

LA LIGNINA COMO ALTERNATIVA DE ESTABILIZACIÓN EN SUELOS FINOS

**CARLOS SEBASTIAN ARCINIEGAS TULCAN
MÓNICA TATIANA CASTILLO MURCIA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
POPAYÁN
2024**

LA LIGNINA COMO ALTERNATIVA DE ESTABILIZACIÓN EN SUELOS FINOS

**CARLOS SEBASTIAN ARCINIEGAS TULCAN
MÓNICA TATIANA CASTILLO MURCIA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de:
Ingeniero(a) Civil**

**Directores trabajo de grado:
Ph, Msc. Carlos Aníbal Calero Valenzuela
Ph, Msc. Ferney Quiñones Sinisterra**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
POPAYÁN
2024**

Resumen

Este trabajo de revisión de literatura se centra en explorar el potencial de la lignina, el segundo biopolímero más abundante en la tierra, que se transforma en un subproducto conocido como licor negro en los procesos de la industria del papel y cartón. Se investiga su viabilidad debido al creciente interés en encontrar otros usos y transformaciones para la lignina, ya que se ha optado por desecharla en las fuentes hídricas o se quema para la generación de energía; esta tendencia surge en respuesta a la demanda global de sustitución o reducción del uso de materiales convencionales contaminantes. Entre las aplicaciones destacadas se encuentra su uso como alternativa para estabilizar suelos finos en Ingeniería Civil, con el empleo de la lignina tecnificada, en especial con la lignina en polvo tipo lignosulfonato. Sin embargo, se evidencia que la falta de productores comerciales de lignina en polvo en Colombia limita la experimentación con este producto, lo que sugiere una mayor investigación en los procesos de obtención de lignina tecnificada. La utilización de lignina como agente estabilizador es prometedora y sostenible, respaldada por evidencia científica recopilada desde 2003 hasta 2023. El estabilizante demuestra su efectividad en concentraciones óptimas del 6% al 12% respecto al peso seco del suelo, especialmente en suelos limosos, con períodos de curado estándar de 7 a 28 días. Finalmente, se sugiere que la lignina podría complementar estabilizantes convencionales como la cal y el cemento, ya que mejora las propiedades del suelo, pero no representa un mayor rendimiento frente a los ampliamente utilizados. Incorporar la lignina como complemento podría reducir la necesidad de los estabilizantes convencionales, lo que conllevaría a una disminución de costos en proyectos reales, como en el caso de Colombia, donde aproximadamente el 70% de la red vial está compuesta por vías terciarias, y solo el 10% de éstas se encuentra en buenas condiciones.

Palabras clave: lignina tecnificada; biopolímero, estabilización, suelos finos, sostenible.

Abstract

This literature review focuses on exploring the potential of lignin, the second most abundant biopolymer on Earth, which is transformed into a byproduct known as black liquor in the processes of the paper and cardboard industry. Its viability is being investigated due to the increasing interest in finding other uses and transformations for lignin, as it is currently either discarded in water sources or burned for energy generation; this trend arises in response to the global demand for substituting or reducing the use of conventional contaminating materials. Among the highlighted applications is its use as an alternative for stabilizing fine soils in Civil Engineering, through the use of technified lignin, especially with lignin powder such as lignosulfonate. However, it is evident that the lack of commercial producers of lignin powder in Colombia limits the experimentation with this product, suggesting further research in the processes of obtaining technified lignin. The use of lignin as a stabilization agent is promising and sustainable, supported by scientific evidence collected from 2003 to 2023. The stabilizer demonstrates its effectiveness at optimal concentrations ranging from 6% to 12% regarding the dry weight of the soil, especially with silty soils, with standard curing periods of 7 to 28 days. Finally, it is suggested that lignin could complement conventional stabilizers such as lime and cement, as it improves soil properties but does not yield higher performance compared to widely used ones. Incorporating lignin as a complement could reduce the need for conventional stabilizers, leading to cost reductions in real projects, as in the case of Colombia, where approximately 70% of the road network consists of tertiary roads, and only 10% of these are in good condition.

Key words: technified lignin; biopolymer; stabilization, fine soils; sustainable.

Índice

1- Introducción	8
1.1- Problema.....	8
1.1.1- Pregunta de Investigación.....	9
1.2- Antecedentes	10
1.2.1- Potencial de la Lignina como Recurso de Exploración	10
1.2.2- Lignina como Agente Estabilizador de Suelos Finos	11
1.3- Justificación	13
1.4- Objetivos	14
1.4.1- Objetivo General	14
1.4.2- Objetivos Específicos.....	14
2- Marco de Referencia.....	15
2.1- Marco Contextual.....	15
2.1.1- Panorama Vial de Colombia	15
2.1.2- Suelos de Colombia.....	22
2.2- Marco Teórico	23
2.2.1- Técnicas de Mejoramiento de Suelos.....	23
2.2.2- Mejoramiento de Suelos por Estabilización Química	24
2.2.3- Propiedades Físicas - Relaciones Volumétricas y Gravimétricas	24
2.2.4- Plasticidad y Clasificación del Suelo	27
2.2.5- Parámetros de Evaluación.....	33
2.2.6- Residuos Lignocelulósicos.....	35
2.2.7- Lignina.....	42
2.2.8 - Lignina Tecnificada	47
2.2.9- Extracción de Lignina Tecnificada	51
2.3.10- Usos de la Lignina	58
3- Metodología	64
3.1- Tipo de Investigación	64
3.2- Diseño de Investigación.....	64
3.3- Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad	65
3.3.1- Recursos y Servicios Utilizados.....	65
3.3.2- Estrategias de Búsqueda.....	65
3.3.3- Alcance Temporal	65
3.3.4- Fuentes Consultadas	65
3.4- Criterios Éticos	65
4- Resultados	66
4.1- Obtención de Lignina	66
4.1.1- Materiales	66
4.1.2- Procedimiento Experimental	67
4.1.3- Obtención – Lignina Extraída	68
4.2- Estabilización de Suelos Finos con Lignina.....	69
4.2.1- Muestra Patrón. Suelos finos.....	72
4.2.2- Lignina como Estabilizante	73
4.2.3- Muestra Modificada: Suelo-Lignina	76
4.2.4- Procedimientos de Construcción y Medidas de Protección	83
5- Conclusiones y Recomendaciones.....	86
5.1- Conclusiones	86
5.2- Recomendaciones	87
6- Referencias.....	88

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Panorama mundial, desarrollo de carreteras	15
Ilustración 2 Ranking anual de competitividad Colombia 2021	16
Ilustración 3 Distribución de recursos presupuestales por modo de transporte	17
Ilustración 4 Administración de la Red Vial Nacional	18
Ilustración 5 Variación composición de la red vial nacional.....	19
Ilustración 6 Panorama de las vías terciarias en Colombia	20
Ilustración 7 Mejoramiento de suelos	23
Ilustración 8 Mejoramiento de suelos por estabilización química.....	24
Ilustración 9 Carta de plasticidad de Casagrande	31
Ilustración 10 Sistema unificado de clasificación de suelos	31
Ilustración 11 Clasificación de suelos AASHTO	32
Ilustración 12 Parámetros de clasificación de suelo y análisis granulométrico	33
Ilustración 13 Estructura de la matriz lignocelulósica	35
Ilustración 14 Bagazo de caña de azúcar	38
Ilustración 15 Panorama bagazo de caña de azúcar en Colombia	39
Ilustración 16 Cascarrilla de arroz (suelto).....	40
Ilustración 17 Componentes de la matriz lignocelulósica	43
Ilustración 18 Distribución de monolignoles en especies con lignina	44
Ilustración 19 Transición detallada de la matriz lignocelulósica	44
Ilustración 20 Características y propiedades de la lignina.....	45
Ilustración 21 Estructuras químicas de los componentes en la biomasa lignocelulósica	46
Ilustración 22 Detalle de los monómeros o monolignoles de fenilpropano en la lignina	46
Ilustración 23 Métodos para procesar la lignina tecnificada	48
Ilustración 24 Distribución global de los principales productores industriales de lignina	50
Ilustración 25 Potencial del mercado de lignina.....	50
Ilustración 26 Licor negro de lignina	52
Ilustración 27 Lignina tipo organosolv (con solventes	54
Ilustración 28 Proceso lignina kraft (KL)	55
Ilustración 29 Proceso con sulfito (lignosulfonato)	56
Ilustración 30 Procesos de extracción de lignina sin hidrólisis ácida	57
Ilustración 31 Aplicaciones de la lignina y productos derivados	60
Ilustración 32 Ciclo de biorrefinería para la lignina.....	61
Ilustración 33 Biomasa lignocelulósica aplicando biorrefinería	62
Ilustración 34 Proceso industrial LignoBoost	63
Ilustración 35 Temáticas de la información recopilada	64
Ilustración 36 Materiales vegetales no maderables potenciales de aprovechamiento	66
Ilustración 37 Secuencia obtención de Lignina	69
Ilustración 38 Tipos de Suelo Fino Experimentados	72
Ilustración 39 Evaluación características físicas y mecánicas suelo patrón	72
Ilustración 40 Apariencia de la Lignina	73
Ilustración 41 Tipos de lignina probadas para experimentación.....	74
Ilustración 42 Porcentaje óptimo de lignina para experimentación	75
Ilustración 43 Aditivos convencionales complementarios.....	76
Ilustración 44 Mecanismo de estabilización para suelos finos estabilizados con lignina	78
Ilustración 45 Desarrollo microestructural de suelo fino tratado con lignina	80
Ilustración 46 Efecto del lignosulfonato y cemento en la contracción volumétrica del suelo fin	81
Ilustración 47 Tiempos de curado	82
Ilustración 48 Comparación de la durabilidad.....	84
Ilustración 49 Ventajas de estabilizadores alternativos y tradicionales	85
Ilustración 50 Estructura de terraplén para suelo estabilizado con lignina.....	85

