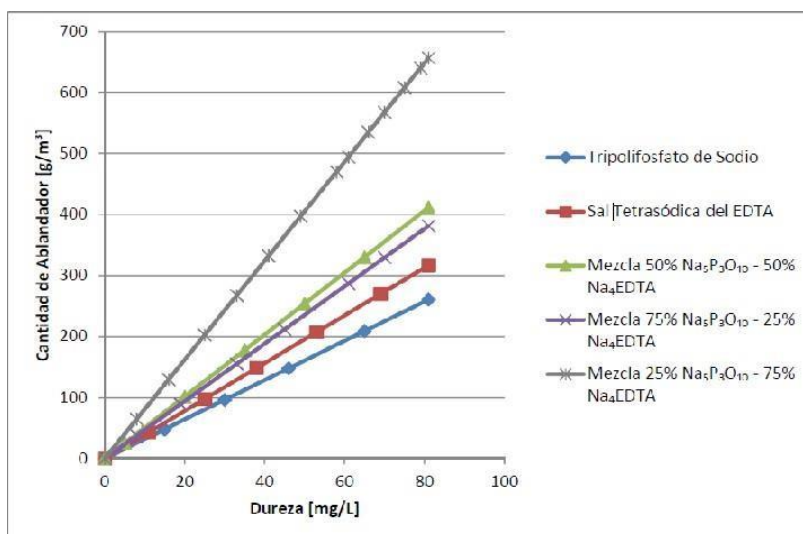
Montoya (2012) desarrolla un modelo matemático con base fenomenológica que describe cómo varía la demanda bioquímica de oxígeno soluble (DBO5) cuando el proceso de tratamiento de aguas residuales se ve afectado por compuestos inhibitorios, como mezclas de detergentes y grasas. Para ello, determinó las proporciones de estas mezclas mediante un diseño factorial 2^2 y evaluó la transferencia de oxígeno en un reactor discontinuo mediante el método dinámico, mientras que la velocidad de consumo se midió con un respirómetro manométrico empleando agua residual

sintética, detergente y grasa animal como reactivos. El modelo considera que la degradación ocurre en tres fases sucesivas: una etapa inicial de hidrólisis con actividad microbiana mínima, una segunda fase asociada a la transformación del metabolito primario y una tercera etapa donde persiste una fracción más resistente a la degradación. Durante la fase de aclimatación, los microorganismos reducen su consumo de oxígeno debido a la presencia de detergentes y grasas, ocasionando variaciones en el orden de reacción, en los tiempos de adaptación y en las constantes cinéticas de la DBO. Con el fin de explicar estas alteraciones en la actividad biológica, Montoya introduce el concepto de DBO equivalente (DBO_{5+I}), que permite representar con mayor precisión el comportamiento de sistemas afectados por sustancias que interfieren en la degradación orgánica.

Martínez de la Rosa (2012) menciona: Solamente es necesario utilizar el tripolifosfato de sodio para reducir la dureza del agua hasta cero miligramos por litro, y el costo respectivo de la siguiente forma:

Figura 1

Consumo de ablandadores de agua para ajustar dureza a cero partes de millón

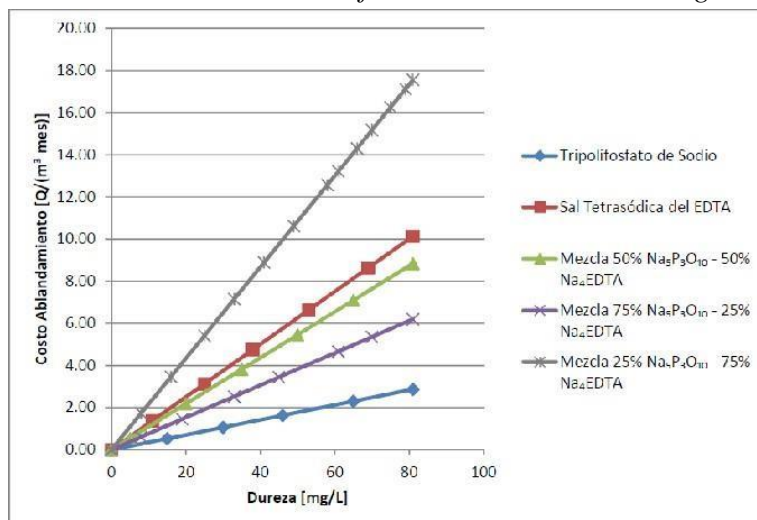


La Figura 1 se desprende que la ecuación del consumo de ablandamiento del agua en función de la dureza y la cantidad de agua para tripolifosfato de sodio, mediante la ecuación: $Y = 3,2182 (x)(z)$. Donde: Y= cantidad de ablandador de agua(g), x= dureza [mg/L], z = cantidad de agua utilizada [m³].

Nota. Reproducido de *Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor* (Figura 12), por Martínez de la Rosa, A. (2012).

Figura 2

Costo de ablandamiento en función de la dureza del agua de alimentación



La Figura 2 se desprende que la ecuación del costo de ablandamiento del agua en función de la dureza y la cantidad de agua utilizada mensualmente para tripolifosfato de sodio, mediante la ecuación: $Y = 0.00354$

(x)(z). Donde: Y=costo mensual de ablandamiento [Q/mes, x= dureza [mg/L], z = cantidad de agua utilizada mensualmente [m³/mes].

Nota. Reproducido de *Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor* (Figura 13), por Martínez de la Rosa, A. (2012).

Zadeh et al. (2010) expone en su estudio una propuesta innovadora para la gestión descentralizada de aguas grises en la zona de Birmingham Eastside, Reino Unido, donde plantea un sistema integrado que permita recolectar, tratar y redistribuir este tipo de efluente según las necesidades específicas de distintos tipos de edificaciones. El autor sugiere que el agua gris generada en áreas residenciales podría someterse a un tratamiento local y ser conducida posteriormente hacia edificios de oficinas para usos secundarios —como descargas sanitarias o limpieza—, y que, tras un nuevo ciclo de aprovechamiento, el residual resultante podría destinarse a la irrigación de áreas verdes adyacentes, optimizando así su valor hídrico antes de su disposición final. Este modelo escalonado de reutilización permitiría maximizar el rendimiento del recurso, reducir significativamente la demanda de agua potable y mejorar la relación costo-beneficio del sistema. No obstante, Zadeh advierte que su implementación es viable principalmente en contextos urbanos donde exista proximidad funcional entre viviendas, oficinas, instituciones educativas u otras edificaciones que permitan cerrar el ciclo del agua gris de manera eficiente, siendo su éxito dependiente de la infraestructura existente y de la planificación urbana que facilite la interconexión entre generadores y usuarios del recurso tratado.

McIlwaine y Redwood (2010) analizan el caso del noreste de Badia, en Jordania, una región caracterizada por una marcada aridez y una disponibilidad hídrica extremadamente limitada, situación que ha impulsado a sus habitantes a incorporar el reúso de aguas grises como una estrategia para sostener actividades agrícolas básicas. Los autores explican que, debido a

prácticas culturales y religiosas que demandan un lavado exhaustivo posterior a la defecación, la reducción del consumo doméstico de agua resulta particularmente compleja, lo que hace del reúso una alternativa más viable. En este contexto, no se aplica un tratamiento avanzado a las aguas grises; en cambio, se opta por la simple separación de tuberías que conducen las aguas negras por un lado y las aguas grises por otro, de modo que estas últimas puedan utilizarse directamente en el riego de cultivos o ser infiltradas en el terreno. Este caso evidencia que la aceptación y aplicación de sistemas de reúso no dependen únicamente de criterios técnicos o económicos, sino que están profundamente vinculados a factores socioculturales y creencias religiosas, los cuales influyen de manera decisiva en la forma en que las comunidades adoptan o rechazan tecnologías de gestión del agua.

Soto (2010) desarrolló un estudio en la ciudad de Tijuana orientado a evaluar la aceptación social y la disposición de pago por la incorporación de sistemas domésticos para el tratamiento de aguas grises. Los resultados evidenciaron que los futuros compradores de viviendas estarían dispuestos a integrar un sistema de este tipo siempre que existieran mecanismos que facilitaran su adquisición, financiamiento y uso, incluyendo programas de capacitación que permitieran operar adecuadamente el equipo. La investigación resalta que, aunque existe un interés real por mejorar la eficiencia en el consumo de agua mediante tecnologías de reúso, aún persisten vacíos importantes sobre los costos, la viabilidad a gran escala y los factores que influyen en la decisión de los usuarios, aspectos que requieren ser explorados en estudios posteriores para consolidar su implementación en el ámbito doméstico.

Contreras (2009) plantea en su tesis el diseño de un sistema automatizado para el tratamiento de aguas grises domésticas mediante un filtro de arena instalado en una vivienda de Quito,

Ecuador. El autor destaca que el principal aporte del proyecto radica en la automatización del proceso, lo cual reduce la necesidad de intervención manual y mejora la comodidad del usuario. Sin embargo, el estudio se concentró fundamentalmente en el aspecto técnico-operativo del sistema, dejando de lado un análisis integral de los costos de instalación, mantenimiento y operación. Debido a esta ausencia de evaluación económica, el autor advierte que, aunque el sistema es funcional desde el punto de vista tecnológico, su adopción no puede considerarse viable sin un estudio financiero que permita determinar su sostenibilidad y competitividad frente a otras alternativas de tratamiento.

Maldonado (2008) desarrolló una investigación enfocada en la eliminación de detergentes aniónicos del tipo sulfato disuelto en agua, evaluando su comportamiento tanto en sistemas agitados como en columnas empacadas. A partir de los ensayos de adsorción, el autor determinó que el carbón activado obtenido del cuesco de palmiste presenta una capacidad sobresaliente para remover Lauril Sulfato de Sodio, alcanzando eficiencias de hasta 92,5% en configuraciones de lecho agitado. Asimismo, los experimentos en columna empacada demostraron que este material adsorbente es capaz de reducir la concentración del surfactante hasta el límite máximo admisible de 0,5 mg/L en un periodo operativo continuo de 26 días, trabajando con un caudal de 6 cm³/min. Estos resultados confirman que el carbón activado de cuesco de palmiste constituye una alternativa altamente efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con detergentes aniónicos, especialmente en sistemas donde se requiere mantener niveles de remoción elevados durante largos periodos de operación.

Casallas y Ibañez Acosta (2008) llevaron a cabo un estudio orientado al diseño y evaluación de un sistema piloto destinado a la remoción de detergentes aniónicos presentes en soluciones que simulan los vertimientos generados por una lavandería típica, con el propósito de disminuir la Concentración Letal Media (CL50-48) para *Daphnia pulex*. Mediante bioensayos toxicológicos, los autores determinaron la CL50-48 del detergente aniónico comercial ROTEX, de su componente activo LAS (Lauril Alquil Sulfato) y de varias marcas de detergentes domésticos ampliamente utilizados, como FAB TOTAL, ARIEL y DERSA. El experimento contempló la comparación entre una muestra cruda y otra sometida a un sistema de filtración compuesto por un filtro de arena seguido de un filtro de carbón activado de origen bituminoso. Los resultados demostraron que el sistema piloto logró reducir de manera significativa la concentración de surfactantes aniónicos en la solución tratada, alcanzando una eficiencia del 73%, lo que evidencia la capacidad del proceso de filtración para atenuar la toxicidad de efluentes asociados a actividades de lavado y mejorar su compatibilidad ambiental.

Franco Alvarado (2007) plantea como propósito central de su trabajo contribuir a mejorar la eficiencia en el uso de agua potable en Chile mediante la incorporación del reúso de aguas grises como medida para disminuir la demanda hídrica. Su investigación integra tres componentes fundamentales: revisión bibliográfica, experimentación y aplicación práctica, esta última materializada en el diseño de una planta de tratamiento de aguas grises. Para sustentar la propuesta, se desarrolló un análisis de estudios internacionales sobre caracterización de aguas residuales, tecnologías de tratamiento, riesgos asociados y posibles usos posteriores. Asimismo, el autor efectuó la primera caracterización formal de aguas grises reportada en el país, basada en muestras recogidas en viviendas de Calama y Vallenar, cuyos resultados mostraron alta concordancia con

las caracterizaciones reportadas en otras regiones del mundo, confirmando que las aguas grises poseen un comportamiento relativamente uniforme y predecible desde el punto de vista técnico.

Altmajer Vaz (2005) desarrolló un dispositivo experimental denominado Baño-Sustrato-Flujo (BSF), creado para analizar de manera controlada los fenómenos involucrados en el lavado de superficies duras y para optimizar formulaciones detergentes con aplicaciones específicas. Este sistema permite modificar de forma independiente los elementos clave del proceso detergente — como el tipo de sustrato, la naturaleza de la suciedad y la composición del medio de lavado— así como ajustar las condiciones hidrodinámicas, lo que posibilita simular el funcionamiento de equipos industriales de limpieza. Los resultados obtenidos demostraron que el BSF es altamente sensible a variaciones en temperatura, caudal, concentración de detergente y composición del formulado, generando respuestas experimentales coherentes con la literatura existente para diferentes tipos de suciedad, especialmente grasas. Gracias a su reproducibilidad, este dispositivo se consolida como una herramienta robusta para el diseño y evaluación de detergentes.

Castañeda Castro (2004) estudiaron la remoción de hierro, manganeso y detergentes presentes en agua mediante un sistema combinado de arena verde de manganeso y carbón activado. En los ensayos de adsorción utilizando carbón activado, los autores reportaron una remoción del 85% del contenido de detergente en muestras tratadas en columnas de carbón activado. Así mismo, el monitoreo del efluente durante ocho semanas permitió determinar que la columna lograba reducir la concentración final del detergente a 0,535 mg/L bajo un caudal operativo de 7,6 cm³/min. Estos resultados evidencian que el tratamiento basado en carbón activado constituye una alternativa eficaz para disminuir significativamente la presencia de compuestos tensoactivos en agua, contribuyendo al mejoramiento de su calidad para usos posteriores o disposición final.

Triguero Mamani (2021) evaluó un método avanzado para cuantificar saponinas en semillas de quinua mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS), estableciendo un factor de conversión preciso entre sapogeninas y saponinas. Para ello, primero aisló e identificó las sapogeninas mayoritarias del mojuelo de quinua y obtuvo sus derivados trimetilsililo mediante una reacción de sililación, proceso que permitió preparar soluciones estándar de distintas concentraciones para construir curvas de calibración basadas en regresión lineal entre el área de los picos cromatográficos y la concentración. Posteriormente, se extrajeron sapogeninas de siete variedades de quinua utilizando diferentes métodos de extracción y beneficiado, y tras realizar hidrólisis ácida y derivatización, los derivados fueron analizados por GC/MS para determinar la concentración individual de sapogeninas. El estudio también produjo un extracto purificado de saponinas que permitió establecer la ecuación de conversión $\% \text{Saponina} = 8,471 \times \% \text{Sapogenina}$. Los resultados indicaron que el contenido de saponinas en las variedades analizadas fluctuó entre 0,8% y 1,4%, valores superiores a los límites permitidos por la Norma Boliviana NB NA 0038 (<0,12%), lo que confirma que estas muestras requieren procesos de beneficiado para cumplir con estándares de calidad alimentaria.

2.2.2. Antecedentes Nacionales

Céspedes Cayo, Chamorro Buleje y Oré Toribio (2019) desarrollaron una investigación orientada al diseño de un detergente enzimático específicamente formulado para remover el fouling acumulado en las mallas de las piscigranjas ubicadas en la laguna de Chacacancha, en la región Pasco, trabajo que contó con el apoyo técnico de la Piscigranja Monte Azul para la recolección de muestras. A partir del análisis químico del fouling —en el que se identificó la presencia predominante de proteínas (0,35%), grasas (2,75%), fibras (0,84%) y carbohidratos (2,11%)— se seleccionaron las enzimas y los tensoactivos biodegradables más

apropiados, así como componentes auxiliares de bajo costo como glicerina, trietanolamina, carbonato de sodio, propilenglicol, cloruro de calcio y agua. La remoción del biofouling fue evaluada mediante ensayos en un equipo Jar Test, el cual permitió mantener condiciones controladas de agitación y fricción entre el material adherido y la solución detergente. El estudio experimental incluyó nueve formulaciones basadas en el diseño Taguchi, identificándose que el porcentaje de tensoactivo era la variable con mayor influencia en la eficiencia de limpieza y que presentaba interacciones relevantes con la velocidad de agitación y la concentración enzimática. A partir del análisis estadístico se determinaron los niveles óptimos para la formulación final: 20% de tensoactivo, 2% de enzima y 92 rpm de agitación, con lo cual se preparó el detergente definitivo. Finalmente, su biodegradabilidad fue confirmada mediante la relación DBO/DQO del efluente resultante (0,42), valor que evidencia un comportamiento compatible con los criterios ambientales y una estabilidad fisicoquímica adecuada en el tiempo.

Núñez Venegas (2013), en su tesis de posgrado en Ingeniería Química, investigó la optimización del comportamiento térmico de un reactor continuo de tanque agitado (CSTR) mediante la aplicación de un algoritmo correlacional interactivo capaz de mejorar la eficiencia operativa del sistema. El autor empleó un algoritmo basado en la iteración numérica del conjunto de ecuaciones diferenciales que describen las variables dinámicas del reactor, utilizando el método de Euler, mientras que un segundo algoritmo —sincronizado con dichas variables— procesaba y enviaba en tiempo real las respuestas simuladas. Ambos procedimientos fueron programados en el entorno Java Eclipse 3.0. Esta correlación interactiva permitió corregir de manera oportuna el comportamiento del reactor, facilitando la toma de decisiones y garantizando productos de mayor calidad con menores costos y tiempos de operación. La validación del algoritmo se realizó utilizando datos experimentales

de la reacción de saponificación entre acetato de etilo y NaOH, ampliamente descrita en la literatura, con una muestra de 2 593 segundos (43,2 minutos), un error del $\pm 2 \%$ y un nivel de confianza del 95 %. El resultado mostró que la máxima conversión se alcanzó a 304,6 K. Debido a las variaciones en flujos, concentraciones y temperatura de los reactantes, el estudio concluye que la eficiencia del refrigerante del reactor puede mejorarse significativamente mediante el algoritmo interactivo, demostrando que los cambios en las variables del proceso son proporcionalmente dependientes de la temperatura del fluido refrigerante.

Campos Napán (2018), en su tesis sobre la maximización de la reducción de saponinas en el escarificado de quinua mediante abrasión, aplicó la metodología de superficie de respuesta como herramienta estadística para optimizar el proceso. Para cuantificar el contenido de saponinas utilizó el método afrosimétrico establecido por INDECOPI (2014), expresando los resultados en porcentajes según la ecuación oficial del protocolo. Su investigación permitió identificar las combinaciones óptimas de fuerza abrasiva, tiempo y características del equipo de escarificado que favorecen la disminución significativa del contenido de saponinas, lo cual contribuye a mejorar la calidad del grano y reducir la necesidad de etapas posteriores de lavado, alineándose con los criterios de eficiencia industrial y uso racional de agua.

2.3. Bases Teóricas

La clasificación en niveles de dureza del agua se determina con respecto a la concentración de carbonatos.

La Tabla 1 muestra la clasificación de la dureza del agua según el contenido de CaCO_3 , indicando categorías desde muy suave hasta muy dura.