Índice de tablas

Tabla 1 Puntaje ICG 2018-2019 sector infraestructura vial.....	17
Tabla 2 Estado de las Vías Terciarias en Colombia.....	19
Tabla 3 Parámetros de vías terciarias de Colombia.....	21
Tabla 4 Proporciones de volúmenes y pesos.....	24
Tabla 5 Tamaño de partículas ASTM – AASHTO.....	27
Tabla 6 Correlación entre IP y resistencia en estado seco.....	29
Tabla 7 Características de plasticidad y cohesión en función del IP.....	30
Tabla 8 Características de plasticidad y cohesión en función del IP.....	30
Tabla 9 Ensayos de compactación.....	34
Tabla 10 Materiales vistos como residuos lignocelulósicos a nivel mundial.....	37
Tabla 11 Caracterización del bagazo de caña de azúcar.....	38
Tabla 12 Composición de algunos residuos agroindustriales en el contexto colombiano.....	41
Tabla 13 Comparación propiedades de diferentes tipos de ligninas tecnificadas.....	48
Tabla 14 Composición licor negro de lignina.....	51
Tabla 15 Parámetros de caracterización lignina organosolv comercial.....	53
Tabla 16 Características de los distintos tipos de ligninas comerciales.....	57
Tabla 17 Poder calorífico de los componentes lignocelulósicos.....	59
Tabla 18 Perfil de materias primas en el mercado.....	66
Tabla 19 Abstracción Estudios de Estabilización de Suelos Finos con Lignina.....	69

1- Introducción

1.1- Problema

La biomasa lignocelulósica proviene de fuentes como la madera, residuos agrícolas y desechos forestales. Se compone principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, las cuales cumplen funciones estructurales en las paredes celulares de las plantas. La lignina, es el segundo polímero más abundante después de la celulosa, se obtiene principalmente como subproducto en el pretratamiento en la industria de la pulpa y puede ser aislada mediante diversos procesos, como tratamientos mecánicos, físicos, químicos y enzimáticos (Carvajal, 2015).

Anteriormente, la lignina se consideraba un residuo de poder calorífico en los procesos de elaboración industrial. No obstante, en la actualidad se ha transformado en una plataforma alternativa para sustituir productos elaborados con materias primas basadas en combustibles fósiles. Como innovación, han surgido plásticos, productos químicos, fibras de carbono, materiales de construcción, entre otros (Lim et al., 2021).

Se estima que la cantidad disponible de lignina en la naturaleza oscila entre 500 y 3600 millones de toneladas, con una obtención anual de 40 a 50 millones de toneladas procedentes del sector de la pulpa y papel principalmente (Lim et al., 2021). A pesar de su abundancia, la lignina enfrenta dificultades para ser aislada debido a su composición heterogénea, convirtiéndola en un componente difícil de manejar, especialmente cuando se intenta separarla de la celulosa y la hemicelulosa. Precisamente, estos obstáculos han llevado a su subutilización en la producción de energía, comúnmente desaprovechada mediante su quema.

La problemática se vincula con la realidad global, puesto que es prioritario abordar el cambio climático y gestionar los recursos naturales de manera sostenible en sectores como la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra que son responsables del 23% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI) (Infobae, 2024). Al respecto, se resalta que en Colombia se consumen más de 1.6 millones de toneladas de papel y 600 mil toneladas de pulpa al año. Según el informe de sostenibilidad de la industria papelera en Colombia de 2015, las principales fuentes de esta industria son pino, eucalipto, bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz y fibras secundarias (Monsalve, 2017).

En consecuencia, se considera pertinente experimentar con lignina para estabilizar suelos finos debido a la identificación de empresas privadas relacionadas con la producción de caña y papel en el departamento del Cauca. No obstante, surgen dificultades al intentar obtener este residuo con dichas empresas e incluso se encuentran limitaciones en la compra y distribución con entidades internacionales. Estas dificultades resultan incongruentes, ya que la compra del material no coincide con los principios de reutilización de recursos o residuos promovidos por el programa del Centro de Desarrollo Tecnológico para la Innovación de la Infraestructura Vial (CDT Vial).

Teniendo en cuenta tal escenario, la investigación plantea un cambio de enfoque hacia la exploración de métodos existentes y accesibles para obtener este componente a partir de las principales fuentes de residuos en Colombia, como la cascarilla de arroz, madera y bagazo de caña, que contienen entre un 20% y 25% de lignina (Sánchez, 2008). También se considera válido el cambio de enfoque debido a ejemplos de países que enfrentan la misma problemática, como Suecia, donde se trabaja en el desarrollo de industrias enfocadas en productos sostenibles con lignina (Ligno City, 2023). Igualmente, Brasil es reconocido por su potencial de lignina en biomasa y líder en el desarrollo del tema en Latinoamérica a partir de la industria de la caña de azúcar, alcanzando un grado de utilización de lignina de nivel 8 de madurez tecnológica (TRL) (Lim et al., 2021).

1.1.1- Pregunta de Investigación

En consecuencia, tales pautas de innovación se relacionan claramente con la misión del programa CDT Vial de la Universidad del Cauca, enfocada en abordar los desafíos de la red vial terciaria de Colombia mediante la utilización de residuos. En particular, se propone abordar la siguiente pregunta problema: ¿cuál es el potencial de la lignina como alternativa de estabilización en suelos finos?

1.2- Antecedentes

Es importante resaltar que los estudios considerados para este documento abarcan investigaciones realizadas en promedio durante los últimos 20 años. Sin embargo, para esta sección de antecedentes se tomaron en cuenta los estudios realizados entre 2018 y 2023 sobre el empleo de la lignina, los cuales proporcionan información relevante sobre áreas específicas, tales como: la lignina como recurso renovable, así como los métodos más eficientes para transformarla de su forma natural a tecnificada, y su potencial como estabilizador de suelos finos.

1.2.1- Potencial de la Lignina como Recurso de Exploración

Jędrzejczak et al. (2021) propone el uso de la lignina como sustituto parcial de productos derivados del petróleo. La investigación se centra en el impacto de las variaciones estructurales de la lignina para su aplicación, con énfasis en materiales como compuestos de cemento y resinas. Además, considerar la estructura y las propiedades de la lignina al evaluar el ciclo de vida de los materiales de construcción. El estudio proporciona una visión general de las últimas tendencias en materiales sostenibles y su potencial para transformar la industria de la construcción hacia prácticas más respetuosas con el medio ambiente.

Por su parte, Dessbesell et al. (2020) resalta a la lignina como materia prima renovable en la producción comercial de bioenergía, productos químicos y materiales alternativos. La investigación ofrece información detallada sobre el mercado global de lignina y sus aplicaciones principales, enfocándose en la valorización de la lignina kraft respecto a los lignosulfonatos para transformar las fábricas de pulpa en biorrefinerías. Asimismo, sugiere ampliar las tecnologías para optimizar técnicamente y económicamente las aplicaciones de lignina y promover la investigación colaborativa en la cadena de valor.

Como otra investigación a señalar, se encuentra la de Zevallos et al. (2020), la cual realiza una revisión detallada sobre las aplicaciones y características de la lignina a nivel mundial. Ésta presenta métodos comunes para caracterizarla, lo que facilita la comprensión de su estructura y propiedades. También se exploran sus usos en diversas industrias y su potencial tanto en el medio ambiente como en procesos de transformación, junto con los productos resultantes. El estudio menciona los procesos de aislamiento, los distintos tipos de lignina y las empresas productoras, a la vez que proporciona información sobre los métodos analíticos utilizados en su caracterización.

En su investigación, Balakshin et al. (2021) destaca que las ligninas de las biorrefinerías, consideradas anteriormente de bajo valor debido a su impureza, tienen un gran potencial para ser utilizadas como productos de alto valor. El estudio sugiere que la optimización de estas ligninas crudas mediante procesos simples y sustentables podría ser una alternativa rentable a las modificaciones tradicionales.

Así mismo, Tribot et al. (2019) aborda la fuerte interacción entre los procesos de extracción, el suministro de recursos y los usos recientes de la lignina en materiales alternativos de base biológica. La conclusión principal es que la lignina, como un biopolímero complejo, ofrece un enorme potencial económico en diversas aplicaciones que van desde adhesivos hasta materiales avanzados como bioplásticos y fibra de carbono. Sin embargo, su desarrollo se ve obstaculizado por la falta de incentivos económicos y procesos de extracción eficientes, desafíos que de llegar a superarse abrirían nuevas perspectivas para una industria sostenible basada en la lignina, respaldando así la transición hacia una bioeconomía que utilice los recursos renovables de manera efectiva.