Tabla 1

Clasificación del agua en función de su calidad

<i>Denominación</i>	<i>mg/L de CaCO_3</i>
Muy suaves	0 - 15
Suaves	16 - 75
Medias	76 - 150
Duras	150 - 300
Muy duras	Mayor de 300

Nota. Adaptado de *Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor* (Figura 13), por Martínez de la Rosa, A. (2012).

2.3.1. Historia de los detergentes.

Se denomina detergente a las formulaciones complejas que son capaces de eliminar suciedades de las superficies duras y textiles. En la tabla se resumen la evolución histórica de los detergentes.

La evolución se inicia desde el uso del jabón y fue descrita por las tablas sumerias de Lagash (siglo XXII AC). Al inicio se preparaba con grasa vegetal o animal y cenizas de madera, los árabes en el siglo VII utilizaron cal viva para sustituir las cenizas de madera. Posteriormente con esta mejora se expandió a los países que colindan con el mar mediterráneo. En el siglo

XVII con el método Leblanc se utiliza el hidróxido de sodio, lo que permitió la obtención a escala industrial a un precio moderado. Luego la baja eficiencia del jabón fabricado en el año 1928 se consigue producir el primer detergente sintético en el mercado por Henkel en Alemania en 1932, y por Procter & Gamble en EEUU en 1933.

La escasa biodegradabilidad del tetrapropileno benceno sulfonato motivo su sustentación en Europa y Estados Unidos del alquilbenceno sulfonatos lineales, altamente biodegradables. La historia de los detergentes biodegradables con saponinas de quinua es una combinación del uso tradicional ancestral y la investigación científica moderna en busca de alternativas ecológicas.

Desde hace cientos de años, las culturas andinas de Sudamérica, donde la quinua es originaria (Perú y Bolivia principalmente), han utilizado las saponinas presentes en la cáscara del grano de quinua para fines de limpieza.

- Poder de Limpieza: Las saponinas son glucósidos triterpenoides con propiedades surfactantes, espumantes y detergentes naturales.
- Aplicación Doméstica: Tradicionalmente, se frotaba el grano o la cascarilla con agua para generar espuma, utilizando este líquido para lavar ropa, el cabello y el cuerpo, aprovechando su eficacia y suavidad.

El desarrollo de detergentes biodegradables a base de saponinas de quinua como un producto comercial o industrializado es un fenómeno más reciente, impulsado por la creciente conciencia ambiental y la necesidad de sustituir los tensoactivos químicos sintéticos de los detergentes comunes.

La siguiente Tabla 2 muestra los niveles de desarrollo de los productos de detergentes en función periodos históricos.

Tabla 2*Desarrollo histórico de los productos detergentes*

Período histórico	Nivel de desarrollo de los productos detergentes
Antes del 2100 a. C.	No existe constancia de productos específicamente desarrollados. El lavado se realiza por acción mecánica, posiblemente con ayuda de limos fluviales o cenizas de madera.
2100 a. C	Tablas de Lagash (Sumeria). Primer registro documental de la preparación de jabón a partir de aceite de oliva y cenizas.
1000 a. C.	Jabón preparado a partir de grasa animal y natrón (carbonato sódico) en Egipto
700	Los árabes utilizan cal viva en vez de cenizas en la preparación de jabón, mejorando su calidad. Se incorporan fragancias.
1700	Obtención de jabones sódicos baratos gracias al proceso Leblanc. El uso del jabón se populariza.
1900	Incorporación al jabón de silicatos y productos blanqueantes como el perborato. La nueva formulación (primera formulación detergente comercial) es comercializada en Alemania bajo el nombre de “Persil” (Henkel).
1928	Desarrollo de la primera sustancia tensioactiva sintética, los sulfatos de alcoholes grasos, como sustituto del jabón.
1928 - presente	Nuevas sustancias tensioactivas van siendo desarrolladas con el objeto de mejorar las propiedades de las anteriores desde el punto de vista de su eficacia detergente, impacto ambiental y factores económicos. Se incorpora una gran variedad de componentes (coadyuvantes, blanqueantes y aditivos) en las formulaciones para incrementar su eficacia.

Nota. Adaptado de *Hidrólisis enzimática de triglicéridos en emulsiones O/W. Aplicación a formulaciones detergentes (Tabla 2.4)*, por García Román, M. (2005).

Por los escasos del petróleo y la sostenibilidad del ambiente se opta por utilizar las tensoactivas saponinas provenientes de la cáscara de la quinua.

2.3.2. Saponinas

Las saponinas son compuestos de tipo glucósido presentes en numerosas especies vegetales. Su nombre proviene del género *Saponaria*, planta cuyas raíces se han empleado tradicionalmente como agente de limpieza por su notable capacidad para producir espuma en contacto con el agua (Sparg et al., 2004).

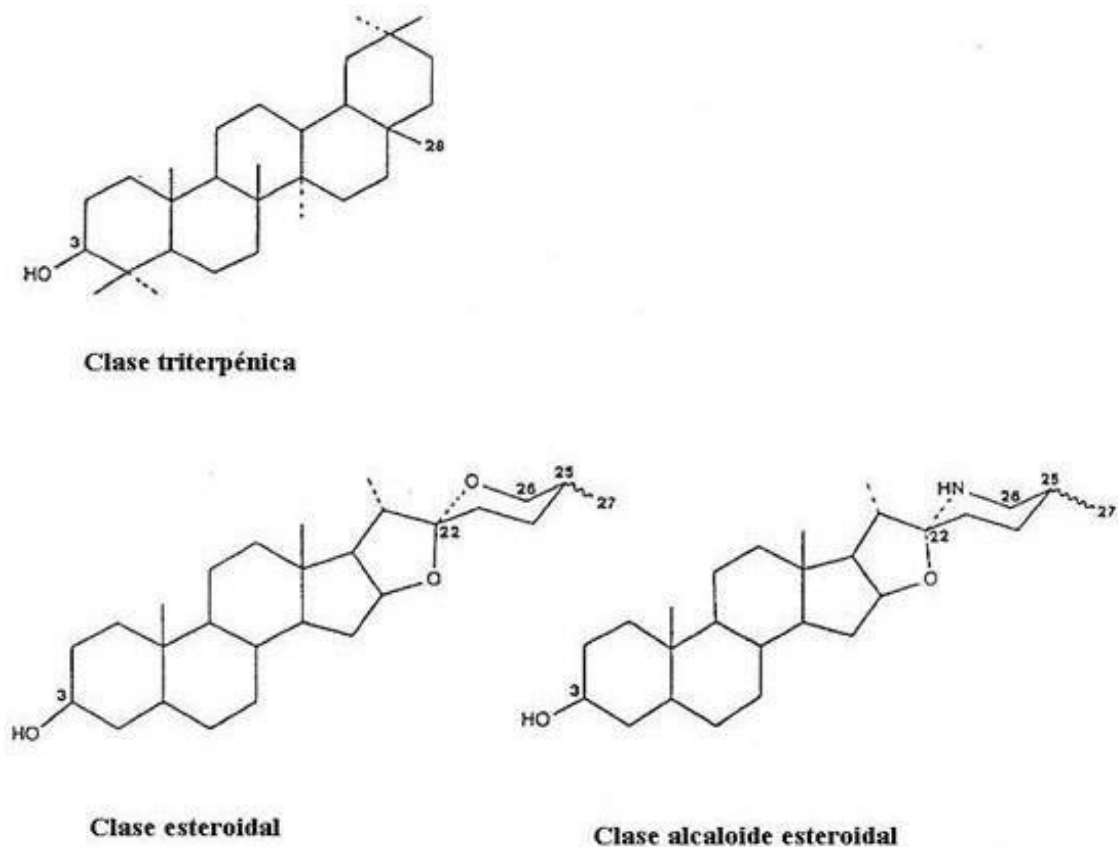
Las saponinas pueden pertenecer a dos grandes grupos estructurales: los glucósidos esteroideos y los glucósidos triterpenoides, siendo estos últimos los más frecuentes en plantas superiores y en cultivos de importancia agronómica (Zhu et al., 2002).

En el caso específico de la quinua, estas moléculas se concentran en las capas externas del grano, donde actúan como compuestos de defensa natural. Desde el punto de vista químico, se caracterizan por su elevado peso molecular y por estar formadas por un núcleo policíclico unido de manera covalente a uno o varios residuos de azúcares.

La propiedad distintiva de las saponinas es su capacidad tensioactiva, que les permite generar espumas estables en soluciones acuosas. Esta función deriva de su estructura molecular, compuesta por una aglicona policíclica —denominada sapogenina o genina— enlazada a cadenas de carbohidratos. La sapogenina, que constituye la porción no azucarada, puede corresponder a un esteroide (C27), un alcaloide esteroideal (C27) o un triterpeno (C30). Su comportamiento surfactante se explica por la interacción entre la parte hidrofóbica de la aglicona y la fracción hidrofílica de los azúcares, combinación que confiere a las saponinas su capacidad para formar espuma, emulsionar y reducir la tensión superficial del agua.

Figura 3

Tipos de esqueletos de geninas encontradas en las 3 clases principales de saponinas

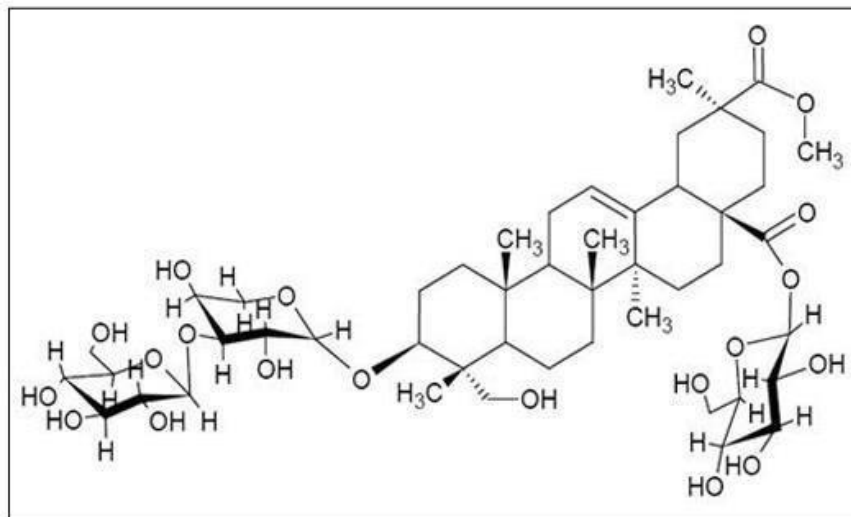


Nota. Reproducido de *Extracción, cuantificación y purificación de saponinas de semillas de Chenopodium quinoa Willd provenientes del Noroeste argentino* (Figura 9), por Gianna, V. (2013).

Las cuatro saponinas más importantes de la quinua, según (Kuljanabagavad et al., 2008) son las siguientes:

Figura 4

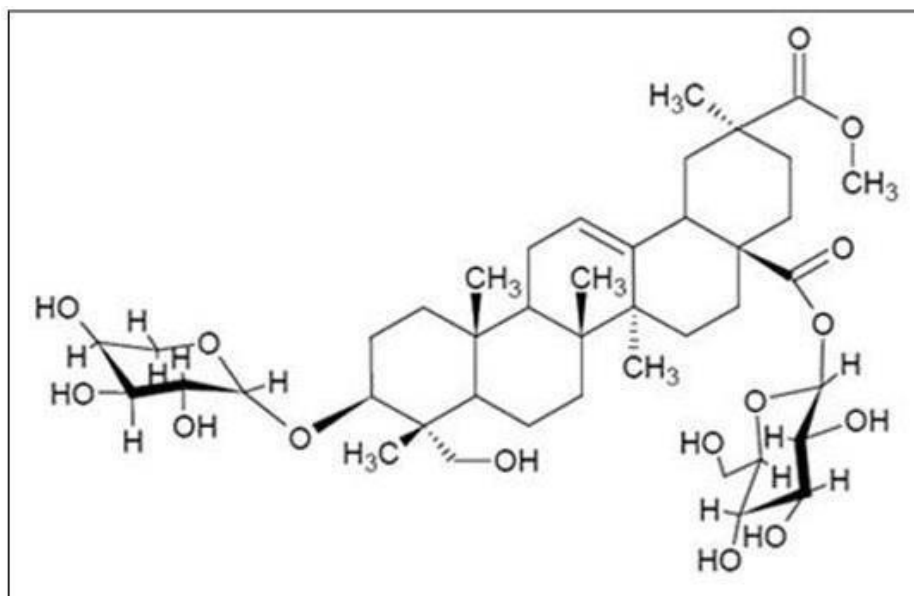
Aglicón: ácido fitolacagénico, sustituyente en el C-3 β -D-Glc (1 $\rightarrow$ 3)- α -L-Ara



Nota. Fórmula química: $C_{48}H_{76}O_{20}$. Reproducido de *Extracción, cuantificación y purificación de saponinas de semillas de Chenopodium quinoa Willd provenientes del Noroeste argentino* (Figura 13), por Gianna, V. (2013).

Figura 5

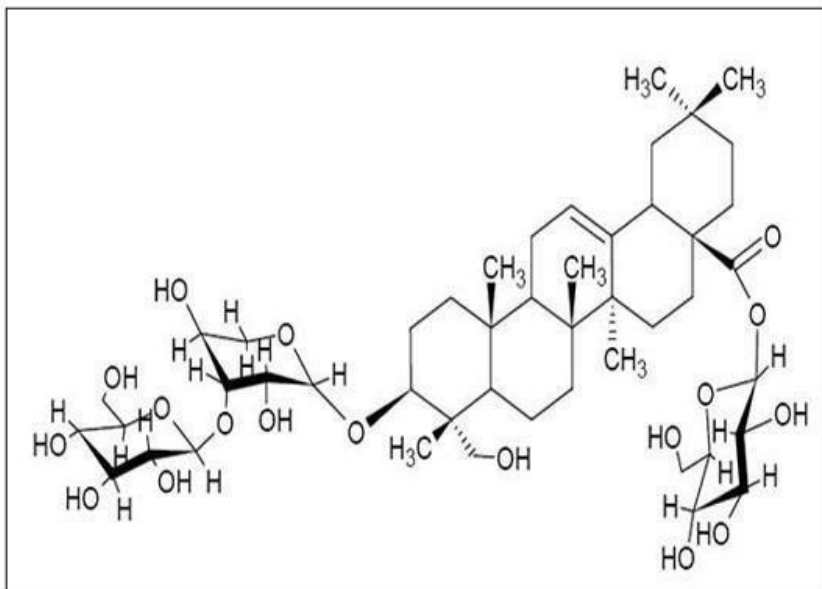
Aglicón: ácido fitolacagénico y un sustituyente en el carbono 3: α -L-Ara



Nota. Fórmula química: $C_{42}H_{66}O_{15}$. Reproducido de *Extracción, cuantificación y purificación de saponinas de semillas de Chenopodium quinoa Willd provenientes del Noroeste argentino* (Figura 14), por Gianna, V. (2013).

Figura 6

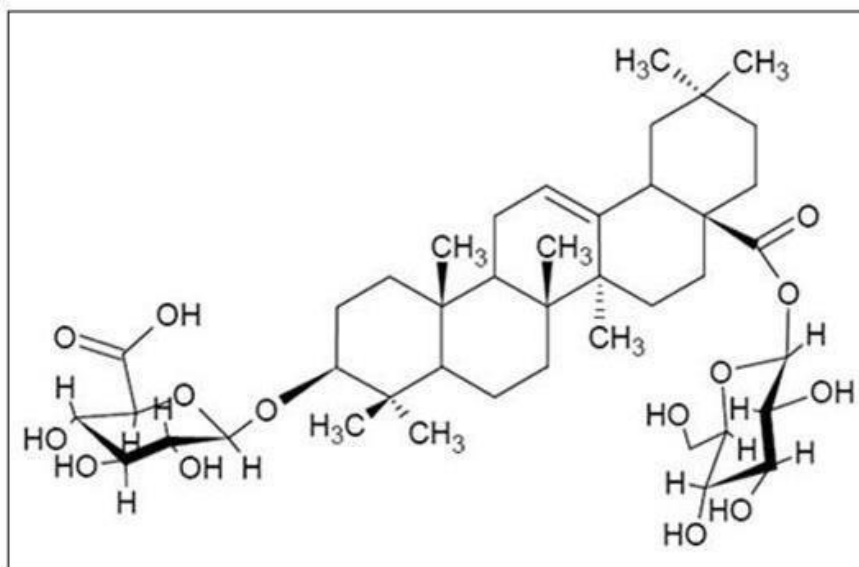
Aglicón: hederagenina y con un sustituyente en el carbono 3: β -D-Glc (1 3)- α -L-Ara



Nota. Fórmula química: $C_{47}H_{76}O_{18}$. Reproducido de *Extracción, cuantificación y purificación de saponinas de semillas de Chenopodium quinoa Willd provenientes del Noroeste argentino* (Figura 15), por Gianna, V. (2013).

Figura 7

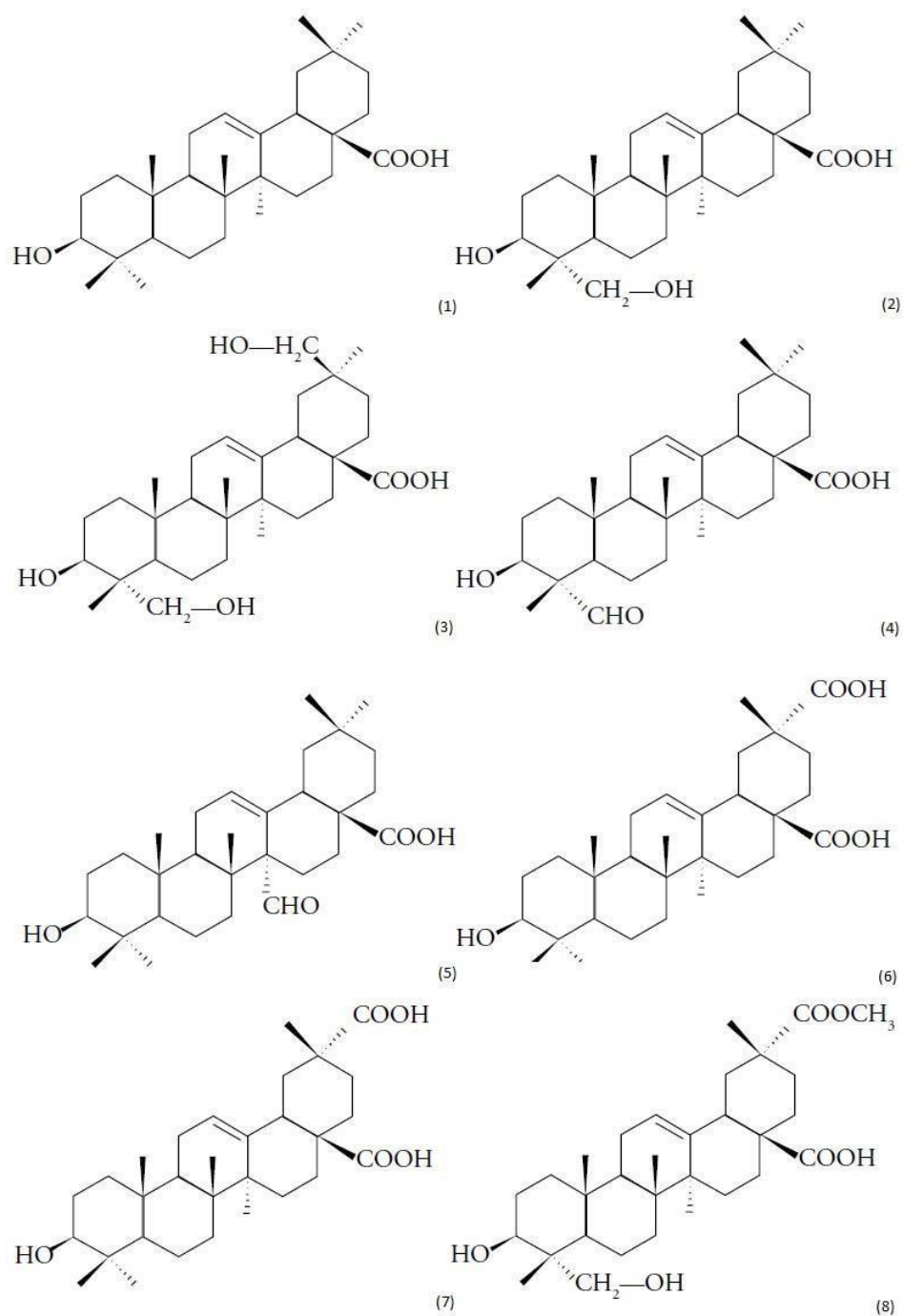
Aglicón del ácido oleanólico con un sustituyente en el carbono 3: β -D GlcA



Nota. Fórmula química: $C_{42}H_{66}O_{14}$. Reproducido de *Extracción, cuantificación y purificación de saponinas de semillas de Chenopodium quinoa Willd provenientes del Noroeste argentino* (Figura 16), por Gianna, V. (2013).

Figura 8

Estructuras de agliconas de saponinas elucidadas en quinua



Nota. La Figura 8 presentó las siguientes agliconas: 1) Ácido oleanólico; 2) Hederagenina; 3) Ácido 3 β ,23,30-trihidroxi olean-12-eno-28-oico; 4) Gipsogenina; 5) Ácido 3 β -hidroxi-27-oxoolean-12-eno-28-oico; 6) Ácido espergulagénico; 7) Ácido serjanico; y 8) Ácido fitolacagénico. Reproducido de *Saponinas de quinua (Chenopodium quinoa Willd.): un subproducto con alto potencial biológico* (Figura 6), por Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., y Benítez, R. (2016).

La Tabla 3, reunió de manera sistemática todas las saponinas que han sido aisladas e identificadas en *Chenopodium quinoa* desde 1988, abarcando estudios realizados en diversas partes de la planta y empleando diferentes enfoques analíticos. Asimismo, la figura 6 presenta las estructuras químicas de las agliconas caracterizadas. Para obtener estas moléculas, los investigadores recurrieron a múltiples métodos de extracción propios de la química de productos naturales, incluyendo percolación, maceración, calentamiento en reflujo y extracción Soxhlet. Posteriormente, los extractos crudos fueron fraccionados mediante técnicas cromatográficas de distinta resolución —baja, media y alta— aplicadas bajo diversas modalidades, como filtración en gel, cromatografía de intercambio iónico y adsorción tanto en fase normal como en fase reversa. La elucidación estructural se llevó a cabo utilizando herramientas analíticas avanzadas, entre ellas espectrometría de masas por impacto electrónico (EI-MS) y técnicas unidimensionales y bidimensionales de resonancia magnética nuclear (RMN), como ^1H , ^{13}C , ^{13}C -DEPT y correlaciones heteronucleares y homonucleares. Este conjunto metodológico permitió caracterizar con precisión la diversidad de sapogeninas y saponinas presentes en la quinua.

Aunque comúnmente se asocia la presencia de saponinas a las semillas de la quinua, también se evidencia su presencia en otras estructuras de la planta como frutos, flores y hoja, pero, en proporciones diferente: 9/1000 gramos en hojas y en menor proporción en las flores y frutos (Ahumada et al., 2016). Estudios previos han mostrado diferencias notorias en su concentración cuando se comparan hojas y semillas, particularmente cuando se evalúan las sapogeninas como indicadores. Mastebroek et al. (2000) en un experimento invernadero observaron que, en genotipos dulces, el contenido de sapogeninas en hojas aumenta significativamente hasta 82 días después de la siembra, etapa que coincide con la floración.

En el caso de las semillas de genotipos amargos, las saponinas alcanzaron valores promedios de 4,7 - a 11.3 g/kg en base seca, cifra nueve veces mayor a la registrada en hojas y 32 veces superior a la encontrada en semillas de genotipos dulces. Dicho estudio también determinó que la hederagenina es la saponina predominante en hojas, mientras que los ácidos oleanólico y serjánico dominan en las semillas.

Además, es relevante considerar que diferentes variedades de quinua exhiben variaciones sustanciales en su contenido de saponinas, tal como lo resume la tabla 3. Aunque la mayoría de muestras proceden de la región andina —área de domesticación y mayor diversidad genética—, ya se están realizando ensayos en otras zonas geográficas, como Dinamarca y China, con el fin de evaluar la adaptabilidad del cultivo y su perfil fitoquímico. De acuerdo con los contenidos reportados, la mayor parte de las variedades analizadas se catalogan como amargas, ya que superan el umbral de 0,11% de saponinas. Esta característica, frecuentemente considerada indeseable desde la perspectiva alimentaria, representa sin embargo una oportunidad industrial valiosa, pues convierte a la cáscara del grano en un subproducto con alto potencial para la obtención de saponinas destinadas a aplicaciones detergentes, cosméticas o farmacológicas.

Diversos trabajos recientes han resaltado que la distribución y concentración de saponinas en la quinua están fuertemente influenciadas por factores genéticos, ambientales y fisiológicos. La altitud, la radiación solar, la disponibilidad hídrica y la composición del suelo han demostrado modificar la biosíntesis de saponinas, modulando tanto su cantidad como su perfil químico. Variedades cultivadas a mayor altitud suelen presentar niveles más elevados de saponinas, lo que sugiere que estos compuestos cumplen roles protectores frente

a condiciones de estrés, como temperaturas extremas o radiación intensa. A nivel celular, se ha demostrado que las saponinas participan en mecanismos de defensa natural contra insectos, microorganismos y herbívoros, reforzando la importancia ecológica de estos metabolitos.

Esta variabilidad intrínseca representa un desafío para la estandarización industrial, pero al mismo tiempo ofrece oportunidades para seleccionar variedades específicas con fines tecnológicos o comerciales.

El creciente interés por el aprovechamiento sostenible de la quinoa ha impulsado investigaciones orientadas a la valorización de subproductos ricos en saponinas, particularmente de la cáscara, la cual representa una fracción significativa del grano que a menudo se desecha tras el proceso de escarificación. Dado que la mayoría de variedades son clasificadas como amargas, el volumen de cáscara generada constituye una fuente abundante y renovable de saponinas, cuya extracción mediante métodos verdes —como la percolación acuosa o el uso de solventes ecológicos— está siendo ampliamente explorada.

Tabla 3

Estructuras de saponinas identificadas en quinua (Chenopodium quinoa Willd.)

Compuesto	Localización	Aglicona	Sustituyente
1	Fl, F, S, C	i	3-Glc-(1→2)-Ara, 28-Glc
2	S	i	3-GlcA
3	Fl, F, S, C	i	3-GlcA, 28-Glc
4	Fl, F, S, C	i	3-Glc-(1→2)-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
5	Fl, F, S, C	i	3-Xyl-(1→3)-GlcA, 28-Glc
6	S	ii	3-Xyl-(1→3)-GlcA, 28-Glc
7	Fl, F, S, C	ii	3-Ara
8	Fl, F, S, C	ii	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
9	S	ii	3-Glc-(1→4)-Glc-(1→4)-Glc, 28-Glc
10	Fl, F, S, C	ii	3-GlcA, 28-Glc
11	S	ii	3-Gal-(1→3)-Glc, 28-Glc
12	Fl, F, S, C	ii	3-Glc-(1→3)-Gal, 28-Glc
13	Fl, F, S, C	iii	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
14	Fl, F, S, C	iv	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
15	Fl, F, S, C	v	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
16	S	vi	3-Glc-(1→2)-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
17	S	vi	3-Ara-(1→3)-GlcA, 28-Glc
18	S	vii	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
19	Fl, F, S, C	vii	3-Glc-(1→2)-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
20	S	vii	3-Ara-(1→3)-GlcA, 28-Glc
21	Fl, F, S, C	vii	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
22	Fl, F, S, C	vii	3-Ara, 28-Glc
23	Fl, F, S, C	vii	3-GlcA, 28-Glc
24	Fl, F, S, C	viii	3-Glc-(1→3)-Gal, 28-Glc
25	Fl, F, S, C	viii	3-Ara, 28-Glc
26	S	viii	3-Ara-(1→3)-GlcA, 28-Glc
27	Fl, F, S, C	viii	3-Glc-(1→4)-Glc-(1→4)-Glc, 28-Glc
28	Fl, F, S, C	viii	3-Glc-(1→2)-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
29	Fl, F, S, C	viii	3-Glc-(1→3)-Ara, 28-Glc
30	S	viii	3-Glc-(1→3)-Ara
31	S	viii	3-Gal-(1→3)-Glc, 28-Glc

Fl: Flor; F: fruto; S: semilla; C: cáscara.

Nota. Reproducido de *Saponinas de quinua (Chenopodium quinoa Willd.): un subproducto con alto potencial biológico* (Tabla 1), por Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., y Benítez, R. (2016).

Estos compuestos presentan un enorme potencial en la formulación de detergentes biodegradables, productos cosméticos, agentes espumantes y hasta bioinsecticidas, alineándose con las tendencias globales de sustitución de tensioactivos sintéticos por alternativas naturales. Además, la revalorización de estos subproductos podría contribuir a mejorar la rentabilidad del cultivo y reducir el impacto ambiental de los procesos de beneficiado, integrándose perfectamente en esquemas de economía circular.

2.3.3. Composición del detergente biodegradable

La composición de un detergente biodegradable formulado a partir de saponinas se basa en la combinación de un agente tensioactivo natural —las saponinas de quinua— y distintos componentes funcionales que optimizan su desempeño. Las saponinas actúan como el elemento principal responsable de la reducción de la tensión superficial, permitiendo la remoción efectiva de la suciedad. Sin embargo, su eficacia se potencia mediante la presencia de coadyuvantes, aditivos y sustancias auxiliares, tal como se indica en los lineamientos de fabricación de detergentes en polvo descritos por (Gavilán, 2011). La mezcla equilibrada de estos compuestos determina la estabilidad del producto, su poder limpiador, su biodegradabilidad y sus propiedades fisicoquímicas en condiciones reales de uso.

En la formulación de detergentes biodegradables basados en saponinas extraídas de quinua, los coadyuvantes cumplen un papel esencial al complementar o reforzar la acción del tensioactivo natural. Entre los coadyuvantes más empleados se encuentran el citrato de sodio, utilizado como agente secuestrante para disminuir la dureza del agua y evitar la interferencia de iones calcio o magnesio; el bicarbonato y el carbonato de sodio, que actúan como reguladores de pH y mejoran la capacidad desengrasante; y la glicerina, que contribuye

a estabilizar la mezcla y favorece la solubilidad de los componentes. Asimismo, la incorporación de enzimas permite degradar manchas específicas de origen proteico, lipídico o carbohidrato, aumentando la eficiencia detergente incluso en condiciones de baja temperatura. El alcohol etílico, por su parte, funciona como solvente auxiliar que facilita la homogenización del detergente y mejora la liberación de las saponinas durante el proceso de lavado. La presencia combinada de estos coadyuvantes no solo aumenta la capacidad limpiadora del producto, sino que también realza su perfil biodegradable, posicionándolo como una alternativa sostenible frente a los detergentes convencionales basados en tensioactivos sintéticos.

La eficiencia del proceso de detergencia depende de múltiples variables que interactúan simultáneamente durante el lavado. Entre los factores más influyentes se encuentran la naturaleza de la superficie a limpiar —ya sean materiales duros o textiles—, la dureza del agua, el tipo y composición de la suciedad, la calidad y cantidad de coadyuvantes presentes, la temperatura del baño, el tiempo de lavado y las condiciones hidrodinámicas del sistema. Adicionalmente, la presencia de electrolitos puede inhibir la acción del detergente al afectar la estabilidad de las micelas (Davis et al., 2003); el pH del baño influye de manera directa en la ionización del tensioactivo y en la desnaturalización de las manchas (Woollatt, 1985); la capacidad espumante tiene efectos sobre la percepción sensorial del lavado pero también sobre la eficiencia del proceso (Pérez, 1996); y el método aplicado —ya sea manual o mecanizado— condiciona la intensidad de la fricción y, por tanto, la remoción final de la suciedad (Gordin et al., 1997). Todos estos factores deben ser considerados al momento de modelar matemáticamente la acción del detergente y optimizar su formulación.

2.3.4. Mezcla

El problema del diseño de experimentos de mezclas, es el resultado de mezclar diferentes componentes y que no existan reacciones químicas, es decir obtener un resultado que derive en la sinergia.

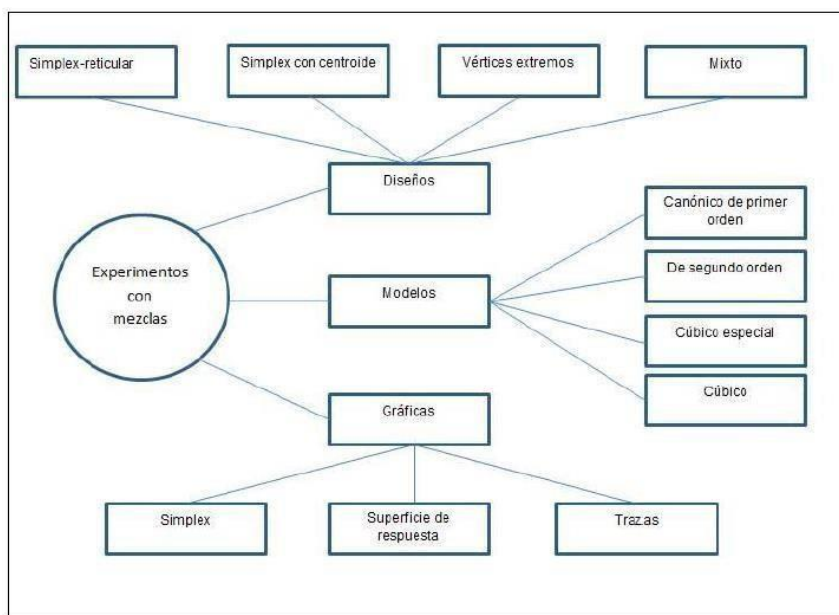
Los objetivos de los experimentos son tres:

- Cuál de los componentes es que tiene mayor influencia.
- En el caso del detergente en estudio, las saponinas será el de mayor influencia por la tensión superficial.
- Modelar las respuestas en función de las proporciones de los componentes de la mezcla para diversas evaluaciones termodinámicas.

Mediante los modelos determinar los porcentajes que deben concurrir los factores de la mezcla para lograr una sinergia adecuada.

Figura 9

Tipos de diseños de experimentos para mezclas

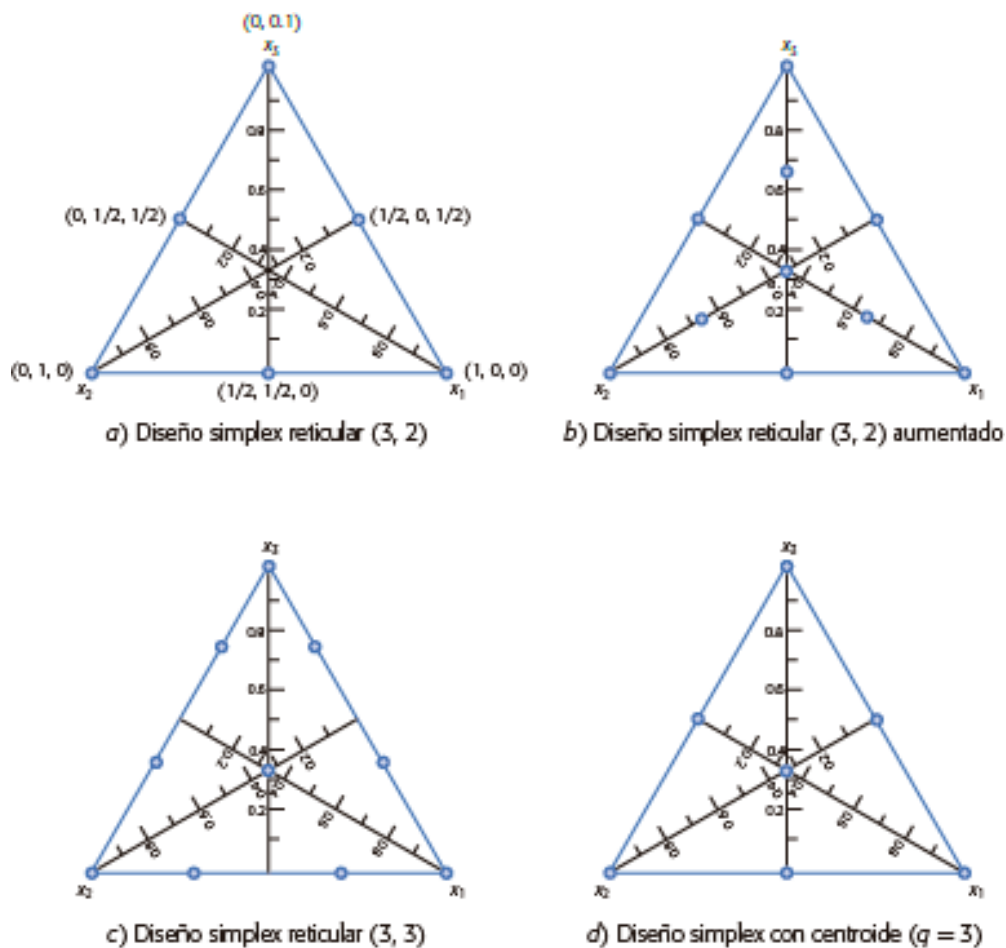


Nota: Reproducido de *Uso de la metodología del diseño por mezclas en el sector agrícola* (Figura 1), por Gómez Payán, M. J. (2015).

Las mezclas no deben hallarse con prueba y error, sino mediante un aporte de conocimientos, como el caso de los detergentes biodegradables, el cual la saponina actúa con la propiedad de la tensión superficial para separar la suciedad de las superficies, teniendo en cuenta la dureza del agua análisis es ayudado con el coadyuvante tripolifosfato de sodio.

Figura 10

Ejemplos de diseños simplex reticular y simplex con centroide con tres componentes



Nota. Reproducido de *Análisis y diseño de experimentos* (2.ª ed., Figura 15.3, p. 487), por Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar (2008).

2.3.5. Tratamiento de Aguas grises

Las aguas grises corresponden al conjunto de efluentes domésticos provenientes de actividades cotidianas como ducharse, lavarse las manos, realizar lavado de ropa, limpiar utensilios de cocina o utilizar lavaderos (Jefferson et al., 2004). Este tipo de agua residual constituye la principal oportunidad de reducir el consumo hídrico en el ámbito residencial, ya que puede representar entre el 50 % y el 80 % del total de agua utilizada en un hogar. Aunque en apariencia puede considerarse un recurso sin valor, su aprovechamiento mediante sistemas adecuados de tratamiento permite disminuir entre un 30 % y un 45 % el consumo de agua potable, además de contribuir a la preservación de acuíferos y disminuir la presión sobre los sistemas de alcantarillado y depuración (Gallo, 2010).