1.2.2- Lignina como Agente Estabilizador de Suelos Finos

El estudio de Fernández et al. (2021) añaden lignosulfonato de calcio (LSC) a arcilla de esmectita natural. Las esmectitas muestran deformaciones volumétricas plásticas en respuesta a cambios de humedad. La arcilla se estabiliza en concentraciones de 3,0% y 5,0% en masa de LSC, mejorando las propiedades del suelo. La eficacia del LSC se evalúa con la medición de propiedades físicas, como los límites de Atterberg, la capacidad de intercambio catiónico y el área superficial específica. Los resultados indican que el LSC sirve como estabilizador porque reduce el hinchamiento natural de la arcilla, aumenta su rigidez y disminuye la porosidad.

Así mismo, Ljaz et al. (2020) emplean una mezcla de lignosulfonato y cal hidratada en una proporción óptima del 3.5%, determinada según el índice de plasticidad, para la estabilización de suelos expansivos. La investigación evalúa distintas concentraciones de lignosulfonato (0.4%, 0.9% y 2%) en combinación con diversos niveles de cal (2.6%, 3.8%, 5%, 6.5% y 9%). Se registran mejoras en las propiedades geotécnicas del suelo, lo que sugiere la efectividad de esta combinación. Además de reducir el consumo de cal, la mezcla proporciona una solución sostenible para la gestión de desechos industriales.

Zhang et al. (2020a) evalúan la resistencia y durabilidad de un suelo fino estabilizado con lignina en condiciones adversas. Los autores realizan pruebas de laboratorio para analizar

propiedades mecánicas, como resistencia a la compresión, coeficiente de estabilidad de humedad, pérdida de masa y pH del suelo, sometido a inmersión en agua y ciclos de humectación-secado. En el estudio se determina que la lignina mejora la fuerza y durabilidad actuando como agente de cementación. A su vez, observan una disminución en la resistencia a la compresión tras un día de inmersión. Respecto al suelo estabilizado con cal viva, el suelo con lignina evidencia una mayor resistencia, con una pérdida de masa del 20% después de cuatro ciclos de humectación-secado en 28 días.

En otro estudio, Zhang et al. (2020b) presentan un estado del arte de suelos estabilizados con lignina para aplicaciones en materiales de ingeniería, destacando que la lignina mejora la resistencia y durabilidad de suelos finos. Los resultados señalan que las propiedades fisicoquímicas de la lignina están principalmente influenciadas por la biomasa vegetal y la tecnología de producción, lo cual debe examinarse detenidamente antes de su aplicación en campo. Además, advierte sobre la posible degradación del suelo debido a la humedad y recomienda la implementación de procedimientos y medidas de protección específicas para asegurar su aplicación segura en proyectos de ingeniería, así como la necesidad de realizar investigaciones adicionales para optimizar el uso de este subproducto.

Por último, Ta'negonbadi y Noorzad (2017) investigan el uso del lignosulfonato (LS) como estabilizador alternativo en arcillas. Su estudio evalúa límites de Atterberg, compactación Proctor, resistencia a la compresión no confinada (UCS), comportamiento frente a ciclos de humedad/seco, esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad secante (E_{50}). Para ello, se prueban diferentes concentraciones de LS (0.5-0.75-1-2-3-4) % en peso seco del suelo y diferentes tiempos de curado (0, 4, 7, 14 y 28 días). Los resultados indican que el tratamiento con LS reduce el índice de plasticidad (IP) del suelo, aumenta el contenido óptimo de agua y disminuye el peso unitario máximo seco del suelo.

1.3- Justificación

El estado de las carreteras de un país se relaciona con las comunicaciones entre poblaciones, comercio y acceso a bienes básicos como salud y educación. Según el Departamento Nacional de Planeación (2023), las vías terciarias en Colombia son casi el 70% de la red vial nacional, y solo el 10% de éstas se encuentran en buen estado. El CDT Vial Unicauca (2018) de la Universidad del Cauca busca mejorar la capacidad de investigación aplicada para ofrecer nuevas alternativas en el manejo del sistema vial terciario a nivel departamental y nacional. En tal medida, la presente investigación pretende contribuir a la misión del CDT Vial mediante un estudio de revisión bibliográfica sobre el aprovechamiento de la lignina y su potencial para abordar problemas en la red vial terciaria.

El potencial de la lignina en países tropicales como Colombia se debe a las extensas reservas de biomasa disponibles. Hasta 2008, apenas el 5% de la lignina se destinaba a productos de valor agregado a nivel mundial, mientras que el 95% se utilizaba para la generación de energía. La dificultad de este panorama radica en que la lignina presenta un menor poder calorífico respecto a elementos convencionales como el carbón (Sena et al., 2008). Cabe destacar que la investigación propuesta sobre el potencial de la lignina para estabilizar suelos finos no solo responde a un interés científico, sino que también busca contribuir a las demandas de una gestión sostenible de los recursos y a la identificación de materias primas óptimas en lignina para la exploración en Colombia. La evidencia demuestra que existen diversos tipos de lignina: el bagazo de caña de azúcar y la cascarilla de arroz son algunas de las principales fuentes, con contenidos de aproximadamente 24% y 22%, respectivamente (Carvajal, 2015).

A su vez, como un aporte práctico, la investigación plantea métodos frecuentemente utilizados en la industria para extraer lignina, fuentes de materias primas locales, como bagazo de caña de azúcar y cascarillas de arroz, y métodos de obtención de lignina accesible, aspectos que pueden ser aplicados en la restauración de la malla vial del país. Por lo anterior, en esta revisión se procura desarrollar una guía general que involucre el uso de lignina como agente de estabilización en suelos finos, justificada en búsqueda bibliográfica que oriente la comprensión de términos químicos asociados al uso de lignina como agente estabilizador en suelos finos y asfalto.

1.4- Objetivos

A partir de las actividades relacionadas en el anteproyecto de investigación, se establecieron los siguientes objetivos que tienen como propósito ser reales, posibles y medibles.

1.4.1- Objetivo General

Evaluar el comportamiento de estabilización de suelos finos mediante el uso de Lignina, un componente estabilizante no convencional, considerado un subproducto de la industria del papel y cartón.

1.4.2- Objetivos Específicos

Con la intención de realizar un plan de acción coherente con el objetivo general y dar respuesta al alcance y consecución del trabajo de investigación, se plantean los siguientes objetivos:

- i) Caracterizar las propiedades físicas y químicas de la lignina.
- ii) Explorar los métodos utilizados para la obtención de lignina.
- iii) Identificar un método eficiente y accesible para obtener lignina a partir de un recurso natural considerado de desecho.
- iv) Evaluar la efectividad de la lignina como agente estabilizador en suelos finos.

2- Marco de Referencia

2.1- Marco Contextual

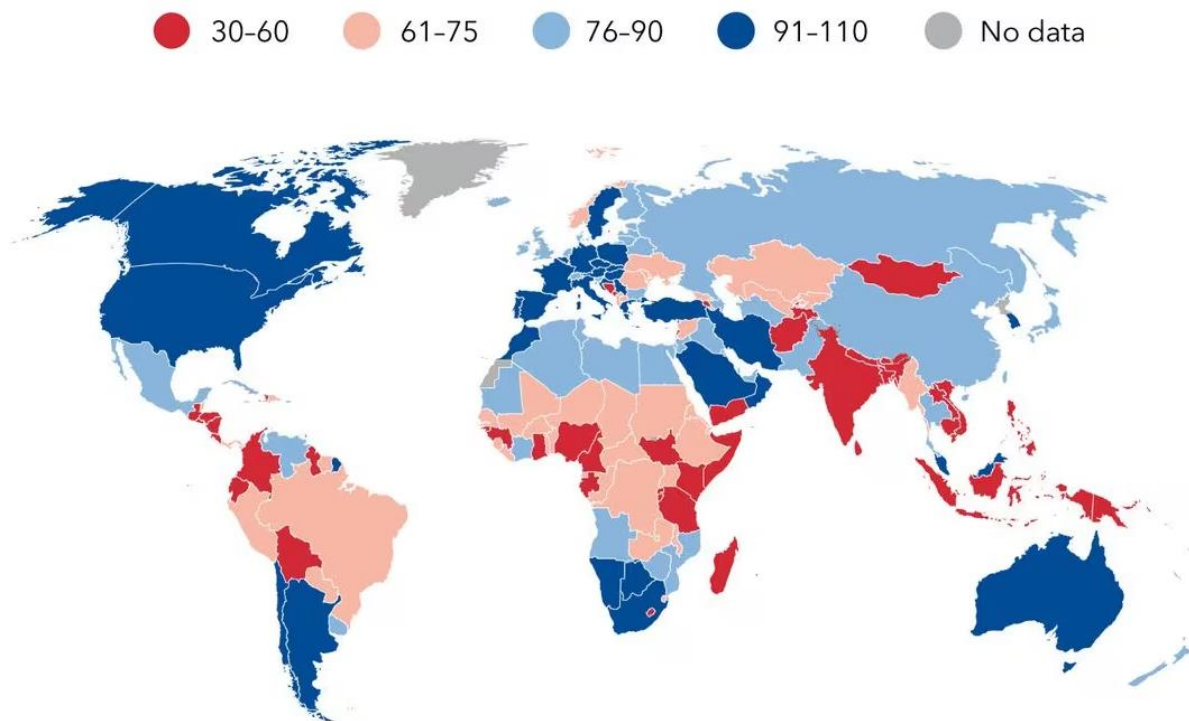
2.1.1- Panorama Vial de Colombia

2.1.1.1- Índice de Competitividad Global de Colombia (Infraestructura)

Las carreteras colombianas son consideradas algunas de las más lentas del mundo, principalmente debido a problemas de corrupción y construcción de baja calidad. Al respecto, se revela que se necesitan siete horas para recorrer 300 kilómetros, el doble del tiempo en comparación con la media mundial. Colombia y Bolivia destacan como los países con las carreteras más lentas (El País, 2022).