La reutilización y el reciclaje de aguas grises ha sido adoptada en múltiples países debido a los beneficios comprobados tanto para la conservación del recurso hídrico como para la reducción de contaminantes presentes en el ambiente (Jamrah et al., 2008). Este tipo de práctica permite reemplazar una proporción significativa del uso de agua no potable, favoreciendo modelos de consumo más sustentables (Liu et al., 2010). Históricamente, incluso organismos como la NASA evaluaron desde 1975 la posibilidad de reutilizar el agua proveniente de duchas y lavado de ropa para el llenado de sanitarios en misiones espaciales (Hypes et al., 1975). La experiencia acumulada a nivel mundial evidencia que la implementación de sistemas de reúso de aguas grises puede reducir entre un 30 % y un 50 % el consumo doméstico de agua potable, generando además ahorros económicos cercanos al 40 % en los hogares (Radcliffe & Page, 2020).

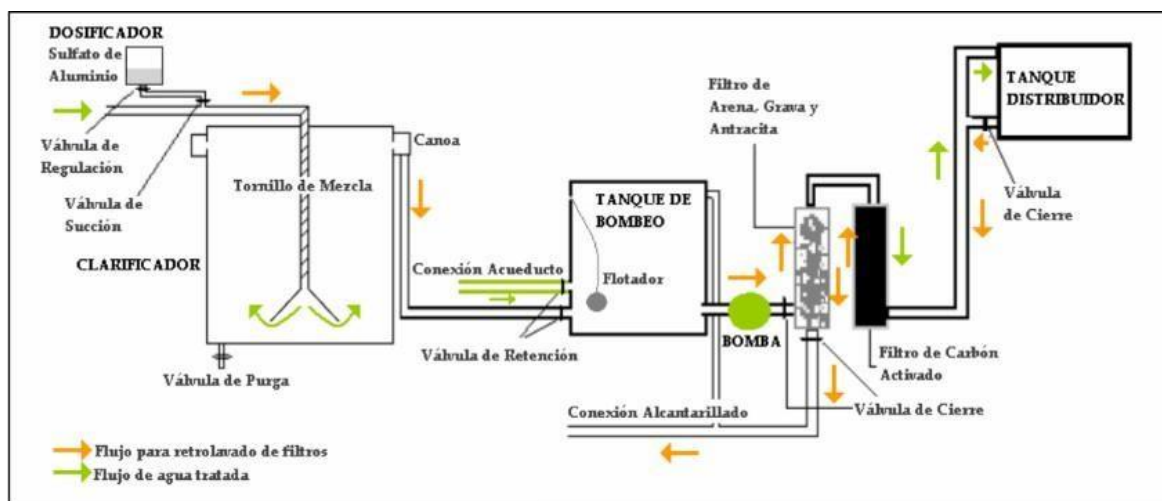
El tratamiento básico de las aguas grises puede lograrse mediante procesos de filtración mecánica combinados con la aplicación controlada de pequeñas cantidades de sulfatos, los

cuales favorecen la coagulación de partículas, la formación de grumos y la posterior sedimentación del material suspendido. Este tipo de intervención, simple pero eficiente, permite acondicionar el recurso para usos no potables y constituye la etapa inicial de numerosos sistemas domésticos o comunitarios de reúso.

El sistema seleccionado corresponde a la propuesta desarrollada por la Universidad de Medellín (2004), presentada durante el Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología realizado los días 29, 30 y 31 de octubre de ese año en la Universidad del Quindío, Armenia (Colombia). Este modelo tecnológico establece una secuencia integral para el tratamiento de aguas grises, iniciando desde su captación hasta su redistribución para diversos usos no potables dentro de la vivienda o en áreas externas.

Figura 11

Tratamiento de Aguas grises en Colombia



Nota. Reproducido de *Tratamiento y reutilización de aguas grises con aplicación a un caso en Chile*, (Figura 5.7), por Franco Alvarado, M. V. (2007).

El procedimiento comienza con la conducción de las aguas grises hacia un estanque clarificador, donde se dosifica sulfato de aluminio mediante un alimentador controlado. En

dicho punto, un tornillo mezclador garantiza la dispersión eficiente del coagulante, favoreciendo la aglomeración de partículas coloidales y la formación de flóculos. Una vez concluida esta etapa, la capa superficial del agua clarificada es transferida a un estanque de bombeo. Este depósito cuenta con un sistema de control por nivel que activa automáticamente la bomba cuando alcanza la altura establecida, garantizando una operación continua sin intervención manual.

Posteriormente, el agua es impulsada hacia una unidad de filtración compuesta por un filtro de medios mixtos —conformado por grava, arena y antracita— seguido de un filtro de carbón activado. La primera etapa remueve sólidos suspendidos finos, mientras que la segunda reduce compuestos orgánicos, olores y sustancias disueltas, mejorando de manera significativa la calidad del efluente. Después de completar la filtración, el agua tratada se almacena en un estanque distribuidor, desde donde se distribuye por gravedad hacia distintos puntos de uso: tanques de inodoros, lavaderos, lavadoras, áreas de lavado vehicular y sistemas de riego de jardines. Este diseño no solo optimiza el aprovechamiento del recurso hídrico, sino que también reduce el consumo de agua potable y alivia la carga de los sistemas de alcantarillado.

2.4. Marco Conceptual

- **Agitador mecánico.** - Son hélices que están dentro de un reactor y tienen velocidad radial que son impulsados por motores.
- **Aditivos.** - son los ingredientes del aceite que se encargan de la suciedad. Son los componentes que otorgan poderes extra a los aceites de motor. Los aditivos del aceite son indispensables para que los lubricantes cumplan su función correctamente.
- **Aguas grises.** – Son aguas residuales que provienen de los domicilios y que no contienen restos fecales.
- **Biodegradable.** – Residuos naturales que se descomponen fácilmente en el ambiente.
- **Coadyuvantes:** son componentes complementarios de un detergente o de un limpiador, que aportan propiedades particulares a las de los componentes fundamentales en la acción específica de limpieza.
- **Cuna a cuna** - Hace referencia a la necesidad de utilizar bienes y materiales durables en el tiempo que no terminen desechados cuando acabe su uso, sino que vuelvan a “la cuna”, es decir, que puedan reutilizarse íntegramente para algo nuevo una vez acabada la función para la que habían sido diseñados.
- **Ecosistema.** – El ecosistema es el conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y con su ambiente abiótico.
- **Laguna de sedimentación.** - Es cuando una función tiene igual pendiente a medida que se prolonga la recta.
- **Marco filosófico.** - Hace referencia a los principios éticos y epistemológicos. Los principios éticos se entienden como los fundamentos sobre los que se plantea un modo de actuar en el mundo y con los demás.

- **Método Leblanc.** - Este proceso constaba de dos etapas: producción de sulfato de sodio a partir de cloruro de sodio, para a continuación hacer reaccionar sulfato de sodio con carbón y carbonato de calcio para producir carbonato de sodio.
- **Modelamiento matemático.** - Un modelo matemático es un modelo que utiliza fórmulas matemáticas para representar la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones.
- **Reutilización.** - consiste en darle a un material la máxima vida útil.
- **Saponinas.** - Las saponinas son un tipo de metabolito secundario ampliamente estudiado por sus reconocidas propiedades biológicas.
- **Software.** - Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.
- **Tratamiento.** - Si la fuente del agua es superficial (agua de un río o lago), el tratamiento de potabilización suele consistir en un proceso de separación de ciertos componentes del agua natural, seguido de la precipitación de impurezas, filtración y desinfección con cloro u ozono.
- **Propiedades tensioactivas.** - Los tensioactivos tienen propiedades emulsionantes, humectantes, detergentes y espumantes.
- **Emulsionantes** y Dispersantes: tienen la capacidad de formar emulsiones. Una emulsión es una dispersión de un líquido en otro, los cuales serían inmiscibles de no ser por el agente tensioactivo.
- **Software.** - Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis de la investigación

3.1.1. Hipótesis General

El modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua influye significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

3.1.2. Hipótesis Específicas

El modelamiento matemático que correlaciona la composición de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua con el pH influye significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

Los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua influyen significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

La implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises es económicamente viable, ya que genera un costo por metro cúbico inferior al costo de adquisición del agua potable.

III.1.3. Matriz de consistencia

Tabla 4

Matriz de consistencia

Formulación del problema	Objetivos de investigación	Hipótesis de investigación	Procedimiento
Problema General ¿Es posible desarrollar un modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua, para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises?	Objetivo General Desarrollar un modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.	Hipótesis Principal El modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua influye significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.	• Modelamiento matemático del detergente biodegradable a base de saponinas de quinua. • Eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.
Problemas Específicos ¿En qué medida el modelamiento matemático correlaciona la composición del detergente a base de saponinas de quinua con el pH permite predecir el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises? ¿Cuáles son los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises? ¿Cuál es la viabilidad económica del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises en comparación con el costo del agua potable?	Objetivos Específicos Determinar el modelamiento matemático que correlaciona la composición del detergente a base de saponinas de quinua con el pH para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises. Determinar los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises. Determinar la viabilidad económica del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises mediante la comparación de sus costos operativos frente al costo de adquisición del agua potable.	Hipótesis Específicas El modelamiento matemático que correlaciona la composición de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua con el pH influye significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises. Los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua influyen significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises. La implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises es económicamente viable, ya que genera un costo por metro cúbico inferior al costo de adquisición del agua potable.	• Se generó una matriz de 20 filas y 6 variables en el software Minitab 22. • Los datos de la columna pH son deterministas en la matriz. • Los valores que limitan la composición del detergente biodegradable están en función al pH utilizando el software Minitab 22. • Se empleo la función Optimizador de Respuestas. • Análisis de Costos.

3.2. Variables de investigación

3.2.1. *Variable dependiente*

Eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

Definición 1: Este concepto se refiere al conjunto de procesos y tecnologías diseñadas para purificar las aguas grises y hacerlas aptas para su posterior uso. La "eficiencia" en este contexto, según Friedler (2004), esto implica lograr este proceso de manera que se maximice la conservación del agua, se reduzca el consumo de agua potable y se minimice la carga sobre los sistemas de alcantarillado y las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Definición 2: Se refiere a la capacidad técnica del sistema de tratamiento para reducir la carga contaminante del agua gris cruda hasta que el efluente cumpla con los parámetros de calidad (físico-químicos y sensoriales) requeridos para el uso específico no potable de riego de áreas verdes, según (Zapata Rosales, 2018).

Definición 3: En su estudio sobre la eco-eficiencia de tecnologías de tratamiento en Chile, señalan que los sistemas más eficientes son aquellos que reducen el impacto ambiental, como los biofiltros, en comparación con las tecnologías convencionales. Esto refuerza la idea de que la eficiencia no es solo purificación, sino también sostenibilidad (Abello-Passteni et al., 2020).

3.2.2. *Variable independiente*

Modelamiento matemático de la composición de un detergente biodegradable de saponinas a base de quinua.

Definición 1: En la publicación: Saponin Molecules from Quinoa Residues: Exploring Their Surfactant, Emulsifying, and Detergent Properties. Este trabajo no es de modelamiento matemático, pero sí explora las propiedades de las saponinas de quinua para la fabricación de detergentes ecológicos. Analiza su capacidad tensioactiva, emulsificante y detergente, lo que sienta las bases para futuros estudios de modelamiento (García Bustos et al., 2024).

Definición 2: El artículo Box–Behnken Design: Wet Process Optimization for Saponins Removal From Chenopodium quinoa Seeds and the Study of Its Effect on Nutritional Properties. Este estudio utilizó modelos matemáticos (como el diseño de Box-Behnken) para optimizar el proceso de remoción de saponinas de la quinua a través del lavado. Si bien el objetivo principal era mejorar la calidad nutricional de la quinua para el consumo, las técnicas de modelamiento son directamente aplicables al desarrollo de detergentes (El Hazzam et al., 2022).

Definición 3: Este estudio, si bien enfocado en la remoción de saponinas para consumo, utiliza el Diseño de Box-Behnken para optimizar el proceso, lo que demuestra la aplicación de modelamiento matemático para la quinua. Este tipo de diseño experimental es comúnmente analizado con programas como Minitab 22 (El Hazzam et al., 2022).

3.2.3. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 5

Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
VARIABLE INDEPENDIENTE: Modelamiento matemático de la composición de un detergente biodegradable a base de saponinas de quinua	En su trabajo "Obtención de detergente líquido usando saponina de quinua...", publicado en la revista <i>Perfiles</i>, estos autores exploraron la obtención de un detergente a partir de saponinas de quinua. Aunque se centran más en el proceso de extracción y la caracterización físico-química del producto, sus hallazgos son fundamentales para cualquier modelamiento posterior. Es decir, proporcionan los datos y parámetros iniciales (como el pH, la densidad, el % de materia activa) que un modelo matemático necesitaría para funcionar (Villacrés et al., 2019).	Se calculo mediante la optimización de procesos y productos mediante experimentos diseñados mediante una versión actualizada y completa de las metodologías de superficie de respuesta. Este trabajo es una referencia clave para cualquiera que quiera desarrollar una definición operacional basada en el modelamiento matemático para la optimización de un producto.	Dimensión del Modelamiento Matemático: Proceso de construir, ajustar y validar la herramienta predictiva. Efectividad práctica y la calidad del producto Sustentabilidad Ambiental	Grado de ajuste del modelo (R^2) Error de Predicción.

VARIABLE DEPENDIENTE: Eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.	En su trabajo sobre la viabilidad económica de la reutilización de aguas grises en edificios, Friedler demostró que estos sistemas pueden ser financieramente rentables a largo plazo. Su enfoque en el análisis de costos-beneficios es fundamental para la definición de "eficiencia". Friedler, E. (2004).	El eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises se calculó mediante las propiedades físicas, las propiedades químicas, y la eficiencia propiedades biológicas y la eficiencia.	Rendimiento del sistema de tratamiento. Calidad del Agua. Rentabilidad del sistema y su impacto ecológico.	Ahorro de agua potable (m³/mes)
--	--	--	---	---

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. Tipo y diseño de la investigación

Enfoque: Cuantitativa

Bajo la perspectiva de Hernández (2018), este estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se centra en la medición precisa del pH y las propiedades del detergente. Al emplear métodos estadísticos y simulaciones, se busca una objetividad que permita replicar los resultados en diferentes escenarios de tratamiento de aguas.

Tipo: Aplicada

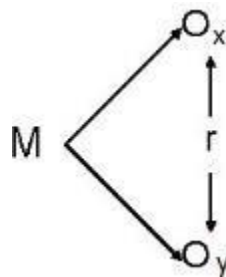
Esta investigación se clasifica como aplicada, ya que, siguiendo los lineamientos de Hernández (2018), no se limita a la acumulación de teorías sobre la química del agua, sino que utiliza dichos fundamentos para optimizar un sistema de tratamiento de aguas grises. El propósito práctico es determinar el comportamiento del pH ante la presencia de detergentes, ofreciendo una solución técnica basada en datos empíricos obtenidos mediante simulación.

Diseño: No experimental

La investigación se tipifica como no experimental y descriptiva, debido a que el análisis se centra en la observación de una sola variable de salida: el pH. De acuerdo con los lineamientos de Hernández (2018), el estudio no busca manipular el entorno, sino modelar

la interacción fisicoquímica del detergente en un sistema de aguas grises. El modelo matemático se utiliza como herramienta de medición para determinar el pH resultante en una muestra de 100 ml, proporcionando el dato cuantitativo necesario para evaluar el impacto químico del producto en el sistema.

Los investigadores clasifican los estudios cuantitativos según su alcance, incluyendo el correlacional (Hernández Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2014).



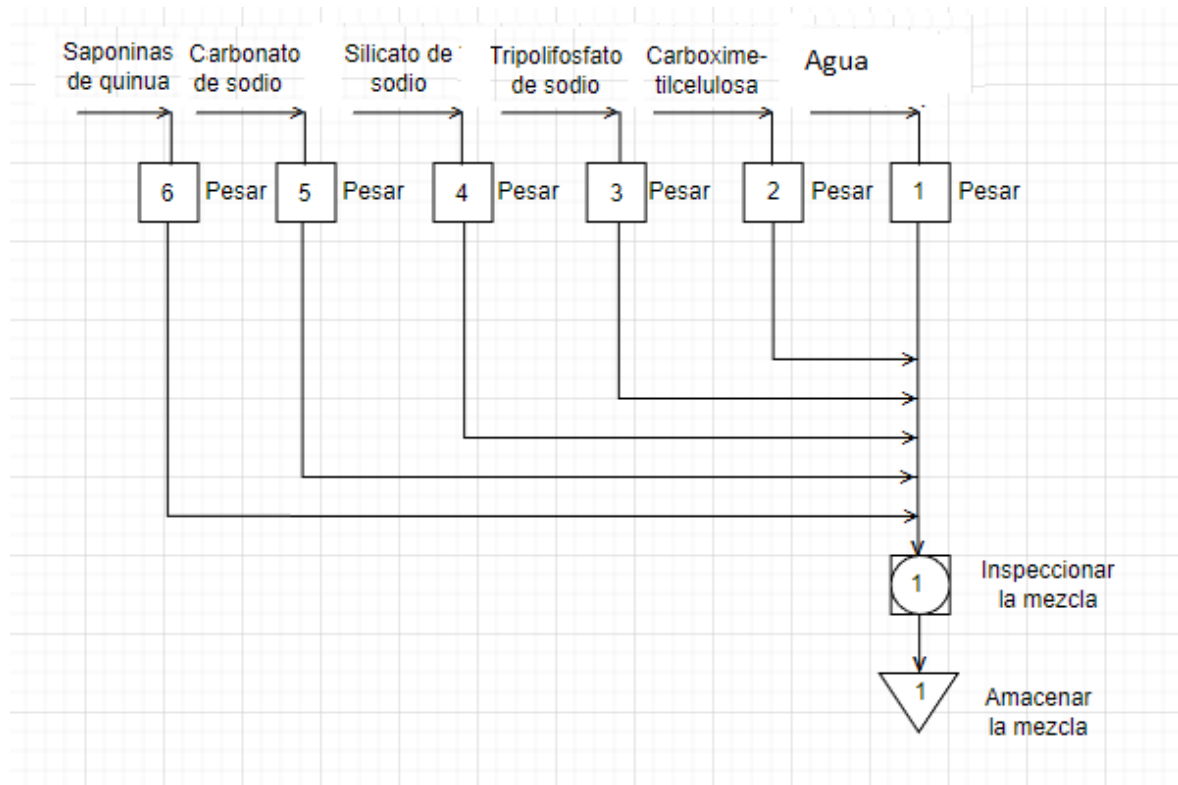
Donde:

$M \rightarrow (Ox, Oy, r)$

- **M:** Muestra única (100 ml de aguas grises).
- **Ox:** Variable 1 (Modelamiento del detergente).
- **Oy:** Variable 2 (Eficiencia del tratamiento/pH).
- **r:** Relación o grado de asociación entre ambas.
- Variable Independiente (Ox): El modelo matemático es la *herramienta* para observar dicha variable.
- Variable Dependiente (Oy): Es el Eficiente tratamiento. La eficiencia se determina a través del comportamiento del pH.