Ilustración 1

Panorama mundial, desarrollo de carreteras



Fuente: El País (2022).

Nota: en rojo y salmón los países con las peores carreteras. Los círculos marcan la velocidad media (km/h).

El Fondo Monetario Internacional (FMI) enfatiza que las carreteras de alta velocidad, capaces de transportar bienes a mercados distantes, no solo aumentan la productividad, sino que también contribuyen directamente a la reducción de la pobreza y al impulso de un desarrollo económico sostenible e inclusivo (El País, 2022).

Igualmente, el Índice de Competitividad Global (ICG), desarrollado por el Foro Económico Mundial, evalúa la capacidad de los países para fomentar la prosperidad económica a largo plazo. Este índice aborda factores como infraestructura, salud, educación y eficiencia del mercado laboral para determinar la competitividad de un país. Un índice alto puede considerarse más propicio para el desarrollo económico (Ministerio de Transporte, 2022).

Entre 2017 y 2022, Colombia se ha ubicado entre la posición 52 y 58 del listado. Su mejor año fue 2019, cuando ocupó el puesto 52, y el peor lo obtuvo en 2018, cuando fue la nación número 58 en el ranking. El componente *infraestructura* del informe muestra que para 2019 Colombia ocupó el puesto 83 entre las 141 economías evaluadas, señalando avances significativos, aunque a un ritmo menor en comparación con otros países de Latinoamérica (La República, 2022a).

Ilustración 2

Ranking anual de competitividad Colombia 2021

Ranking mundial			Ranking América Latina		
Puesto 2022	País	Puesto 2021	Puesto 2022	País	Puesto 2021
1	Dinamarca	3	45	Chile	44
2	Suiza	1	54	Perú	58
3	Singapur	5	55	México	55
4	Suecia	2	57	Colombia	56
5	RAE de Hong Kong	7	59	Brasil	57
6	Países Bajos	4	62	Argentina	63
7	Taiwán, China	8	63	Venezuela	64

Fuente: La República (2022a).

Los puntajes y la posición de Colombia en el ICG de 2018 y 2019 en infraestructura muestran diversos enfoques. En éstos se miden algunos aspectos específicos de la conectividad vial (Tabla 1). La calidad de las carreteras es el aspecto con la posición más baja, obteniendo un puntaje de 3,4.

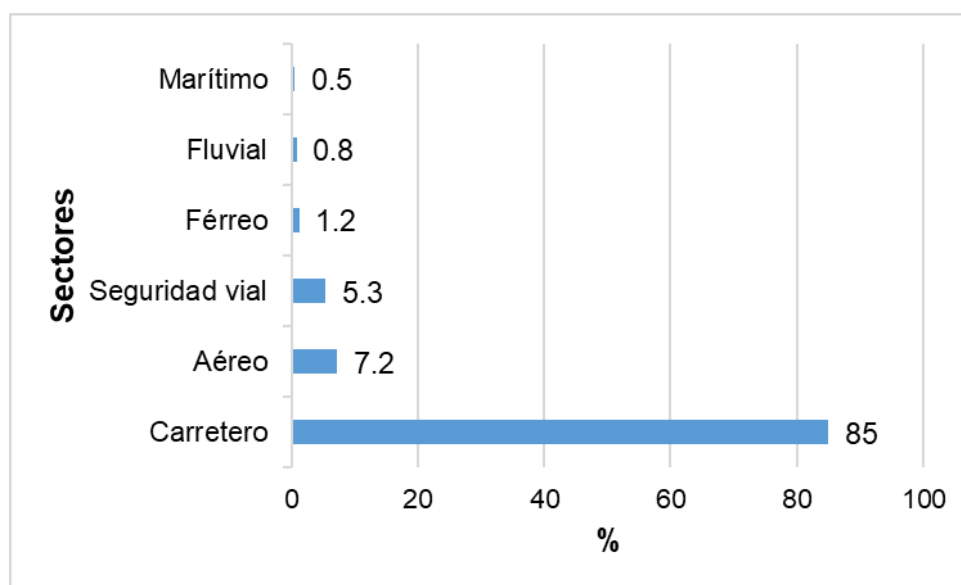
Tabla 1
Puntaje ICG 2018-2019 sector infraestructura vial

Infraestructura	2018		2019	
	Posición	Puntaje	Posición	Puntaje
Índice de conectividad de carreteras (0-100)	97	47.9	97	65.4
Calidad de las carreteras (1-7)	102	3.3	104	3.4

Fuente: Ministerio de Transporte (2022).

A pesar de los avances de Colombia en materia vial, el Foro Económico Mundial sugiere seguir mejorando la calidad de estas vías. Por lo tanto, las entidades correspondientes se han comprometido con inversiones de hasta 8.5 billones de pesos destinados a continuar el desarrollo vial en el país. La distribución de la ejecución presupuestal en tal componente indica que la mayor parte del presupuesto del sector se asignó al modo carretero, representando el 85% del total ejecutado (Figura 3).

Ilustración 3
Distribución de recursos presupuestales por modo de transporte



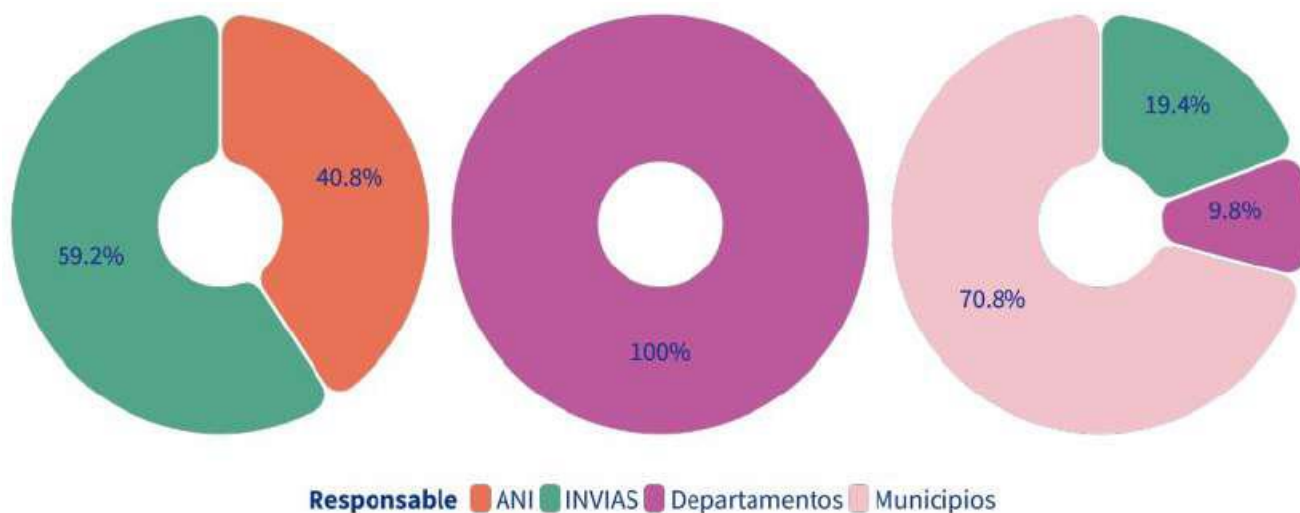
Fuente: Ministerio de Transporte (2022).

2.1.1.2- Red Vial Terciaria de Colombia

En Colombia, el Sistema Nacional de Carreteras se compone por la red primaria, secundaria y terciaria. Al respecto, información de 2021 revela que las vías terciarias en Colombia constituyen aproximadamente el 69.2% de la red vial nacional, abarcando 142.000 kilómetros de los 206.000 totales. Sin embargo, solo el 10% de estas carreteras se encuentra en buen estado para ser transitadas según el informe de Inversión en Vías Secundarias y Terciarias en Colombia (2023), por lo cual se afecta el desarrollo económico y social al facilitar la conexión entre grandes centros poblados y comunidades apartadas.

Ilustración 4

Administración de la Red Vial Nacional



Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2023).

Estimaciones presentadas por el Departamento Nacional de Planeación (2023) indican que el 70% de las vías terciarias son en afirmado, el 24% en tierra y el 6% están pavimentadas. En promedio, solamente el 19% se encuentra en buen estado, el 41% regular y el 40% en mal estado.