Figura 12

Preparación de cada una de las 20 mezclas propuestas



4.2. Unidad de análisis

Según Hernández (2018), para elegir la unidad de análisis primero se debe identificar la fuente principal del estudio y sobre qué o quiénes se centrará la recolección de datos en base al planteamiento y alcance. Por ello, la unidad de análisis son los escenarios de equilibrio químico del efluente, determinados por el modelamiento del potencial de hidrógeno (pH) del detergente biodegradable y su capacidad de alteración en la neutralidad de las aguas grises. Las aguas grises con un pH en la Muestra M01 Según la tabla 6.

Tabla 6

Medición de los parámetros físico – químicos de las etapas del proceso de tratamiento de aguas grises

Parámetros Físico - Químicos	M01	M02	M03	M04	L.M.P
pH (Unidad de pH a 25°C)	8.1	8.2	8.3	8.2	8.5
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1552	1478	1468	1457	2500
Acidez (mg/L)	320	298	298	278	-
Alcalinidad (mg/L)	208	204	204	204	-
Dureza (mg/L)	120	120	120	100	500
Sólidos Totales (mg/L)	2170	1370	1090	1098	1500
Cloruros (mg/L)	231	231	231	231	500
Nitratos (mg/L)	78.2	68.2	42.8	42.2	100

Fuente: Informe de Laboratorio N° 122 – 2018

M01: Muestra inicial; M02: Después del decantador; M03: Muestra después del filtro; M04: Muestra después de la Luz UV.

Fuente: Tabla 2: Medición de los parámetros físico – químicos de las etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales en sistemas de tratamiento de aguas grises. Eficiencia de un sistema de tratamiento de aguas grises para su reutilización en el regado de áreas verdes en la I.E. N°15509- Talara – Piura. Tomado de la Tesis (Zapata, 2018)

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población: La población está constituida por la totalidad de las fichas técnicas y registros fisicoquímicos (pH) de los detergentes biodegradables disponibles en el mercado local [o el sector que elijas] y los estándares de calidad ambiental para aguas grises.

4.3.2. Muestra: La **muestra** es de tipo dirigida o no probabilística, conformada por los valores de pH y coeficientes de dilución específicos de la marca de detergente [detergente Quinzap] y los rangos de pH establecidos en la normativa vigente (ECA o VMA).

4.3.3. Selección de muestra: La selección de la muestra es de tipo no probabilística o dirigida (por conveniencia). Siguiendo a Hernández (2018), este procedimiento no busca

representatividad estadística, sino la elección de casos que brindan información profunda para el modelo. La muestra se define como una unidad volumétrica de 100 ml de detergente biodegradable, cuyo valor de pH es recolectado de la ficha técnica del fabricante para ser procesado en el modelo matemático."

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

4.4.1. Técnicas de investigación.

De acuerdo con Hernández (2018), las técnicas de investigación representan el camino para la obtención de datos. En el presente estudio se aplicó el Análisis Documental para recolectar las propiedades fisicoquímicas del detergente. Posteriormente, se utilizó la técnica de Simulación Matemática, empleando como instrumento un software de cálculo para procesar la variable pH y determinar el comportamiento del sistema de tratamiento de aguas grises ante una muestra de 100 ml.

4.4.2. Instrumentos de investigación.

El instrumento de investigación es la Matriz de Mezclas Propiamente Dicha, y los componentes del detergente biodegradable, se presenta en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7

Componentes de un detergente a base de saponinas de quinua

Letra	Componentes	Peso(g)	Porcentaje (%)
A	Saponina de quinua	24,31	25,8
B	Carbonato de sodio	14,50	15,39
C	Silicato de sodio	13,29	14,11
D	Tripolifosfato de sodio	16,94	17,98
E	Carboximetilcelulosa	12,59	13,36
F	Agua	12,59	13,36
TOTAL		94,22	100,00

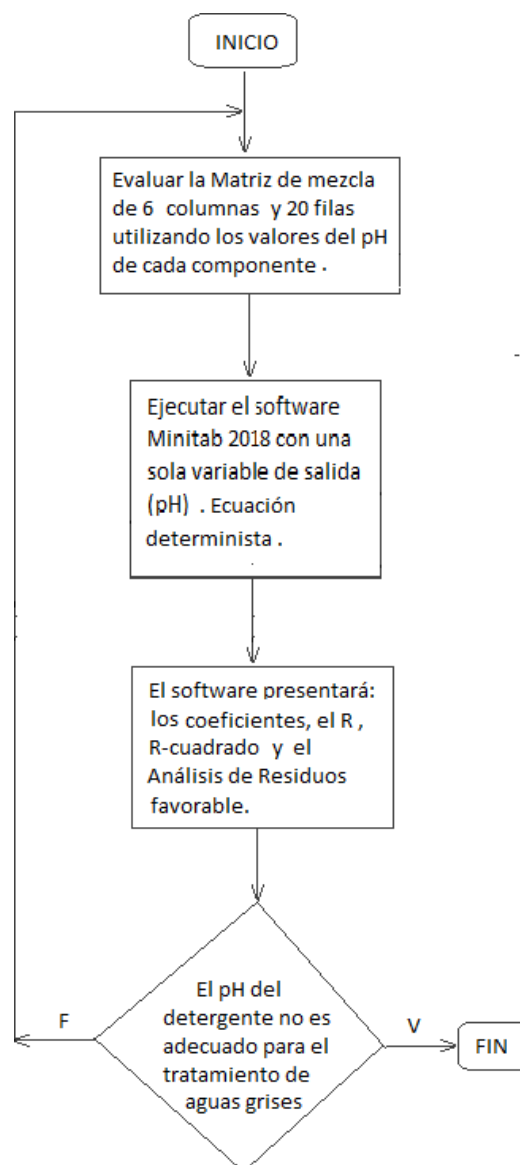
Nota. Elaboración propia a partir de López et al. (2017), con modificaciones en la composición y redistribución de porcentajes.

Datos No Experimentales: Porque no se fabricó el detergente ni se midió el pH con un sensor en tiempo real, sino se usó datos ya existentes y leyes químicas universales.

Son Aplicadas: Porque el resultado de estas técnicas es para no realizar muchas pruebas experimentales que llevan un alto costo en los laboratorios y el tiempo requerido.

Figura 13

Algoritmo para corregir el pH del detergente biodegradable



Nota. Elaboración propia.

Para el desarrollo del estudio, se creó el Diseño de Mezcla utilizando el software Minitab 22, como se ilustra en la Tabla 8.

Tabla 8

Componentes para el detergente biodegradable

Saponina	Carbonato de sodio	Silicato de sodio	Tripoli-fosfato de sodio	Carboxi-metilcelulosa	Agua	
1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	Componentes Puros
0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	
0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	Mezclas interiores
0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	
0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	
0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	
0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	
0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	
0.00000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	Mezclas excluyendo un componente a la vez
0.20000	0.00000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	
0.20000	0.20000	0.00000	0.20000	0.20000	0.20000	
0.20000	0.20000	0.20000	0.00000	0.20000	0.20000	
0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.00000	0.20000	
0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.00000	
0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	Centroide
0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	

Los siguientes instrumentos son:

En la Tabla 9 se exponen los rangos del pH de cada componente. Se utilizó el software Excel Microsoft 365.

Tabla 9

Datos del pH teórico de cada componente del detergente biodegradable

Componentes del detergente	pH
Saponina de quinua	4.0 - 7.0
Carbonato de sodio	11 - 12
Silicato de sodio	10.5 – 12.7
Tripolifosfato de sodio	9.2 – 10.5
Carboximetilcelulosa	6.5 – 8.5
Agua	7.0

Se promedió los datos de pH de cada componente de la Tabla 9 y se ha creado la Tabla 10.

Tabla 10

Promedio de pH de cada componente

Saponina de quinua	Carbonato de sodio	Silicato de sodio	Tripolifosfato de sodio	Carboximetil- celulosa	Agua
6.5	11.4	12.5	9.8	7.5	7.0

Se obtuvo el pOH de cada componente del detergente citado a partir de la Relación de Autoprotólisis del Agua: $pOH = 14 - pH$.

La concentración de los iones de oxidrilo de los seis componentes:

$$[OH^-]_i = 10^{-pOH(i)}, \quad (i=1,2,3,4,5 \text{ y } 6)$$

Cada fila obtuvo la suma total de los iones de oxidrilo ($pOH(i)$) de la Matriz (Tabla 8)

$$pOH(i) = w(1,i) * [OH^-]_1 + w(2,i) * [OH^-]_2 + w(3,i) * [OH^-]_3 \\ + w(4,i) * [OH^-]_4 + w(5,i) * [OH^-]_5 + w(6,i) * [OH^-]_6, \quad i=1,2,3,\dots,20$$

Donde:

$w(i)$, es el peso de los seis componentes y suma la unidad.

Luego se obtuvo el pH de cada fila de la siguiente manera:

$$pH(i) = -\log_{10}([pOH(i)], \quad i=1,2,3,\dots,20$$

En la Tabla 11 se obtuvo de la Tabla 8, y se colocó el resultado del pH obtenido en cada fila en la última columna.

Tabla 11*Valores del pH de cada fila de la matriz de Mezcla*

Saponina de quinua	Carbonato de sodio	Silicato de sodio	Tripolifosfato de sodio	Carboximetilcelulosa	Agua	pH
1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	6.5000
0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	11.4000
0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	12.5000
0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	9.8000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	7.5000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	7.0000
0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	11.4548
0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	11.6134
0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	12.2709
0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	11.4596
0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	11.4548
0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	11.4548
0.00000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	11.8350
0.20000	0.00000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	11.8019
0.20000	0.20000	0.00000	0.20000	0.20000	0.20000	10.7119
0.20000	0.20000	0.20000	0.00000	0.20000	0.20000	11.8342
0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.00000	0.20000	11.8350
0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.00000	11.8350
0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	11.7559
0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	0.16667	11.7559

4.4.3. Análisis e Interpretación de la información

A) Se determinó el modelamiento matemático que correlaciona la composición del detergente a base de saponinas de quinua con el pH para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

Para el procesamiento de los datos de las mezclas, se utilizó el software estadístico Minitab 22. Se aplicó una técnica de regresión de mezclas bajo el modelo canónico de Scheffé para determinar el modelamiento matemático de los componentes conocidos.

La Tabla 12 presentó el resultado de la corrida de mezcla en Minitab, obteniéndose los coeficientes de regresión estimados para el pH (proporciones de los componentes).

Tabla 12*Coefficientes de regresión estimados para pH (proporciones del componente)*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T
Saponina de quinua	6.505	0.228	*
Carbonato de sodio	11.405	0.228	*
Silicato de sodio	12.505	0.228	*
Tripolifosfato de sodio	9.805	0.228	*
Carboximetilcelulosa	7.505	0.228	*
Agua	7.005	0.228	*
Saponina de quinua*Carbonato de sodio	-54.1	14.0	-3.85
Saponina de quinua*Silicato de sodio	-65.2	14.0	-4.64
Saponina de quinua*Tripolifosfato de sodio	44.4	11.7	3.79
Saponina de quinua*Carboximetilcelulosa	83.3	11.7	7.12
Saponina de quinua*Agua	91.8	11.7	7.84
Carbonato de sodio*Silicato de sodio	77.0	15.8	4.88
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Silicato de sodio	473	104	4.54
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Tripolifosfato de sodio	237	104	2.28
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Carboximetilcelulosa	-370.3	87.4	-4.24
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Agua	-400.3	87.4	-4.58
Saponina de quinua*Silicato de sodio*Tripolifosfato de sodio	-369.3	87.4	-4.23
Carbonato de sodio*Silicato de sodio*Tripolifosfato de sodio	-100.8	87.4	-1.15

El comportamiento no es lineal, sino que también es lineal, binario y ternario, y los coeficientes positivos indica que la combinación del componente(s) produce un mejor resultado es decir potencian la respuesta (sinergia) y los coeficientes negativos (Antagonismo) restan eficiencia al modelo.

El veredicto técnico:

Con esta combinación de resultados:

A) $p < 0.05$: Hay relación causa-efecto.

El p-valor (indicador de credibilidad) es menor a 0.05 significa que la probabilidad de que mis resultados sean producto de la simple casualidad es menor al 5%. Por lo tanto, tengo un 95% de confianza de que el comportamiento de la mezcla que estoy presentando es real y repetible.

La Tabla 13 representó los valores de p y el FIV (Factor de Inflación de la Varianza) del modelamiento matemático del detergente biodegradable; ambas fueron métricas fundamentales que midieron aspectos distintos, pues la primera evaluó la significancia estadística mientras que la segunda analizó la redundancia entre variables.

Tabla 13

Valores de p del Modelamiento matemático del detergente biodegradable

Término	Valor p	FIV
Saponina de quinua	*	1.63
Carbonato de sodio	*	1.63
Silicato de sodio	*	1.63
Tripolifosfato de sodio	*	1.63
Carboximetilcelulosa	*	1.63
Agua	*	1.63
Saponina de quinua*Carbonato de sodio	0.061	48.63
Saponina de quinua*Silicato de sodio	0.043	48.63
Saponina de quinua*Tripolifosfato de sodio	0.063	33.84
Saponina de quinua*Carboximetilcelulosa	0.019	33.84
Saponina de quinua*Agua	0.016	33.84
Carbonato de sodio*Silicato de sodio	0.039	61.37
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Silicato de sodio	0.045	59.27
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Tripolifosfato de sodio	0.150	59.27
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Carboximetilcelulosa	0.051	41.81
Saponina de quinua*Carbonato de sodio*Agua	0.045	41.81
Saponina de quinua*Silicato de sodio*Tripolifosfato de sodio	0.052	41.81
Carbonato de sodio*Silicato de sodio*Tripolifosfato de sodio	0.368	41.81

Tabla 14

Resumen del Modelo lineal, cuadrática y cúbica.

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.228217	99.83%	98.34%	3069.06	0.00%

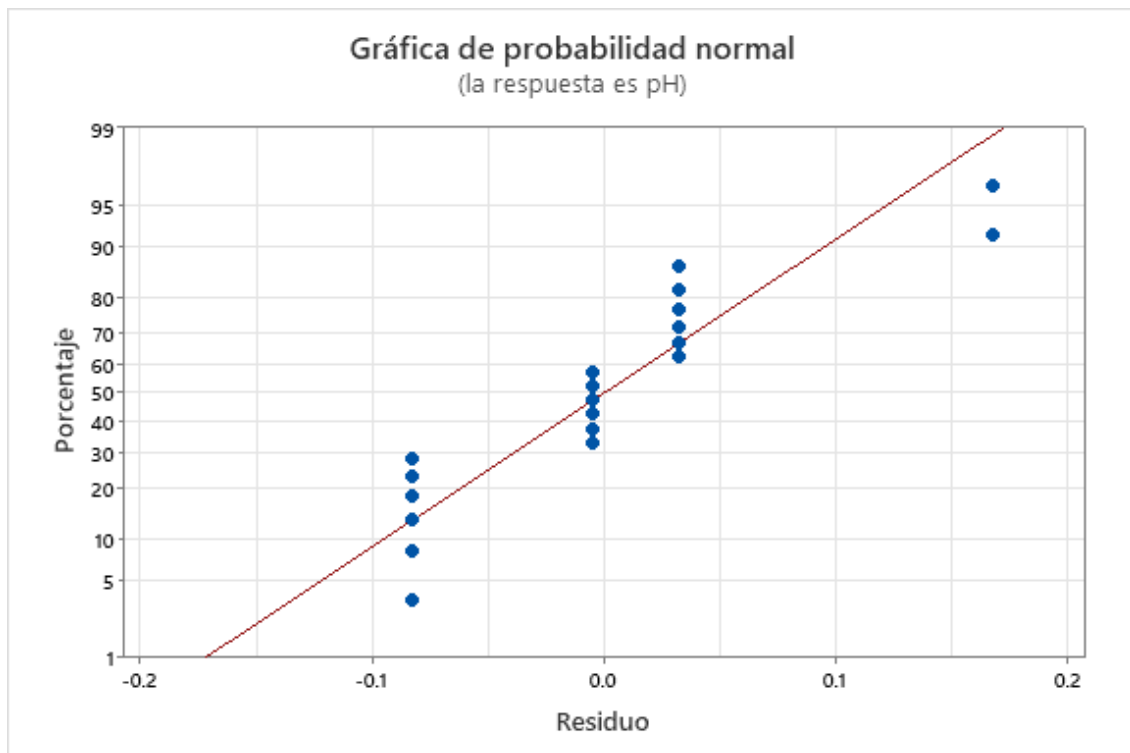
La Tabla 14 presentó un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de **98.34%** para el del Modelo lineal, cuadrática y cúbica. Este valor indica una capacidad explicativa casi total del modelo, lo que permite inferir que la variable de respuesta depende de manera

directa y predecible de las proporciones de los componentes analizados. Este alto nivel de ajuste otorga una gran confiabilidad a la ecuación de regresión para futuras aplicaciones industriales o experimentales.

En la Figura 14, se observa una distribución en columnas verticales para ciertos niveles de respuesta. Este comportamiento es característico de datos con baja variabilidad intrínseca o mediciones discretas. No obstante, dado que estos grupos de datos interceptan y siguen la trayectoria de la línea de ajuste (línea roja), se confirma el cumplimiento del supuesto de normalidad. Esto valida el uso de pruebas paramétricas y del modelo de regresión obtenido en Minitab 22.

Figura 14

Probabilidad normal del Modelamiento matemático del detergente biodegradable



CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados experimentales

5.1.1. Recolección de datos de saponinas de quinua

Tabla 15

Concentraciones de saponinas (%) calculadas a partir de tiempos y solventes

Tiempo (Horas)	A Agua destilada	B (50%) Agua: etanol	C (70%) Agua etanol
24	1.50	10.84	16.50
	2.00	12.13	16.00
	1.80	10.84	16.01
48	5.67	12.13	16.01
	6.96	12.13	18.30
	5.67	14.72	17.30
72	6.96	17.30	23.76
	9.55	17.29	26.34
	9.54	19.88	22.46

Nota. Adaptado de *Extracción de las saponinas obtenidas a partir de las hojas de Baccharis emarginata para la elaboración de un champú biodegradable* (Tabla 1), por Marrufo Vásquez, L. J. (2019).