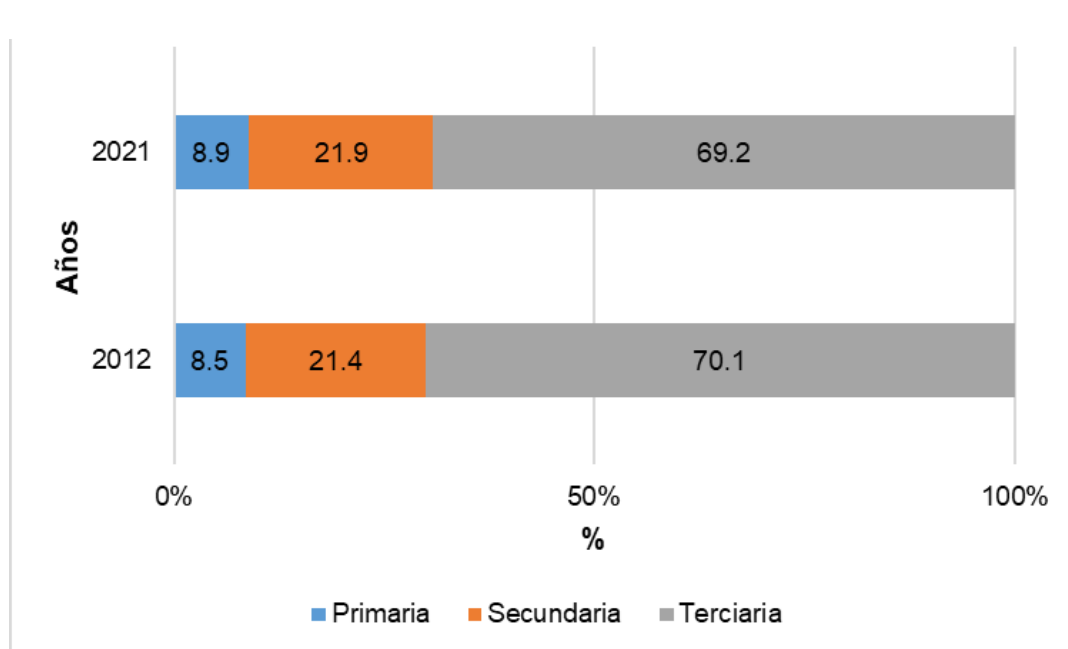
Tabla 2
Estado de las Vías Terciarias en Colombia

Tipo de superficie	Kilómetros	Participación	Estado de las vías			
			Bueno (%)	Regular (%)	Malo (%)	Total (%)
Afirmado	2.168	20	13,4	39,9	46,7	100,0
Pavimentado	8.672	80	49,5	30,1	20,4	100,0
Total	10.840	100	42,3	32,1	25,7	100,0

Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2023).

A pesar de su importancia, las vías terciarias han sido relegadas en comparación con las carreteras principales, lo cual implica desafíos en términos de construcción, pavimentación, mantenimiento y mejoramiento. Esta disparidad ha afectado la calidad y eficiencia de la red vial terciaria, requiriendo una intervención estratégica por parte de los organismos gubernamentales para mejorar su estado como señala nuevamente el informe de Inversión en Vías Secundarias y Terciarias en Colombia (2023).

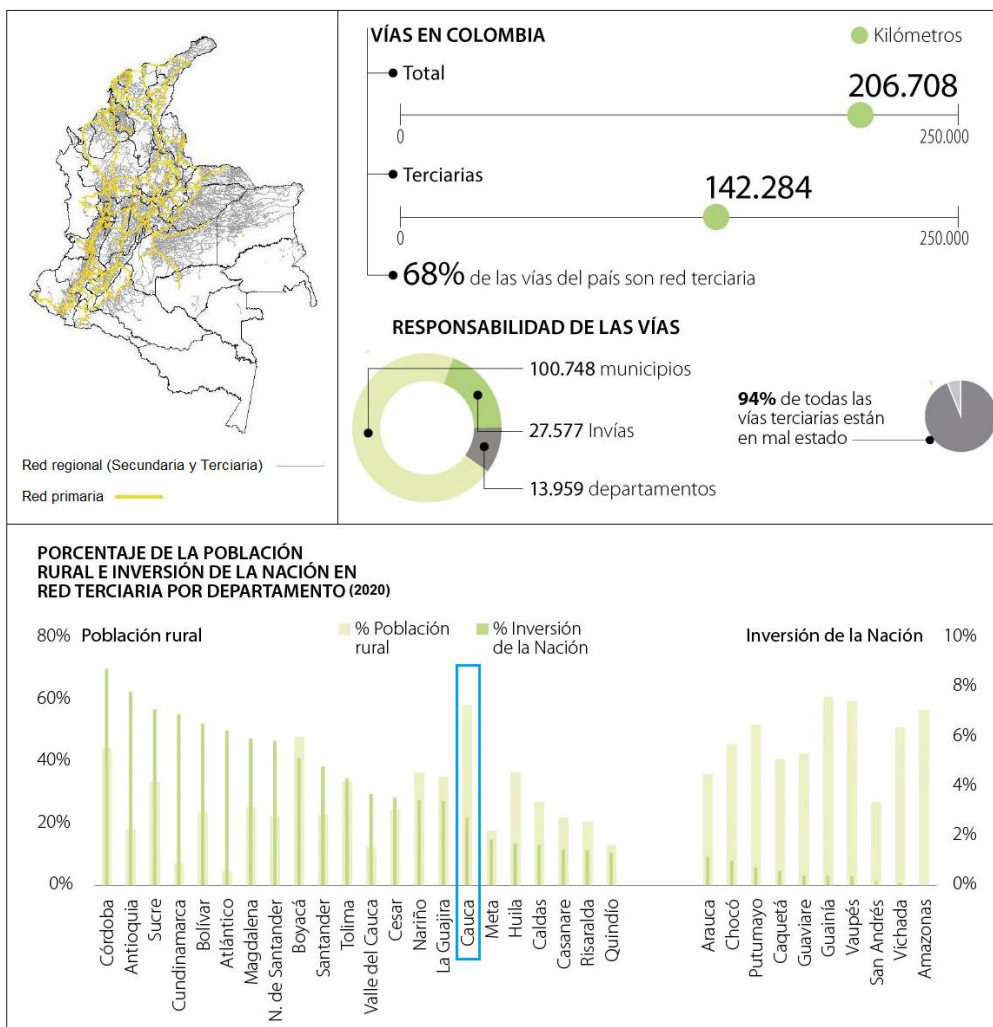
Ilustración 5
Variación composición de la red vial nacional



Fuente: Adaptado de ANI, Invías y Ministerio de Transporte (2018).

Durante el Gobierno Nacional 2018-2022 se asignaron 5.6 billones de pesos a la red vial terciaria (Semana, 2022). En la actual administración 2022-2026, a través del Ministerio de Transporte se anunció la sustitución del Invías por el Invir. Esta nueva entidad asignará contratos a organizaciones locales para construir las vías terciarias, generando optimismo en la población (Villamizar, 2023). Se espera que, mediante las iniciativas adecuadas, las vías terciarias impulsen la economía y el desarrollo del país.

Ilustración 6
Panorama de las vías terciarias en Colombia



Fuente: La República (2019) y La República (2020).

Tabla 3
Parámetros de vías terciarias de Colombia

Aspecto	Descripción	Requisito
Tipo de vía	Tercer orden o vía terciaria	Identificar que la vía a intervenir sea de tercer orden, de acuerdo a la Resolución 1530 de 2017 Ministerio de Transporte. Resolución 411 de 2020 del Ministerio de Transporte.
Tránsito	TPD máximo permitido (veh. mixtos/día)	Máx. 500 veh/día
	Máxima cantidad de vehículos comerciales (buses y camiones) que transitan durante el día.	95 vehículos comerciales equivalentes/día
	Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el periodo de diseño	Máximo 500.000 ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el período de diseño
Período de diseño mínimo	Años	5
Pendiente longitudinal	Para implementación de soluciones diferentes a placa huella	≤ al 10%
	Para considerar uso de placa huella	Pendiente superior al 10%
Capacidad portante subrasante	CBR de la subrasante	≥ 3%

Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2021).

Nota: estos son los criterios considerados en la implementación de un proyecto de diseño para mejorar una vía terciaria.

2.1.2- Suelos de Colombia

Según Polanco (2009), dada la variedad de formaciones geológicas, climas y topografía, el país se ha subdividido en ocho regiones naturales: Amazonia, Región Andina, Orinoquía, Llanura Caribe, el Andén Pacífico, Valle del Río Cauca, La Tata y Media Guajira, y las islas del Caribe.

2.1.2.1- Suelos Departamento del Cauca

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), antes conocido como Ingeominas, ha estudiado la geología del departamento del Cauca. En el valle del río Cauca, al norte, predominan los sedimentos recientes del Cuaternario. También hay una mezcla de rocas sedimentarias e ígneas más antiguas a lo largo del río, especialmente en el lado este de la cordillera occidental. El subsuelo está principalmente compuesto por arcilla con carbón, sales y limolitas grises. Estas capas más antiguas se encuentran en contacto con las rocas dolomíticas de la cordillera central de forma irregular. En el lado este de la cordillera oriental, las formaciones geológicas están formadas por areniscas, limolitas y conglomerados. En las partes altas de la cordillera, hay diabasa, una roca ígnea, que se formó en el mismo período que las otras rocas de la región (Polanco, 2009).

2.1.2.2- Suelos Popayán

La región de Popayán es una extensa planicie derivada del valle andino, que se extiende hacia el Quindío al norte y hasta Quito al sur. Su formación se debe principalmente al relleno volcánico de la Cordillera Central y aportes de rocas cristalinas de esta cordillera y la occidental. La erosión del río Cauca, junto con levantamientos posteriores, esculpió la planicie del valle, mientras al sur se formó la cuenca irregular del Patía. La planicie actual es un remanente erosionado de este proceso (Polanco, 2009).

Geológicamente, el departamento del Cauca está dominado por la Formación de Popayán, compuesta por tres tipos de materiales:

- i) Lavas ácidas andesíticas y micas de los volcanes Puracé y Sotará.
- ii) Capas de materiales volcánicos arrastrados.
- iii) Materiales finos superficiales, como cenizas, transportados por el viento y el agua.

2.2- Marco Teórico

2.2.1- Técnicas de Mejoramiento de Suelos

Cuando los suelos presentan deficiencias mecánicas, como baja capacidad portante, susceptibilidad a asentamientos excesivos, expansión, licuefacción o grandes deformaciones, no son adecuados para la construcción de carreteras, ya sea como subrasantes o como materiales de préstamo para terraplenes, capas de sub-base o bases. En tales casos, se pueden reemplazar o mejorar mediante diversos procedimientos. Algunos de estos métodos son más comunes en el ámbito de las vías terrestres, debido a su eficacia y economía.

Las propiedades de los suelos pueden mejorarse reduciendo su relación de vacíos o mediante la mezcla con otras sustancias, clasificándose en diferentes categorías, como se muestra en la Figura 7.

Ilustración 7

Mejoramiento de suelos

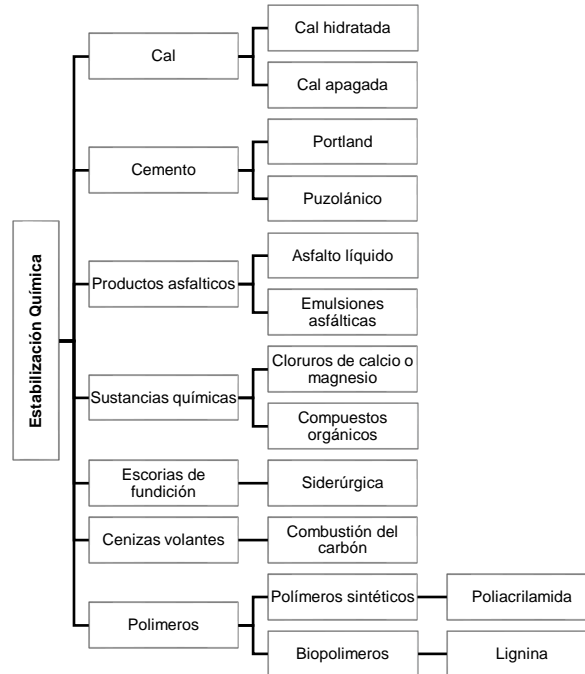


Fuente: adaptado de Polanco (2009).

2.2.2- Mejoramiento de Suelos por Estabilización Química

Ilustración 8

Mejoramiento de suelos por estabilización química



Fuente: adaptado de Rivera et al. (2020) y Polanco (2009).

2.2.3- Propiedades Físicas - Relaciones Volumétricas y Gravimétricas

Tabla 4

Proporciones de volúmenes y pesos

Volumen total	V	Peso total	W
Volumen de sólidos	V_s	Peso de sólidos	W_s
Volumen de agua	V_w	Peso del agua	W_w
Volumen de aire	V_a	Peso del aire	W_a
Volumen de vacíos	V_v		
$V_v = V_w + V_a, \quad V = V_s + V_v, \quad W = W_s + W_w$			

Fuente: Polanco (2009).

2.2.3.1- Relaciones Volumétricas

i) Porosidad (n): Indica la cantidad de vacíos o poros por unidad de volumen de suelo, y puede expresarse en formato decimal o en porcentaje. El volumen de vacíos puede estar parcial o totalmente ocupado por agua, y los valores típicos oscilan entre 0.20 y 0.95.

$$n = \frac{Vv}{V}$$

ii) Relación de vacíos o índice de poros (e): Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos proporciona una indicación de la cantidad de poros o vacíos presentes en el suelo. En este caso, se compara con el volumen de sólidos, que permanece constante independientemente de los cambios en la densidad del suelo. Para suelos cohesivos, los valores típicos de esta relación oscilan entre 0.7 y 2.0.

$$e = \frac{Vv}{Vs}$$

iii) Grado de saturación ($\%Sr$): Es la relación en porcentaje entre el volumen de agua y el volumen de vacíos en el suelo indica la cantidad de vacíos ocupados por agua. Un suelo alcanza el 100% de saturación cuando los vacíos están completamente llenos de agua, incluso si está seco al aire. Es crucial diferenciar entre el grado de saturación y la humedad: la saturación no puede superar el 100%, mientras que la humedad puede. Los suelos finos necesitan más agua para saturarse y aquellos con pocos vacíos requieren menos para alcanzar la saturación que aquellos con más vacíos.

$$\%Sr = \left(\frac{Vw}{Vv} \right) * 100$$

2.2.3.2- Relaciones Gravimétricas

i) Humedad o contenido de agua ($w\%$): Se trata de la relación en porcentaje entre el peso del agua presente en el suelo y el peso de los sólidos, lo que compara la cantidad relativa de agua con la de las partículas sólidas en el suelo.

$$\%W = \left(\frac{Ww}{Ws} \right) * 100$$

ii) Densidad o peso unitario del suelo

- **Peso unitario húmedo (γ) o (γ_m):** Se refiere a la relación entre el peso total de la masa de suelo y su volumen total, teniendo en cuenta la densidad promedio de las tres fases del suelo.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v}, \quad [gr/cm^3], [Tn/m^3], [Lbs/pie^3], [kN/m^3]$$

- **Densidad o peso unitario sumergido (γ'):** Corresponde al peso unitario sumergido, es decir, aquel que se obtiene después de restar el peso total de la masa de suelo y el empuje del agua, y luego dividir por el volumen total. Este parámetro se utiliza para calcular los esfuerzos geostáticos totales y efectivos en una masa de suelo. Estos esfuerzos dependen directamente del peso unitario de cada uno de los estratos ubicados por encima del elemento de análisis y de su espesor.

$$\gamma' = \frac{W_s + W_v}{V} - \frac{V * \gamma_w}{V} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

- **Peso unitario seco (γ_d):** Es la relación del peso de los sólidos al volumen total de la masa de suelo mide la cantidad de partículas sólidas por unidad de volumen de suelo. El valor máximo de la densidad seca depende de la densidad de los sólidos y de la limitación en la reducción de los vacíos. Este parámetro es crucial en el proceso de compactación del suelo, ya que durante este proceso hay una reducción en el volumen total, pero el peso de los sólidos permanece constante, lo que resulta en un aumento de la relación a medida que se compacta el suelo.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}, \quad \% \text{ compactación} = \frac{\gamma_d \text{ campo}}{\gamma_d \text{ laboratorio}} * 100$$

- **Peso unitario o densidad de sólidos (γ_s):** Es la relación entre el peso de los sólidos y su volumen. La densidad de los sólidos en suelos comunes es de aproximadamente 2.65 gr/cm^3 . Esta densidad puede variar ligeramente dependiendo del tipo específico de suelo.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

iii) **Gravedad o peso específico relativo (G_s):** Es la relación de la densidad de sólidos (γ_s) a la densidad del agua (γ_w). La gravedad específica (G_s) es un valor absoluto. La gravedad específica depende de los minerales constituyentes; los valores comunes están entre 2.5 y 3.0. El ensayo para determinar este parámetro corresponde a la norma AASHTO T100-70 y ASTM D854-83.

$$G_s = \frac{W_s}{(V_s * \gamma_w)}, \quad \gamma_w = 1.0 \text{ gr/cm}^3$$

2.2.4- Plasticidad y Clasificación del Suelo

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos y el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) se basan en la granulometría del material y en los límites de consistencia del suelo, también conocidos como límites de Atterberg.

Tabla 5
Tamaño de partículas ASTM – AASHTO

Nombre	Tamaño (mm)
Grava	76.20 – 4.76
Arena gruesa	4.76 – 2.00
Arena media	2.00 – 0.42
Limos	0.42 – 0.074
Arcillas	0.074 – 0.005
Coloides	<0.001

Fuente: Polanco (2009).

2.2.4.1- Granulometría

La granulometría es el proceso de determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. Este análisis puede llevarse a cabo mediante dos métodos diferentes: tamizado, utilizado para partículas gruesas, y sedimentación, empleado para partículas finas en las que no es posible determinar la distribución de tamaños por tamizado.

i) **Tamizado:** Para el proceso, se pesa el suelo en seco antes, luego se lava a través del tamiz N° 200 y se pesa nuevamente después del lavado. La diferencia define la cantidad de

suelo que pasa por el tamiz N° 200. Se pasa el material por cada tamiz, se pesa lo retenido y se calcula el porcentaje que pasa. Finalmente, se traza la curva granulométrica.

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}$$

A partir de la curva granulométrica, se pueden obtener el diámetro efectivo D_{10} (donde el 10% en peso de las partículas son de tamaño menor que su diámetro efectivo), D_{60} y D_{30} . Estos valores se utilizan para calcular el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura, lo que permite definir si el suelo está bien o mal graduado.

- **Coeficiente de uniformidad (C_u):** La condición de uniformidad de tamaños se determina mediante el coeficiente de uniformidad C_u , el cual será pequeño si la curva de granulometría se extiende poco horizontalmente, indicando una distribución uniforme de tamaños en el suelo. Por el contrario, si el suelo está bien graduado, la curva de granulometría se extenderá horizontalmente, lo que indica una amplia distribución de tamaños. En este caso, el coeficiente de uniformidad tendrá un valor grande.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Los suelos pueden ser mal graduado por: carecer de tamaños de granos intermedios o por tener los granos de tamaños muy uniformes. Una arena bien graduada cumple si: $C_u > 6$ y $1 < C_c < 3$.