Se realiza el estudio de la Tabla 6, de la Normalidad, Homocedasticidad y ortogonalidad

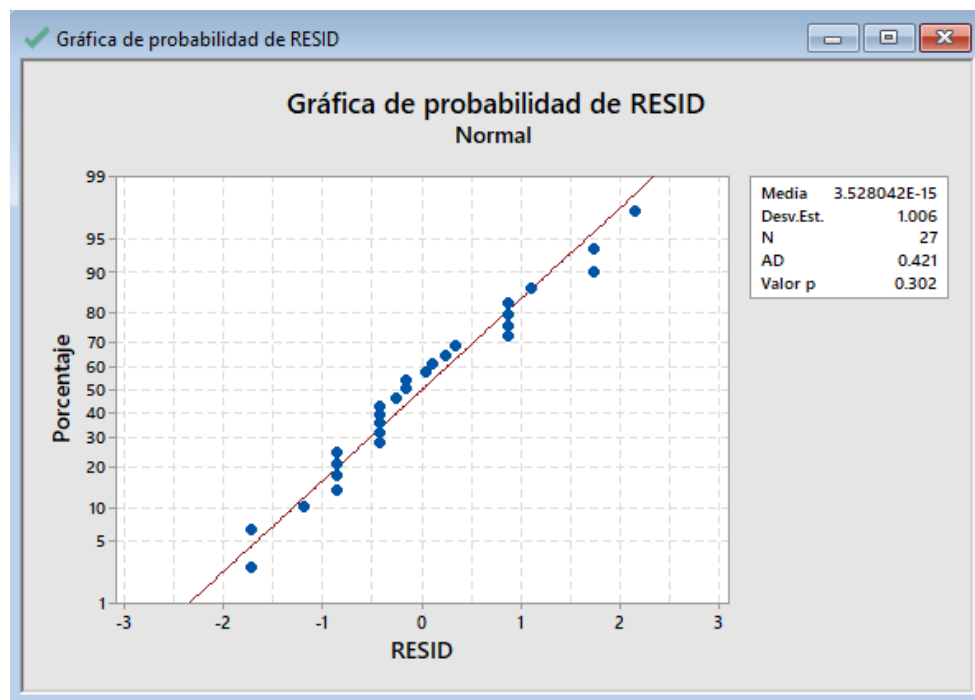
Distribución normal (Minitab 22)

Ho: Los errores tienen distribución normal

H1: Los errores no tienen distribución normal

Figura 15

Probabilidad de residuos de datos de saponinas de quinua



Valor de $p = 0.302 > 0.05$. No se rechaza Ho, tiene distribución normal.

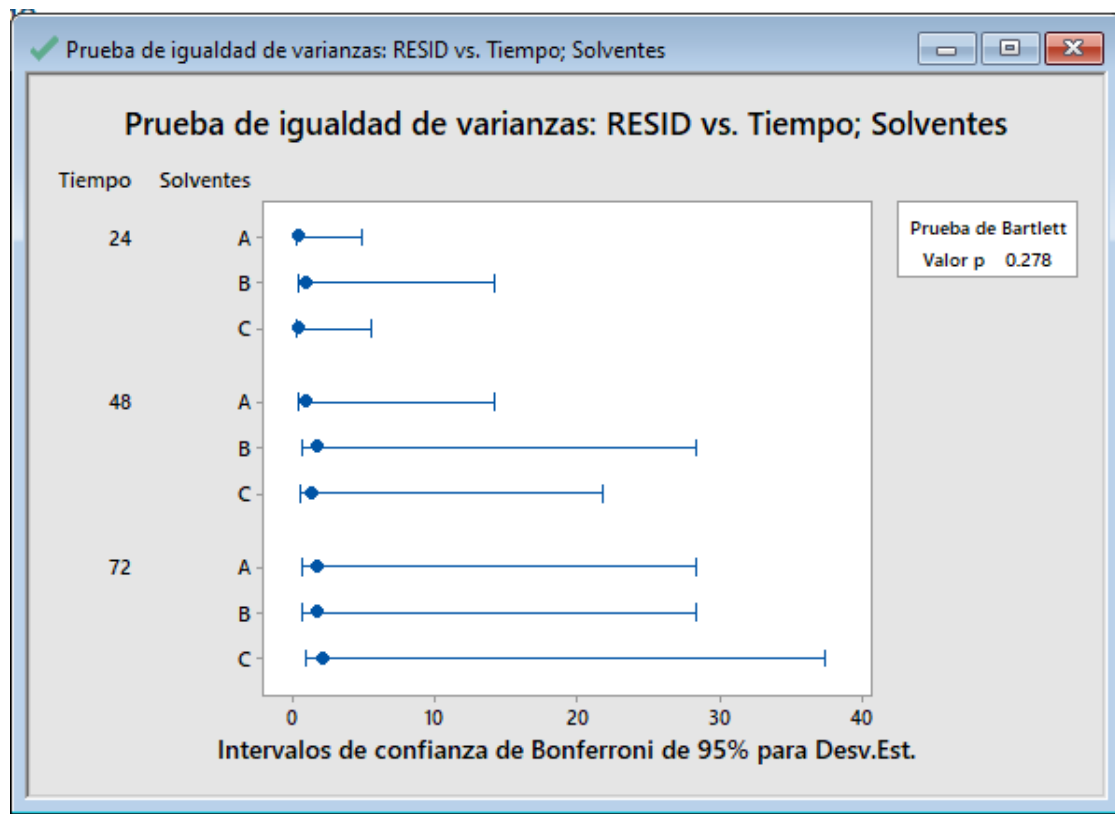
Homocedasticidad

Ho: Las varianzas son iguales (Homogéneas)

H1: Al menos una varianza es diferente.

Figura 16

Prueba de igualdad de varianzas: Residuos vs. Tiempo; Solventes



Valor de $p = 0.278 > 0.05$. No se rechaza H_0 , tiene homocedasticidad.

Ortogonalidad

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo	2	247.78	123.892	84.71	0.000
Solventes	2	860.10	430.049	294.03	0.000
Tiempo*Solventes	4	16.66	4.166	2.85	0.054
Error	18	26.33	1.463		
Total	26	1150.88			

H_0 : No hay interacción entre los niveles de tiempo y los solventes diluidos en el porcentaje que influya en el porcentaje promedio de saponinas obtenidas

H1: Existe interacción entre los niveles de tiempo y los solventes diluidos en el porcentaje que influya en el porcentaje promedio de saponinas obtenidas

Alfa = 0.05

$F = 2.85 > p\text{-valor} = 0.054$. No se rechaza la H_0 . Tiene ortogonalidad

H_0 : No hay efecto del tiempo sobre el porcentaje promedio de saponinas obtenidas.

H1: Hay efecto del tiempo sobre el porcentaje promedio de saponinas obtenidas.

$F = 84.71$ $p\text{-valor} = 0.000 < 0.05$. Se rechaza la H_0 .

H_0 : No hay efecto de los solventes diluidos tiempo sobre el porcentaje promedio de saponinas obtenidas.

H1: Hay efecto de los solventes diluidos tiempo sobre el porcentaje promedio de saponinas obtenidas.

$F = 294.03$ $p\text{-valor} = 0.000 < 0.05$. Se rechaza la H_0 .

Tukey

Si afecta el nivel de porcentaje de saponinas al tiempo de maceración. ¿Cuál es el nivel de porcentaje de saponinas más eficaz?

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Tiempo	N	Media	Agrupación
72	9	17.0089	A
48	9	12.0989	B
24	9	9.7356	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Conclusión: Con una significancia del 5% se puede afirmar que los niveles de promedio de porcentaje de saponinas de mayor eficacia en el tiempo de maceración de 72 horas.

Comparación por parejas de Tukey: Tiempo

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

Tiempo	N	Media	Agrupación
72	9	17.0089	A
48	9	12.0989	B
24	9	9.7356	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparación por parejas de Tukey: Solventes

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza del 95%

Solventes	N	Media	Agrupación
C	9	19.1867	A
B	9	14.1400	B
A	9	5.5167	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Análisis: En la obtención del polvo de saponina cumple con las pruebas estadísticas: Normalidad, homocedasticidad y ortogonalidad.

5.1.2. Recolección de datos del modelamiento matemático

La mezcla en forma lineal el R-cuadrado fue 30.21%, en el software Minitab 22, demuestra que la ecuación no es lineal.

Los datos no son experimentales.

Tabla 16

Coefficientes de regresión lineal estimados para pH (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T
Saponina de quinua	8.49	1.25	*
Carbonato de sodio	11.72	1.37	*
Silicato de sodio	12.99	1.37	*
Tripolifosfato de sodio	10.95	1.33	*
Carboximetilcelulosa	9.27	1.25	*
Agua	8.88	1.25	*
Carbonato de sodio*Silicato de sodio	23.8	29.7	0.80
Carbonato de sodio*Silicato de sodio*Tripolifosfato de sodio	42	184	0.23
Término	Valor p	FIV	
Saponina de quinua	*	1.16	
Carbonato de sodio	*	1.41	
Silicato de sodio	*	1.41	
Tripolifosfato de sodio	*	1.31	
Carboximetilcelulosa	*	1.16	
Agua	*	1.16	
Carbonato de sodio*Silicato de sodio	0.438	5.18	
Carbonato de sodio*Silicato de sodio*Tripolifosfato de sodio	0.823	4.42	

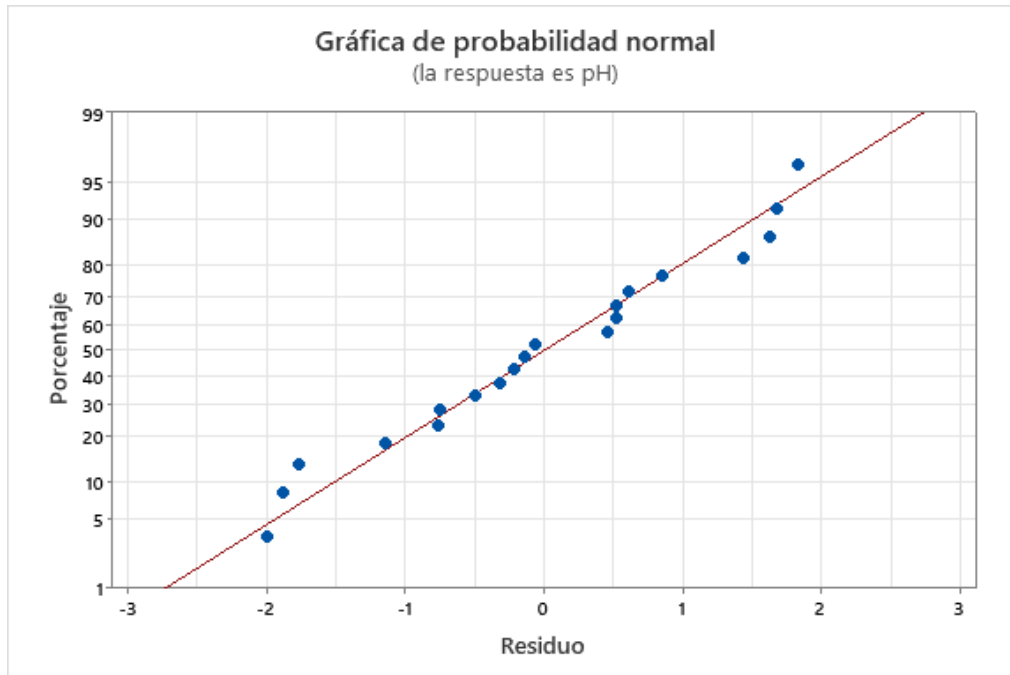
Tabla 17

Resumen del modelo lineal

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
1.47939	55.92%	30.21%	203.150	0.00%

Figura 17

Probabilidad normal (la respuesta es pH)



De las Tablas 13 y 14, y la Figura 15 se prueba la mezcla en forma lineal, binario y ternario, el R-cuadrado sería 98.34%, en el software Minitab 22, demuestra que la ecuación no es lineal.

La ecuación del Modelamiento matemático del detergente biodegradable.

$$\text{pH} = \sum(\text{Coef-Puros}(i) * x(i)) + \sum(\text{Coef-Binarios}(i) * x(i)) + \sum(\text{Coef-Ternarios}(i) * x(i))$$

Para $i = 1, 2, 3, 4, 5$, y 6

Donde:

$x(i)$: Pesos de la mezcla

Tabla 18

Datos de los pesos, y coeficientes puros, binomios y ternarios el modelo matemático

i	x(i)	Coef-Puros(i)	Coef-Binarios(i)	Coef-Ternarios(i)
1	0.2580	6.05	-54.1	473.0
2	0.1530	11.405	-65.2	237.0
3	0.1411	12.505	44.4	-370.3
4	0.1798	9.805	83.3	-400.3
5	0.1330	7.505	91.8	-369.3
6	0.1336	7.005	77.0	-100.8

Tabla 19

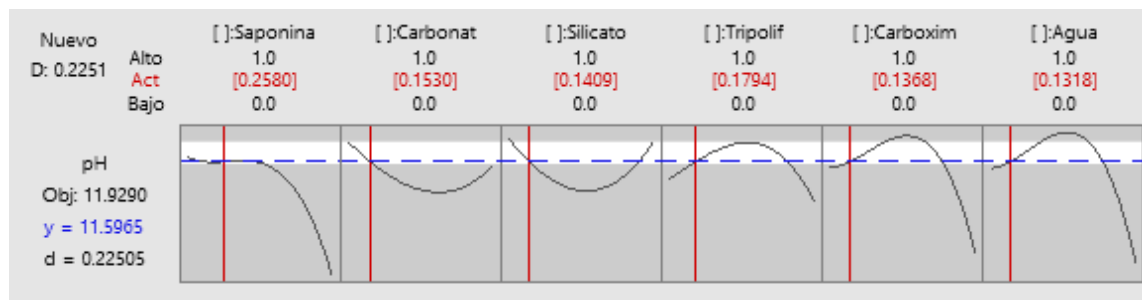
Obtención del pH del detergente

	Saponina	CO3Na	Na2SiO3	Na5P3O10	CMC	H2O
pesos =	0.258	0.1539	0.1411	0.1798	0.1336	0.1336
coeficientes =	6.05	11.405	12.505	9.805	7.505	7.005
pH Modelo =	8.78206					
pesos =	0.258	0.1539	0.1411	0.1798	0.1336	0.1336
Binarios =	Coef Sa Ca	Coef Sa Si	Coef Sa Tri	Coef Sa CMC	Coef Sa H2O	Coef Ca Si
coeficientes =	-54.1	-65.2	44.4	83.3	91.8	77
pH Modelo =	5.7041826					
pesos =	0.258	0.1539	0.1411	0.1798	0.1336	0.1336
Ternarios =	Coef Sa Ca Si	Coef Sa Ca Tri	Coef Sa Ca CMC	Coef Sa Ca H2O	Coef Sa Si Tri	Coef Ca Si Tri
coeficientes =	473	237	-370.3	-400.3	-369.3	-100.8
pH Modelo =	-2.556632795					
pH total =	11.9296098					

Realizando en el software Minitab 22.

Figura 18

Optimizador de respuesta par el pH igual a 11.5965



Fuente:

Se ha obtenido el valor de pH = 11.5965

Entonces el error porcentual (E)

$$E = (11.929 - 11.597) / 11.929 = 2.783 \%$$

Se ha determinado los valores que limitan la composición del detergente biodegradable en base de saponinas de quinua para un eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises, utilizando el Optimizador de respuesta del software Minitab 22,

Se evaluó el detergente biodegradable con un pH igual 10.5064 a las condiciones de la Tabla 21.

Figura 19
Optimizador de respuesta par el pH igual a 10.5064

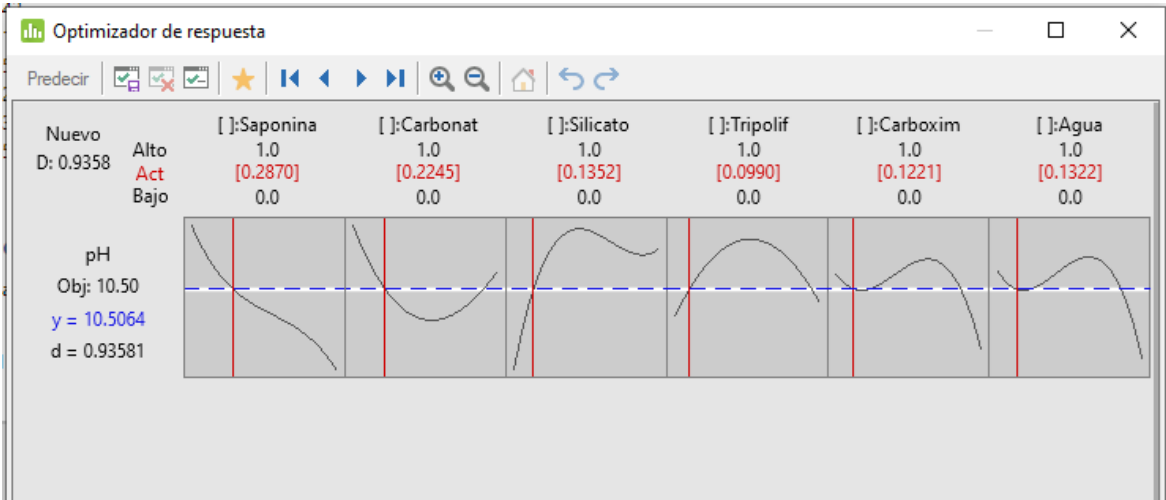
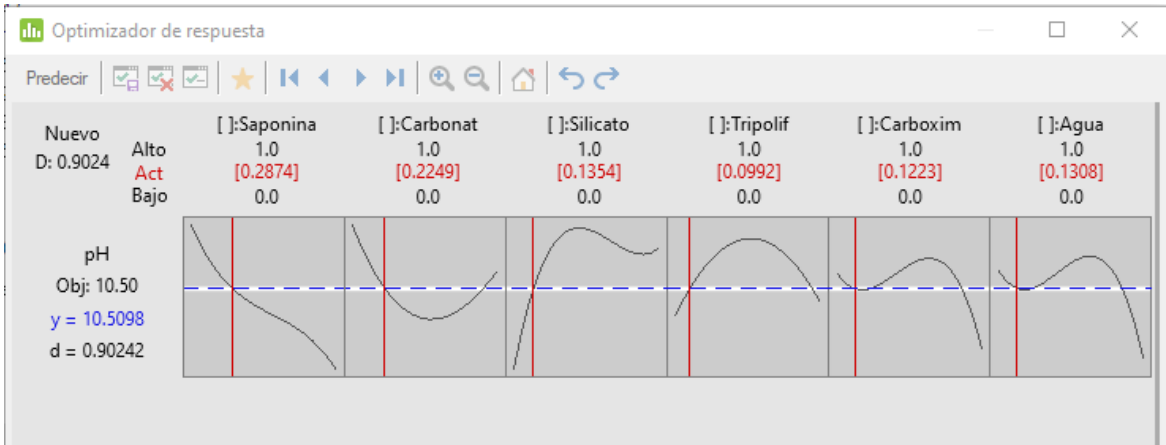


Figura 20
Optimizador de respuesta par el pH igual a 10.50



El **iB (Índice de Biodegradabilidad)**, es una métrica que equilibra la fórmula mediante la operacionalización de la variable, donde el numerador son los que aportan la biodegradabilidad

y el denominador son los aportan el pH y la dureza, pero que no degradan biológicamente.

El valor de iB es un parámetro de control estequiométrico teniendo un margen de tolerancia de $\pm 20 \%$.

Esta ecuación representa una Relación de Masa Crítica:

$$iB = \frac{\text{Saponina} + \text{CMC}}{\text{Carbonato} + \text{Silicato} + \text{STPP}}$$

Evaluated los valores a la Figura 20, tenemos:

$iB = (0.2874 + 0.1223) / (0.2249 + 0.1354 + 0.0992) = 0.4097 / 0.4595 = 0.8916$, se observó en la Tabla 20 que pertenece a un impacto ideal.

Tabla 20

Valores límites de iB (Índice de Biodegradabilidad)

Valor de iB	Relación Matemática	Impacto en la fibra textil.
>1.2	Numerador > Denominador	Predomina la carga orgánica (Saponina). Es muy biodegradable, pero la baja concentración de sales puede impedir que el pH alcance los 10.5 necesarios para remover grasas difíciles.
0.8 a 1.2	Numerador ~ Denominador	Punto de Equilibrio. Es el rango ideal donde la cantidad de agentes biodegradables es casi igual a la de sales inorgánicas, logrando el pH de 10.5098 sin sacrificar el ecosistema.
< 0.8	Numerador < Denominador	Exceso de Sales. Hay demasiados inorgánicos (Carbonato/STPP). La mezcla es difícil de degradar y el exceso de sales satura la fibra textil, dejando residuos blancos.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 21

Restricciones del espacio experimental para la formulación del detergente biodegradable.

Ingrediente	Límite inferior (Li)	Límite Superior (Ui)	Razón del límite
Saponina	0.2000	0.3500	Es el corazón biodegradable. Menos de 20% no emulsifica grasas; más de 35% se satura la fórmula.
Carbonato de sodio	0.1500	0.2500	Aporta la alcalinidad arriba de 0.2500 dificulta la biodegradabilidad por choque de pH
Silicato de sodio	0.0800	0.1400	Crítico para el pH = 10.5098. Es el “ajustador” fino de pH y protege contra la corrosión.
STPP (Fosfatos)	0.0000	0.1000	Límite ecológico. Muchas normas especial < 5% para ser considerado “Eco friendly”.
CMC Carboximetilcelulosa	0.0500	0.1500	Polímero natural. Mayor de 15% hace que el spray no atomice (viscosidad excesiva).
Agua	0.1336	0.1336	Valor fijo. Restricción física para tu sistema de spray.

Fuente:

Saponina (0.20–0.35): Basado en el límite de saturación, donde mayores cantidades no mejoran la tensión superficial (Hostettmann & Marston, 1995).

pH (10.5): Ajustado por la función anticorrosiva del silicato frente a la corrosión en sistemas alcalinos (Davidsohn & Milwidsky, 1987).

STPP (<10%): Criterios ambientales para fósforo (European Union, 2004; EPA).

CMC (<0.15%): Concentraciones elevadas modifican el comportamiento reológico e incrementan la viscosidad, lo que dificulta la atomización del líquido y la formación de gotas finas en boquillas tipo spray (Holmberg et al., 2003).

5.1.3. Recolección de datos de las aguas grises

Consulta con los datos más actualizados a marzo de 2026 (**Datos no experimentales**), he consolidado las cifras de consumo real reportadas por SUNASS y las estructuras tarifarias vigentes de SEDAPAL.

Es importante notar que, aunque 120 personas son las mismas en cualquier lugar, sus hábitos y el entorno (jardines, piscinas, presión de agua) cambian drásticamente el volumen que registra el medidor.

Tabla 22

Consumo Mensual de Agua Potable (120 personas)

Distrito	Consumo Diario por Persona (L/hab/día)	Consumo Total Mensual (m ³ /mes)	Costo Estimado del Recibo (S/)	Perfil de Consumo
La Molina	208	748.80	8,678.59	Extremo: Alto riego de áreas verdes y mayor uso de pozas/piscinas.
Surco	179	644.40	7,468.59	Alto: Edificios con grandes áreas comunes y mantenimiento de fachadas.
Comas	89	320.40	3,713.43	Eficiente: Uso enfocado en necesidades básicas (aseo, cocina).

Nota. SUNASS (2024). Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/sunass/noticias/1350994-consumo-promedio-de-agua-potable-en-lima-es-de-134-litros-al-dia-por-persona-con-tendencia-decreciente-de-13-litros-en-la-ultima-decada>.

Estas son las cifras reales de facturación promedio anual reportadas por **SUNASS** (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento):

A) PARA EL DISTRITO DE LA MOLINA

Para pasar de litros por día a metros cúbicos por mes, aplicamos la siguiente operación:

$$120 \text{ personas} * 208 \text{ litros/persona/día} = 24,960 \text{ litros diarios}$$

Como sabemos que 1,000 litros = 1 m³, entonces $24,960 / 1,000 = 24.96 \text{ m}^3$ por día

Finalmente, proyectamos a un mes promedio de 30 días:

$24.96 \text{ m}^3 * 30 \text{ días} = 748.80 \text{ m}^3$ mensuales.

Al superar los 50 m³ mensuales, SEDAPAL aplica la tarifa más alta (S/ 11.59 por m³ de agua + alcantarillado), lo que genera un recibo de S/ 8,678.59.

Tabla 23

Comparativa Tarifaria Mensual (Edificio de 120 personas)

Distrito	Consumo Mensual (m³/mes)	Tarifa Promedio Efectiva (S/m³)	Total Recibo (S/mes)
La Molina	748.80	11.59	8,678.59
Surco	644.40	11.59	7,468.59
Comas	320.40	11.59	3,713.43

Nota: **Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.).**

Tabla 24

Recibo mensual en el Distrito de La Molina.

Concepto	Cálculo	Monto Estimado (S/)
Agua Potable	748.8 m ³ (con bloques y exceso)	5,120.00
Alcantarillado	Servicio de desagüe (~44% del agua)	2,230.00
Cargo Fijo	Costo por mantenimiento de conexión	6.32
Subtotal	Suma de servicios	7,356.32
IGV (18%)	Impuesto obligatorio	1,322.27
TOTAL A PAGAR		8,678.59

Nota: **Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.).**

Tabla 25

Recibo mensual en el Distrito de Surco.

Tipo de Vivienda	Consumo Mensual (m³)	Tarifa Promedio Efectiva (S/)	Total a Pagar (Estimado) (S/)
Depa Pequeño (1-2 pers)	12	4.10	55.50
Casa Familiar Estándar	28	6.50	188.30
Casa con Jardín/Piscina	55	11.59	643.70
Edificio (Medidor Común)	644.4	11.59	7,468.59

Nota: Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.).

Tabla 26

Recibo mensual en el Distrito de Comas

Perfil de Usuario en Comas	Consumo (m3)	Tarifa Efectiva (S/m3)	Total a Pagar (Est.) (S/)
Vivienda Ahorradora (Subsidio SISFOH)	15	3.10	52.80
Vivienda Familiar Estándar	25	6.20	161.30
Vivienda con Negocio o Fuga	55	11.59	643.70
Edificio o Quinta (Medidor Común)	320.4	11.59	3,713.43

Nota: Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.).

Se ha dividido el consumo total entre 30 familias en un solo edificio, la clave para que el recibo baje es que Sedapal reconozca legalmente esas 30 Unidades Inmobiliarias. Al hacerlo, el límite de la "tarifa barata" se multiplica por 30, evitando que el consumo salte al bloque de castigo de S/ 11.59.

Tabla 27

Cuadro de Pagos por Familia (Consumo Dividido entre 30)

Distrito	Consumo Total (m ³ /mes)	Consumo por Familia (m ³ /mes)	Tarifa Est. (S/m ³)	Pago por Familia (S/mes)
La Molina	748.8	24.96	7.15	178.46
Surco	644.4	21.48	6.30	135.32
Comas	320.4	10.68	4.76	50.84

Nota: Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.).

Tabla 28

Ahorro Total del Edificio (Mensual)

Distrito	Pago Actual (1 Unidad) (S/mes)	Pago con 30 Unidades (S/mes)	Ahorro Mensual del Edificio (S/mes)
La Molina	8,678.59	5,353.80	3,324.79
Surco	7,468.59	4,059.60	3,408.99
Comas	3,713.43	1,525.20	2,188.23

Nota: Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.).

Tabla 29

Potencial de Generación de Aguas Grises (Mensual)

Distrito	Consumo Potable (m ³ /día)	Aguas Grises (m ³ /día)	Destino Sugerido
La Molina	24.96	16.22	Inodoros + Riego de grandes jardines y limpieza.
Surco	21.48	13.96	Inodoros + Riego de áreas comunes y fachadas.
Comas	10.68	6.94	Inodoros + Riego de jardines frontales y reserva.

Nota: Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.). Las aguas grises se consideran el 65% del agua potable.

Las aguas grises representan aproximadamente el 65% del consumo total. Este volumen es el que entraría a tu planta de tratamiento para ser filtrado y reutilizado en inodoros y riego.

Beneficio Económico del Reúso (Ahorro Mensual)

Si tratas y reúsas el 100% de tus aguas grises, dejas de comprárselas a SEDAPAL. El ahorro en tu recibo sería:

Tabla 30

Ahorro Mensual por Reúso de Aguas Grises (120 personas)

Distrito	Agua Gris Generada (m ³ /mes)	Tarifa SEDAPAL (S/m ³)	Ahorro Mensual Estimado (S/mes)
La Molina	486.72	7.15	3,480.05
Santiago de Surco	418.86	6.30	2,638.82
Comas	208.26	4.76	991.32

Nota: Elaboración propia basada en SEDAPAL (s. f.). Las aguas grises se consideran el 65% del agua potable.

En el Distrito de La Molina

Para calcular el CAPEX (Capital Expenditure) de una planta de tratamiento de aguas grises que procesa 16.22 m³ por día, debemos considerar equipos de grado industrial/comercial. A esta escala, ya no se usan filtros caseros, sino una planta compacta automatizada.

En la siguiente Tabla se ha presentado la inversión inicial en la infraestructura de agua y saneamiento.

Tabla 31

CAPEX (Planta 16.22 m³/día) en el Distrito de La Molina

Componente	Descripción	Costo Est. (S/)
Infraestructura Civil	Construcción de pozas de ecualización y sedimentación (concreto/tanques reforzados).	4,500
Sistema de Filtración	Filtros multimedia de alto flujo (arena sílice, zeolita y carbón activado) con cabezales automáticos.	6,800
Equipo de Bombeo	2 Electrobombas centrífugas (1 operativa, 1 retén) de 1.5 HP c/u.	2,400
Sistema de Desinfección	Bomba dosificadora de cloro automática con tanque de solución química.	1,200
Automatización	Tablero eléctrico con PLC para control de niveles y retrolavado automático.	2,500
Instalación y Puesta en Marcha	Mano de obra especializada, tuberías PVC clase 10 y válvulas.	2,600
TOTAL CAPEX	Inversión Inicial Total	20,000

1. Demostración de Costos Fijos (CF)

Se considera los costos fijos como los pagos que se realiza, aunque un mes no se use ni una gota de agua, además su monto n varia en función del nivel de actividad en el corto plazo.

En la siguiente tabla se considera los costos fijos que representan la infraestructura y el cumplimiento legal. Se demuestran sumando los gastos que no varían con el flujo de agua.

Tabla 32*Costo fijo en en el Distrito de La Molina*

Concepto	Justificación Técnica	Monto Mensual (S/)
Mantenimiento Preventivo	Revisión de electrobombas y limpieza de sensores.	450.00
Monitoreo de Calidad	Cumplimiento del D.S. 010-2019-VIVIENDA (VMA).	250.00
Depreciación Lineal	CAPEX (S/ 20,000) ÷ 60 meses de vida útil.	333.33
TOTAL COSTO FIJO	Monto base para mantener la operatividad.	1,033.33

Tabla 33**Comparativa de CAPEX según el Volumen de Agua Gris**

Componente	Distrito La Molina (16.22 m3)	Distrito Surco (13.96 m3)	Distrito Comas (6.94 m3)
Infraestructura Civil	S/ 4,500.00	S/ 3,873.00	S/ 1,925.40
Sistema de Filtración	S/ 6,800.00	S/ 5,852.02	S/ 2,909.50
Equipo de Bombeo	S/ 2,400.00	S/ 2,065.60	S/ 1,026.88
Sistema de Desinfección	S/ 1,200.00	S/ 1,032.80	S/ 513.44
Automatización	S/ 2,500.00	S/ 2,151.67	S/ 1,069.67
Instalación y Puesta en Marcha	S/ 2,600.00	S/ 2,238.23	S/ 1,112.45
TOTAL CAPEX	S/ 20,000.00	S/ 17,213.32	S/ 8,557.34

Tabla 34**Costos Fijos Mensuales (OPEX Fijo)**

Concepto	Para 16.22 m ³ (CAPEX 20k) La Molina	Para 13.96 m ³ (CAPEX 17.2k) Surco	Para 6.94 m ³ (CAPEX 8.5k) Comas
Mantenimiento Preventivo	S/ 450.00	S/ 450.00	S/ 450.00
Monitoreo de Calidad (VMA)	S/ 250.00	S/ 250.00	S/ 250.00
Depreciación Lineal (1)	S/ 333.33	S/ 286.89	S/ 142.62
TOTAL COSTO FIJO MENSUAL	S/ 1,033.33	S/ 986.89	S/ 842.62

Identificación de Costos Variables (CV) 16.22 m³**1. Cálculo del Volumen Mensual Base**

Primero, calculamos cuánta agua procesa el sistema en un mes completo de operación:

$$16.22 \text{ m}^3/\text{día} * 30 \text{ días} = 486.60 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Tabla 35**Costos Variables Mensuales (CV) en el distrito de La Molina**

Concepto	Cálculo Técnico	Monto Estimado (S/)
Energía Eléctrica	$486.60 \text{ m}^3 * 0.7 \text{ kWh} / \text{m}^3 * \text{S/ } 0.75$	255.47
Insumos Químicos	$486.60 \text{ m}^3 * \text{S/ } 0.85 \text{ (Cloro/Floculante)} / \text{m}^3$	413.61
Agua de Retrolavado	3% del volumen total (Autolimpieza)	50.00
TOTAL VARIABLE	Gasto por consumo mensual	719.08

¿Qué significan estos montos?

- **Energía Eléctrica (S/ 255.47):** Es lo que pagarás a Luz del Sur por mantener las dos electrobombas de 1.5 HP funcionando para mover los 16.22 m³ diarios y realizar los retrolavados de los filtros.

- Insumos Químicos (S/ 413.61): Es el costo de reposición de las pastillas de cloro (hipoclorito) y los polímeros que ayudan a que el agua gris salga cristalina y sin olor. Es el rubro más alto porque de esto depende la calidad del agua.
- Agua de Retrolavado (S/ 50.00): Los filtros multimedia necesitan limpiarse a sí mismos cada cierto tiempo. Para ello, usan un poco de la misma agua, lo cual representa un "costo" de pérdida de eficiencia.

Identificación de Costos Variables (CV) 13.96 m³

1. Cálculo del Volumen Mensual

Primero, determinamos cuánta agua procesa el sistema en un mes (30 días):

$$13.96 \text{ m}^3/\text{día} * 30 \text{ días} = 418.80 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Tabla 36

Costos Variables Mensuales (CV) en el Distrito de Surco

Concepto	Cálculo Técnico	Monto Estimado (S/)
Energía Eléctrica	$418.80 \text{ m}^3 * 0.7 \text{ kWh} / \text{m}^3 * \text{S/ } 0.75$	219.87
Insumos Químicos	$418.80 \text{ m}^3 * \text{S/ } 0.85 \text{ (Cloro/Floculante)} / \text{m}^3$	355.98
Agua de Retrolavado	Proporcional al flujo (aprox. 3%)	43.03
TOTAL VARIABLE	Gasto por consumo para 13.96 m ³	618.88

Identificación de Costos Variables (CV) 6.94 m³

1. Cálculo del Volumen Mensual

Primero, determinamos cuánta agua procesa el sistema en un mes (30 días):

$$6.94 \text{ m}^3/\text{día} * 30 \text{ días} = 208.20 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Tabla 37
Costos Variables Mensuales (CV) en el Distrito de Comas

Concepto	Cálculo Técnico	Monto Estimado (S/)
Energía Eléctrica	$208.20 \text{ m}^3 * 0.7 \text{ kWh} / \text{m}^3 * \text{S} / 0.75$	109.31
Insumos Químicos	$208.20 \text{ m}^3 * \text{S} / 0.85 \text{ (Cloro/Floculante)} / \text{m}^3$	176.97
Agua de Retrolavado	Proporcional al flujo (aprox. 3%)	21.39
TOTAL VARIABLE	Gasto por consumo para 6.94 m^3	307.67

Tabla 38
Utilidad Mensual en los Distritos: La Molina, Surco y Comas.

Detalle	La Molina (S/)	Surco (S/)	Comas (S/)
Ahorro Bruto Mensual	3,480.05	2,638.82	991.32
(-) Costo Fijo	1,033.33	986.89	842.62
(-) Costo Variable	719.08	618.88	307.67
UTILIDAD MENSUAL	1,727.64	1,033.05	- 158.97

Tabla 39
Tiempo para recuperar la inversión

Distrito	Inversión CAPEX (S/)	UTILIDAD MENSUAL (S/)	Recuperación en meses
La Molina	20,000	1,727.64	11.57
Surco	17,213.32	1,033.05	16.66
Comas	8,557.34	- 158.97 (*)	17.83

(*) S/480 lo pagó 120 personas usuarios del agua potable del edificio en el distrito de Comas

5.2. Resultados Inferenciales

5.2.1. Prueba de Hipótesis.

Hipótesis Principal

Ho: El modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua influye significativamente la eficiencia del tratamiento y reutilización de aguas grises.

El modelamiento matemático de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua no influye significativamente la eficiencia del tratamiento y reutilización de aguas grises.

Hipótesis Específicas

El modelamiento matemático que correlaciona la composición de un detergente biodegradable en base de saponinas de quinua con el pH influye significativamente en el eficiente tratamiento y reutilización de aguas grises.

Los valores que limitan la composición del detergente biodegradable a base de saponinas de quinua influyen significativamente en la eficiencia del tratamiento y la reutilización de aguas grises.

La implementación del sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises es económicamente viable, ya que genera un costo por metro cúbico inferior al costo de adquisición del agua potable.

5.2.2. Validación del modelo

- El modelo matemático del detergente biodegradable fue desarrollado para analizar la influencia de cada componente para predecir la efectividad de limpieza y el impacto en las aguas grises y se validó al comparar las predicciones del modelo con los datos referenciales (Tabla 7). Cumplió con la significancia del Modelo, la Capacidad Predictiva (R^2) y la normalidad.
- A través del modelado matemático, se establecieron los límites teóricos para la optimización de la mezcla. Este análisis permitió proyectar la dosis óptima de saponinas de quinua, buscando el equilibrio ideal entre la maximización del poder tensoactivo y la minimización de la carga orgánica en el efluente. Así, el modelo actúa como una guía de formulación para garantizar la sostenibilidad del producto.
- Se validaron que los costos del tratamiento de aguas grises son menores que el costo del agua potable en la reutilización del agua en edificios ecológicos.