- **Coeficiente de curvatura (C_c):**

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

2.2.4.2- Límites de Atterberg

La consistencia de los suelos arcillosos y otros materiales cohesivos está fuertemente influenciada por su contenido de humedad. Cuando el contenido de agua es bajo, estos suelos se comportan como sólidos frágiles, mientras que, un contenido de agua muy alto, fluyen como líquidos viscosos. Por lo tanto, el comportamiento del suelo varía según su contenido de agua y puede clasificarse en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido.

i) Límite Líquido (LL o WL): El límite líquido es la frontera convencional entre los estados líquido y plástico de un suelo. Cuando el contenido de humedad es alto, el suelo se

comporta como un líquido viscoso y fluye, perdiendo su forma específica. El límite líquido es el contenido de agua más bajo para el cual el suelo entra en estado líquido. Este parámetro se determina mediante el método de Casagrande.

ii) **Límite Plástico (LP o WP):** El suelo se considera en estado plástico cuando puede ser moldeado o trabajado para darle nueva forma sin desmoronarse. El límite plástico es el menor contenido de agua para el cual el suelo se encuentra en este estado. Se determina formando rollitos de suelo, y se considera que el límite plástico se alcanza cuando estos rollitos comienzan a agrietarse, generalmente a un diámetro de 3.0 mm.

2.2.4.3- Índice de Plasticidad (IP)

Es el intervalo de humedades dentro del cual el suelo se comporta como un material plástico. El IP siempre será un valor positivo y en general a mayor índice de plasticidad, mayores serán los problemas asociados con el uso de estos suelos. El IP se puede correlacionar con la resistencia del suelo, potencial de expansión, potencial de contracción, compresibilidad, entre otros. En las Tablas 6, 7 y 8 se muestran los criterios de clasificación en función de la plasticidad.

Tabla 6
Correlación entre IP y resistencia en estado seco

Descripción	IP	Resistencia en estado seco
No plástico	0 – 3	Muy baja
Ligeramente plástico	4 – 15	Ligera
Medianamente plástico	15 – 30	Mediana
Muy plástico	> 30	Alta

Fuente: Polanco (2009).

Tabla 7*Características de plasticidad y cohesión en función del IP*

IP	Características de plasticidad	Tipo de suelo	Características de cohesión
0	No plástico	Arena	No cohesivo
<7	Poco plástico	Limo	Parcialmente cohesivo
7 – 17	Medianamente plástica	Limo arcilloso o arcilla limosa	Cohesivo
>17	Altamente plástico	Arcilla	Cohesivo

Fuente: Polanco (2009).

Tabla 8*Características de plasticidad y cohesión en función del IP*

IP	Plasticidad	IP	Características de cohesión
0	No presenta	10 – 20	Mediana
1 – 5	Ligera	20 – 40	Alta
5 – 10	Baja	>40	Muy alta

Fuente: Polanco (2009).

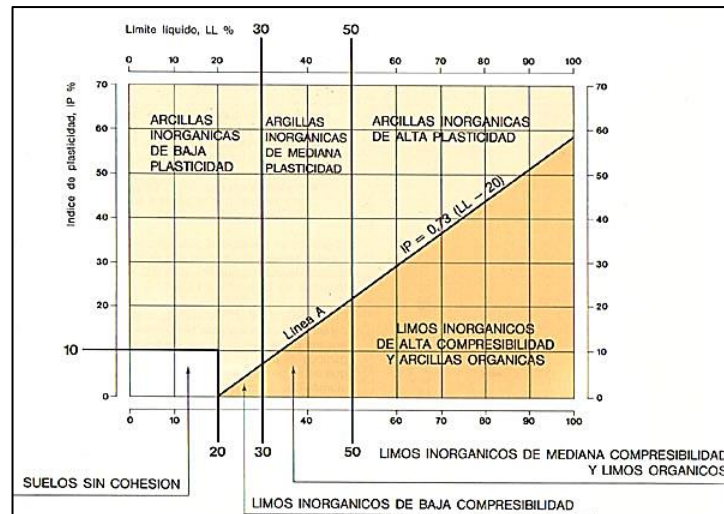
2.2.4.4 - Clasificación del Suelo

i) **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos:** Los estudios registrados en este documento se refieren a suelos finos, por lo tanto, es necesario utilizar la carta de plasticidad de Casagrande. Esta carta contiene dos líneas importantes para clasificar los suelos: la Línea A y la Línea B. La Línea B es una línea vertical trazada en el punto donde el índice de plasticidad es del 50% ($LL = 50\%$).

$$IP \text{ (línea A)} = 0.73 * (LL - 20)$$

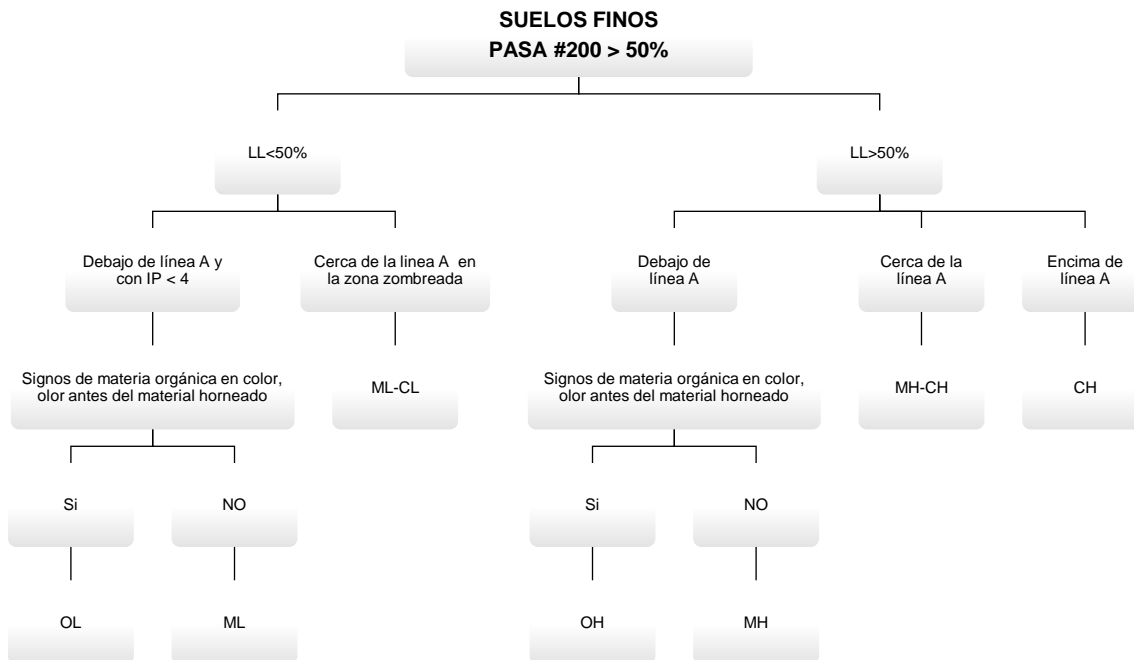
Los suelos que caen por encima de la Línea A son clasificados como Arcillas (C), mientras que los que caen por debajo son clasificados como Limos (M). Por otro lado, la Línea B divide los suelos en dos grupos: a la izquierda se encuentran los de baja compresibilidad (L), y a la derecha los de alta compresibilidad (H).

Ilustración 9
Carta de plasticidad de Casagrande



Fuente: FAO (2024).

Ilustración 10
Sistema unificado de clasificación de suelos



Fuente: Polanco (2009).

ii) **Sistema de la AASHTO:** El sistema divide los suelos en dos grandes grupos y les asigna símbolos desde A-1 hasta A-8. El primero los suelos granulares y el segundo correspondiente a suelos finos.

- **Suelos finos:** Los suelos limosos y arcillosos son aquellos en los que más del 35% de las partículas pasan el tamiz N° 200. Estos suelos comprenden los siguientes símbolos: A-4, A-5, A-6, y los A-7 con sus subdivisiones A-7-5 y A-7-6. Por otro lado, el índice de grupo depende del porcentaje de partículas que pasan el tamiz N° 200, el límite líquido y el índice de plasticidad.

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde *F*: Porcentaje que pasa el tamiz N° 200, *LL*: límite líquido, *IP*: Índice de plasticidad. El primer termino es el índice de grupo parcial por limite líquido, el segundo determinado a partir de IP.