5.3. Discusión de Resultados

- Se ha demostrado que la Concentraciones de saponinas (%) calculadas a partir de tiempos y solventes (Tabla 15) del polvo de saponina cumple con las pruebas estadísticas: Normalidad, homocedasticidad y ortogonalidad.
- Se determino mediante el algoritmo (Figura 13) el pH adecuado utilizando el software Minitab 22, con los datos de la Tabla 8 para seis componentes y se ha comprobado que la mezcla no es lineal, sino que es lineal, binario y ternario, verificando que R-cuadrado ajustado es 98.34% y que el valor p (Tabla 13) son menores de 0.05 y también la probabilidad normal.
- Se ha obtenido el modelo matemático del detergente biodegradable con error del 2.783% (Pág. 72).
- Mediante el Optimizador de respuesta del pH se ha logrado modelar desde un pH igual a 11.929, y enseguida mediante el software cargado se ha ploteado a un pH igual a 10.5098.
- Se comprobó que el índice de Biodegradabilidad tiene el valor de 0.8916 (Tabla 20) que pertenece al intervalo de los valores de 0.8 a 1.2 que señala que el biodetergente contiene suficiente saponina.
- La comparación de Figura 20 y la Tabla 20, demuestra que cumple con los valores que limitan la composición del detergente biodegradable.
- Se ha considerado tres distritos: La Molina, Surco y Comas para crear un mapa que representa la Ciudad de Lima, formando los costos fijos y costos variables para el tratamiento de aguas grises y en la Tabla 38 se observa que el distrito de Comas tiene una deuda pequeña para realizar el tratamiento de aguas grises que es superado por un acuerdo de los propietarios del edificio, y sea también un edificio ecológico (Acevedo, 2022).

CONCLUSIONES

- Se concluye que el modelo matemático para el pH es estadísticamente sólido y altamente predictivo, tras alcanzar un coeficiente R^2 de **98.34%** en Minitab. La significancia obtenida ($p < 0.05$) y la distribución normal de los residuos validan la hipótesis de investigación, demostrando que el modelo describe con precisión la interacción entre saponinas y coadyuvantes sin la presencia de sesgos sistemáticos.
- Se concluye que la mezcla de seis componentes alcanzó un pH de **10.5098** y un valor límite de iB de **0.8916**. Al situarse dentro del rango establecido de **0.8 a 1.2**, se confirma que la formulación posee una concentración de saponinas óptima para la limpieza. Asimismo, los resultados validan que la proporción de saponinas, carbonato de sodio, silicato de sodio, tripolifosfato de sodio, carboximetilcelulosa y agua cumple con los límites de composición requeridos.
- El análisis de costos mensuales para una población de 120 habitantes determinó que el proyecto es financieramente sostenible en los distritos de La Molina y Surco. En el distrito de Comas la utilidad mensual es negativo de S/ 158.97, y teniendo un esquema de cofinanciamiento, con el aporte adicional mensual de S/ 480.00 para alcanzar el punto de equilibrio en 17.83 meses.

RECOMENDACIONES

- Utilizar otros surfactantes como las saponinas para hallar el modelo matemático del detergente biodegradable
- Construir las curvas cinéticas y realizar sinergia para un buen detergente biodegradable
- Realizar ensayos de las diferentes concentraciones de aguas grises.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abello-Passteni, V., Muñoz-Alvear, E., Lira, S., & Garrido-Ramírez, E. (2020). *Evaluación de eco-eficiencia de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizadas en Chile*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(2), 190–221. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-05>
- Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., & Benítez, R. (2016). *Saponinas de quinua (Chenopodium quinoa Willd.): un subproducto con alto potencial biológico*. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 45(3), 438–469. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v45n3.62043>
- Altmajer Vaz, D. (2005). *Formulaciones detergentes biodegradables: Ensayos de lavado* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. Universidad de Granada. <http://hdl.handle.net/10481/856>
- Asenjo, C. (2018). Tratamiento de aguas grises. <https://www.iagua.es/blogs/cristinaasenjo-lopez/tratamiento-aguas-grises>
- Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2007). *Cradle-to-cradle design: Creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design*. *Journal of Cleaner Production*, 15(13–14), 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003>
- Campos Napán, J. J. M. (2018). *Maximización de la reducción de saponina en escarificado de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) por abrasión aplicando superficie de respuesta* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3655>
- Cardozo, A., & Tapia, M. (1979). *Valor nutritivo en quinua y kañihua*. En M. Tapia (Ed.), *La quinua y la kañiwa: cultivos andinos* (pp. 149–192). CIID & IICA. <https://repositorio.iica.int/bitstreams/1b875bd6-e002-47fe-8147-fca17c07c3b6/download>
- Casallas, N. D., & Ibañez Acosta, K. A. (2008). *Diseño de un sistema a nivel piloto para la remoción de detergentes aniónicos de una solución preparada con características de una lavandería tipo con el fin de reducir la concentración letal media (CL50-48) para Daphnia pulex* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional Universidad de La Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/94ae4558-14ef-4ddf-b464-a519185f2e0e/full>
- Castañeda Castro, J. G. (2004). *Reducción de hierro, manganeso y detergente en el agua por medio de arena verde de manganeso y carbón activado* (Tesis de licenciatura, Ingeniería Química). Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0895_Q.pdf

- Céspedes Cayo, R. L., Chamorro Buleje, B. D., & Oré Toribio, T. (2019). *Elaboración de un detergente enzimático para la remoción de fouling en las mallas de las piscigranjas de la laguna de Chacacancha* [Trabajo de investigación, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional UNAC. <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/3695>
- Contreras Rosero, M. V. (2009). *Diseño y construcción de un sistema electromecánico para reciclar aguas grises y conducirlos a los servicios higiénicos en una casa promedio* [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1716>
- Chauhan, G. S., Eskin, N. A. M., & Mills, P. A. (1999). Effect of saponin extraction on the nutritional quality of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) proteins. *Journal of Food Science and Technology*, 36(2), 123–126.
- Davis, A. N., Morton, S. A., Counce, R. M., DePaoli, D. W., & Hu, M.-Z.-C. (2003). Ionic strength effects on hexadecane contact angles on a gold-coated glass surface in ionic surfactant solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 221(1–3), 69–80. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(03\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(03)00132-8)
- A. Davidsohn, A., & Benjamin Max Milwidsky, B. M. (1987). *Synthetic detergents* (7th ed.). Longman Scientific & Technical. [Google Books](#)
- El Hazzam, K., Mhada, M., Metougui, M. L., El Kacimi, K., Sobeh, M., Taourirte, M., & Yasri, A. (2022). *Box–Behnken design: Wet process optimization for saponins removal from Chenopodium quinoa seeds and the study of its effect on nutritional properties*. **Frontiers in Nutrition**, 9, 906592. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.906592>
- European Parliament & Council of the European Union. (2004, March 31). *Regulation (EC) No 648/2004 on detergents*. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2004/648/oj>
- FAO. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Flowers, B. (2004). *Domestic water conservation: Greywater, rainwater, and other innovations*. Desalination/Canadian Standards Council. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i2.1521>
- Franco Alvarado, M. V. (2007). *Tratamiento y reutilización de aguas grises con aplicación a caso en Chile* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104596>
- Friedler, E. (2004). *Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities*. *Environmental Technology*, 25(9), 997–1008. <https://doi.org/10.1080/09593330.2004.9619393>
- Gallo, H. (2010). *Plantas de tratamiento de aguas grises*. Buenos Aires.: Universidad de Morón - Facultad de Arquitectura.

- García Camacha Gutiérrez, I. (2017). *Diseño óptimo de experimentos para modelos de mezclas aplicados en la ingeniería y las ciencias experimentales* (Tesis doctoral). Universidad de Castilla-La Mancha, España.
<https://dspace.esoch.edu.ec/items/97660ba4-1558-49cd-afdc-beb32f414874>
- García Bustos, K. A., Sánchez Muñoz, S., da Silva, S. S., Flores Alarcón, M. A. D., dos Santos, J. C., Colina Andrade, G. J., Terán Hilaes, R., et al. (2024). *Saponin molecules from quinoa residues: Exploring their surfactant, emulsifying, and detergent properties*. *Molecules*, **29**(20), 4928.
<https://doi.org/10.3390/molecules29204928>
- García Román, M. (2005). *Hidrólisis enzimática de triglicéridos en emulsiones O/W. Aplicación a formulaciones detergentes* (Tesis doctoral). Universidad de Granada.
<https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/767/15750796.pdf>
- Gavilán, N. A. (2011). *Fabricación de detergentes en polvo* [Proyecto/TFC, Universitat Politècnica de Catalunya]. UpCommons. <https://hdl.handle.net/2099.1/13097>
- Gianna, V. (2013). *Extracción, cuantificación y purificación de saponinas de semillas de Chenopodium quinoa Willd provenientes del Noroeste argentino* (Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales). Córdoba, Argentina.
- Gómez Payán, M. J., Romero López, R., Molina Arredondo, R. D., Terrazas Porras, S. M., & Nuñez Ortega, O. (2015). *Uso de la metodología del diseño por mezclas en el sector agrícola*. CULCyT / Diseño Experimental Patrones, 12(55, Especial No. 1), 201–211. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7100137.pdf>
- Gordin, P. A., Lai, K. Y., & Dixit, N. (1997). Liquid automatic dishwasher detergents. En K. Y. Lai (Ed.), *Liquid detergents* (Surfactant Science Series, Vol. 67, cap. 9, pp. 325–375). Marcel Dekker.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2ª ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Hernández, A., Ramos, M., Placencia, B., Indacochea, B., Quimis, A. y Moreno, L. (2018). *Metodología de la investigación científica*. (1a. Ed.). Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L
- Holmberg, K., Jönsson, B., Kronberg, B., & Lindman, B. (2003). *Surfactants and polymers in aqueous solution* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470856424>
- K. Hostettmann, K., & A. Marston, A. (1995). *Saponins*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511565113>

- Hypes, W. D., Batten, C. E., & Wilkins, J. R. (1975). *Processing of combined domestic bath and laundry wastewater for reuse as commode flushing water* (NASA Technical Note NASA-TN-D-7937). National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750023145>
- INDECOPI. (2014). *Granos andinos. Quinoa. NTP 205.062.2014* (2.^a ed., pp. 22–24). Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI).
- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Prathapar, S., & Al-Harrasi, A. (2008). *Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. Environmental Monitoring and Assessment*, 137(1-3), 315-327. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9767-2>
- Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). *Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. Water Science and Technology*, 50(2), 157–164. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0113>
- Kuljanabhagavad, T., Thongphasuk, P., Chamulitrat, W., & Wink, M. (2008). Triterpene saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. *Phytochemistry*, 69(9), 1919–1926. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.03.001>
- López Cerezo, J. A. (1998). Ciencia, Tecnología y Sociedad: el estado de la cuestión en Europa y Estados Unidos. *REVISTA IBEROAMERICANA DE EDUCACIÓN*. N° 18, págs. 41-68. <https://rieoei.org/RIE/article/view/1091/2062>
- López, Y., et al. (2017) Quinzap Detergente biodegradable a base de saponina de quinoa. Trabajo de Investigación para optar el Grado Académico de Bachiller. USIL. <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/55eb5265-272c-401d-9b34-75783ebe715d/content>
- Liu, S., Butler, D., Memon, F. A., Makropoulos, C., Avery, L., & Jefferson, B. (2010). *Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system. Water Research*, 44(1), 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.023>
- Maldonado Páez, S. L. (2008). *Estudio de la remoción de detergentes aniónicos tipo sulfato con carbón activado* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/964>
- Martínez de la Rosa, G. J. (2012). *Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor* (Trabajo de graduación, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala). http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1277_Q.pdf
- Marrufo Vásquez, L. J. (2019). *Extracción de las saponinas obtenidas a partir de las hojas de Baccharis emarginata para la elaboración de un champú biodegradable*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo].

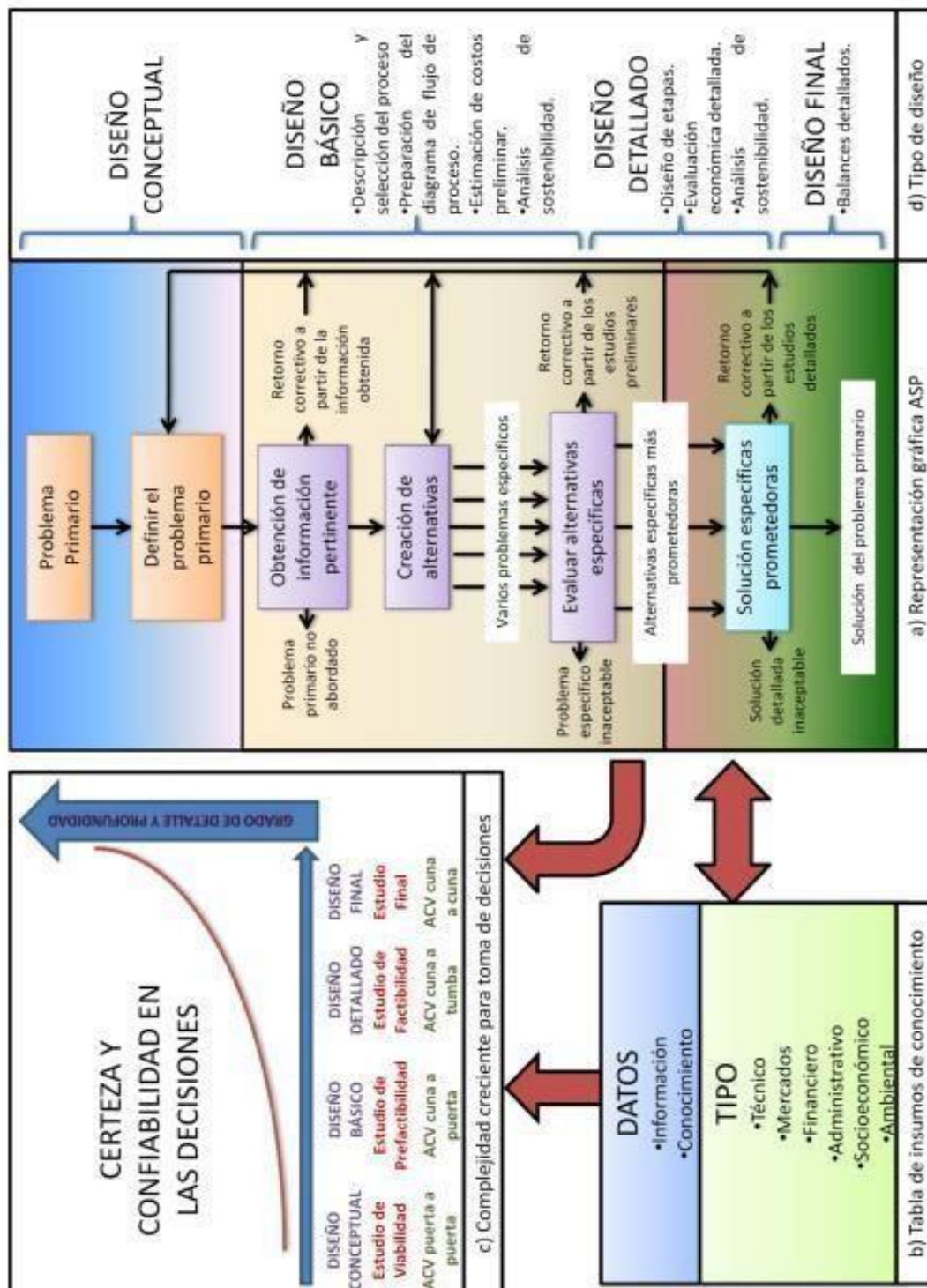
- Mastebroek, H. D., Limburg, H., Gilles, T., & Marvin, H. J. P. (2000). Occurrence of saponinins in leaves and seeds of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Journal of the Science of Food and Agriculture, 80*(1), 152–156. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000101\)80:1<152::AID-JSFA503>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000101)80:1<152::AID-JSFA503>3.0.CO;2-P)
- McIlwaine, S., & Redwood, M. (Eds.). (2010). *Greywater use in the Middle East: Technical, social, economic and policy issues*. Practical Action Publishing; Center for the Study of the Built Environment (CSBE); International Development Research Centre (IDRC). <https://idrc-crdi.ca/sites/default/files/openbooks/466-6/index.html>
- Montoya, C. M. (2012). *Modelo matemático que permita evaluar el cambio de la DBO₅ soluble debido a agentes inhibitorios en un proceso de lodos activados* (Trabajo de grado de maestría). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9303>
- Núñez Venegas, O. J. (2013). *Análisis de alternativas en el dominio térmico del reactor químico CSTR empleando un algoritmo correlacional interactivo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. UNMSM Repositorio. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/12609>
- Pérez Dorado, Á. A. (1996). *Detergentes* (1.^a ed.). UNED — Universidad Nacional de Educación a Distancia. Lerko Print, S.A. 208p.
- Radcliffe, J. C., & Page, D. (2020). *Water reuse and recycling in Australia — history, current situation and future perspectives*. *Water Cycle, 1*, 19–40. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.005>
- Science Advances / American Geophysical Union [AGU]. (2021). *Global Water Demand and the Role of Non-Conventional Water Resources for 2030-2050*. Sci. Adv. Publications / AGU Library.
- Sparg, S. G., Light, M. E., & van Staden, J. (2004). *Biological activities and distribution of plant saponins*. *Journal of Ethnopharmacology, 94*(2–3), 219–243. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2004.05.016>
- Soto Aguilar, W. (2010). *Desarrollo y comercialización del sistema de tratamiento de aguas grises (STAG)* [Proyecto de investigación]. Instituto Tecnológico de Tijuana.
- Triguero Mamani, C. (2021). *Evaluación del contenido de saponinas en variedades de quinua real (Chenopodium quinoa Willd) por Cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de Masas (GC/MS)* [Trabajo de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional UMSA.
- Trujillo, N., & Valencia, F. (2017). *Determinación de un método eficiente para la extracción de saponinas producidas durante el lavado de la quinua (Chenopodium quinoa) y su uso como tensoactivo en la elaboración de champú* (Tesis de licenciatura). Universidad de las Américas.

- UNESCO; UN-Water; World Water Assessment Programme. (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>
- Villacrés Alvarez, M.-G., Calderón Tapia, C.-G., Cauja Moyón, L.-M., & Arcos Guamán, T.-M. (2019). *Obtención de detergente líquido usando saponina de quinoa (Chenopodium quinoa Willd), chocho (Lupinus mutabilis Sweet) cabuya (Sisalana perrine) y su diseño de producción*. *Perfiles*, 1(21), 37–43. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i21.46>
- Woollatt, E. (1985). *The manufacture of soaps, other detergents and glycerine*. John Wiley & Sons. 473p.
- Zadeh, S. M., Lombardi, D. R., Hunt, D. V. L., & Rogers, C. D. F. (2010). *Local area graywater symbiosis approach to a more sustainable urban water management*. En C. A. Brebbia (Ed.), *The sustainable world* (pp. 193–203). WIT Press. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SW10/SW10018FU1.pdf>
- Zapata Rosales, J. A. (2018). *Eficiencia de un sistema de tratamiento de aguas grises para su reutilización en el regado de áreas verdes en la I.E. N.º 15509 Talara, Piura* (Trabajo de investigación, Universidad César Vallejo). Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/32322>
- Zhu, N., Sheng, S., Sang, S., Jhoo, J.-W., Bai, N., Karwe, M. V., Rosen, R. T., & Ho, C.-T. (2002). *Triterpene saponins from debittered quinoa (Chenopodium quinoa) seeds*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(4), 865–867. <https://doi.org/10.1021/jf011002l>

ANEXO

Figura A1

Herramientas de análisis de alternativas de producción incorporando el Análisis de Ciclo de Vida



Fuente: ACEVEDO, Paola (2012). Herramientas de análisis de alternativas de producción incorporando el ACV “cuna a cuna” a los métodos tradicionales. Comparación de biodiesel de palma e higuierilla. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Tesis doctoral. Bucaramanga, Colombia, 223p. (En línea) Disponible en <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7414/2/145395.pdf> (consultado sep. 15-13).