Ilustración 11

Clasificación de suelos AASHTO

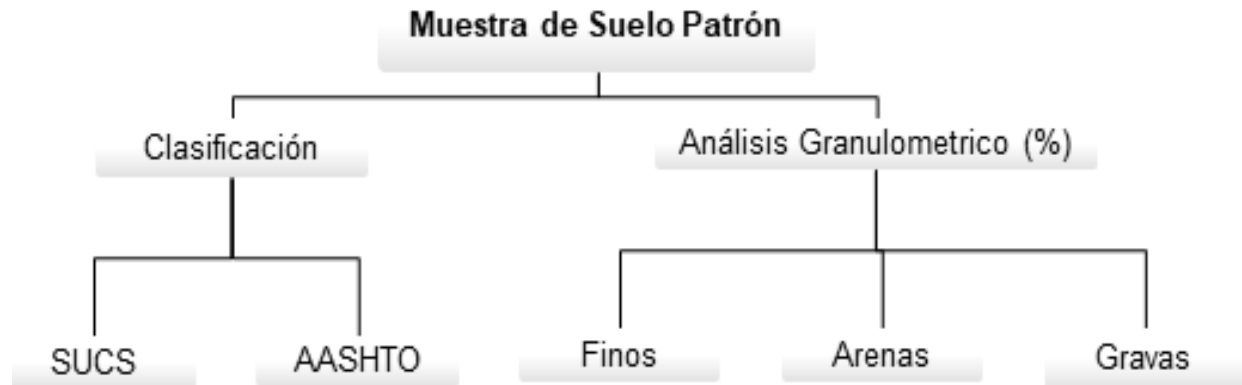
Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos pasa el tamiz N°200)							Materiales limo-arcillosos (más de 35% pasa el tamiz N°200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Análisis de tamizado (% pasa)											
2.00 mm (# N°10)	50 máx	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.425 mm (# N°40)	30 máx	50 máx	51 min	----	----	----	----	----	----	----	----
0.075 mm (# N°200)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de fracción pasa # N°40											
Límite Líquido (LL)	----	----	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	41 min
Índice Plástico (IP)	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min	11 min
Materiales constituyentes significativos	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general como subrasante	Excelente a buena							Regular a pobre			
El IP del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL menos 30. El IP del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30 (ver Gráfico siguiente). La casilla A-3 antes de la A-2 es debido al proceso de eliminación de izquierda a derecha. No indica superioridad de A-3 sobre A-2.											

Fuente: Ricaldoni (2017).

2.2.4.4.1- Determinación Tipo de Suelo

Ilustración 12

Parámetros de clasificación de suelo y análisis granulométrico



Fuente: elaboración propia.

2.2.5- Parámetros de Evaluación

2.2.5.1- Ensayos de Compactación

El proceso de compactación mejora la resistencia y capacidad de soporte del suelo, reduce los asentamientos y mejora la estabilidad. Se mide mediante pruebas de densidad en laboratorio para determinar la densidad máxima y la humedad óptima. Durante la compactación, el agua es necesaria para permitir que las partículas se muevan y formen una estructura densa. A medida que se aumenta el contenido de agua, la densidad seca también aumenta hasta alcanzar un máximo. Sin embargo, más allá de cierto punto, la densidad disminuye nuevamente, ya que el agua ocupa espacios que podrían ser ocupados por partículas sólidas. El contenido de agua para el máximo peso específico se llama humedad óptima (Polanco Flórez, 2009).

En las pruebas tipo Proctor, se relacionan el peso unitario seco del suelo, el contenido de agua o humedad, el esfuerzo o energía de compactación (que se aplica por impacto) y el tipo de suelo.

$$E = \frac{N * n * W * h}{V}$$

Donde V : volumen del suelo, W : peso del martillo de compactación y h : altura de caída, n : número de capas de suelo necesarias para llenar el molde y N : número de golpes que se debe aplicar a cada capa durante la compactación. La diferencia entre el proctor estándar y modificado es la energía de compactación.

Tabla 9
Ensayos de compactación

Ensayo	Energía de Compactación		
	$Kg - cm/cm^3$	$Lbs - pie/pie^3$	$kN - m/m^3$
Proctor estándar	6.05	12375	591.3
Proctor modificado	27.31	55896	2696

Fuente: Polanco (2009).

2.2.5.2- Relación de Soporte del Suelo (CBR)

Este ensayo es utilizado para evaluar la capacidad de un suelo para soportar cargas. Implica la comparación de la presión requerida para penetrar el suelo a una profundidad específica, generalmente 0.1 pulgadas, con la presión necesaria para penetrar la misma distancia en un suelo de referencia denominado suelo patrón.

Para suelos finos cohesivos, se procede a secar el suelo al aire y desmenuzarlo para llevar a cabo la prueba con el material que pasa a través del tamiz N° 10. Para suelos gruesos, se determina la humedad y densidad de cada molde y se registran estos datos para análisis posterior.

Las muestras se sumergen en agua durante al menos cuatro días para evaluar el efecto del agua y las características expansivas del suelo. Después de este periodo de inmersión, se permite escurrir las muestras durante 15 minutos y luego se someten a pruebas de penetración para calcular el valor del CBR en cada caso.

$$\% \text{ Expansión libre} = \frac{H_{final} - H_{inicial}}{H_{inicial}} * 100$$

2.2.5.3- Módulo Resiliente (M_R)

Se define como el módulo de elasticidad basado en la deformación recuperable bajo cargas repetidas. Es la propiedad que describe la capacidad de un suelo para absorber energía cuando se deforma elásticamente y luego liberarla. Se determina mediante ensayos triaxiales

dinámicos con cargas repetidas. Durante este ensayo, una probeta de material es sometida a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento (σ_3) y un esfuerzo desviador dinámico (σ_d).

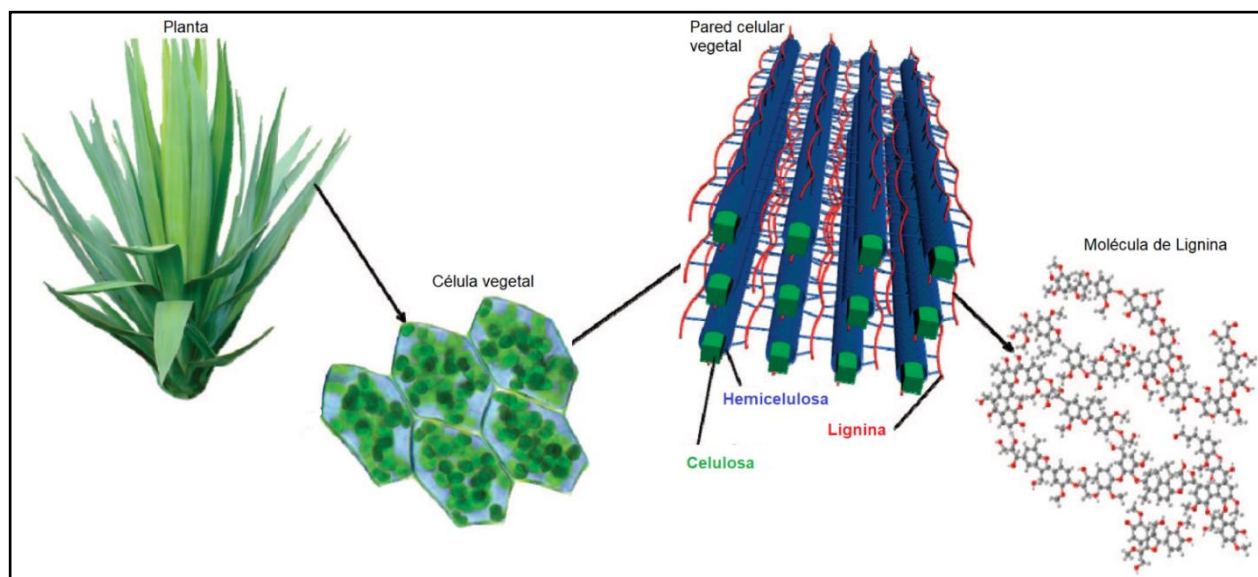
$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_T}$$

2.2.6- Residuos Lignocelulósicos

Los residuos lignocelulósicos o biomasa lignocelulósica son desechos de origen vegetal, compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Se encuentran en mayor cantidad en la madera, pasto y desechos agrícolas y forestales, trabajando en conjunto para reforzar las paredes celulares de las plantas. Debido a su abundancia y naturaleza renovable, estos residuos han captado el interés en la obtención de bioproductos químicos renovables y biocombustibles, considerados como potenciales sustitutos de los derivados del petróleo (Bio3, 2022).

Ilustración 13

Estructura de la matriz lignocelulósica



Fuente: Zakzeski et al. (2010).

Nota: En las paredes celulares de las plantas, la lignina ocupa los espacios entre la celulosa y la hemicelulosa.

La baja reactividad en estos residuos implica que no pueden convertirse en bioproductos sin procesos adicionales. La celulosa, hemicelulosa y lignina, al formar una estructura compleja en la matriz vegetal, presentan dificultades para su transformación directa. Para aprovechar completamente tales residuos como recursos renovables, se requieren procesos específicos que aumenten su reactividad mediante tratamientos que descomponen y modifican los polímeros presentes, mejorando así la accesibilidad a las reacciones químicas y permitiendo una conversión más efectiva en bioproductos químicos y biocombustibles.

2.2.6.1- Materias Primas de Origen Lignocelulósico con Alto Contenido en Lignina

A nivel global, anualmente se procesan alrededor de 540 millones de toneladas secas de caña de azúcar, generando aproximadamente 280 kg de bagazo de caña de azúcar (BCA) por cada tonelada de caña. Brasil, India y China son los principales contribuyentes a esta producción a nivel mundial (Loh et al., 2013).

El sector agrícola de Colombia produce aproximadamente 72 millones de toneladas de desechos provenientes de cultivos como café, palma de aceite, caña de azúcar, maíz, arroz, banano y plátano, los cuales podrían ser aprovechados para la producción de lignina (Peñaranda et al., 2017).

2.2.6.1.1- Bagazo de Caña de Azúcar (BCA)

Es un residuo fibroso obtenido durante el proceso de molienda y exprimido de los tallos de la caña de azúcar. Después de extraer el jugo, aproximadamente un 30% del producto final es bagazo. Su color puede variar desde blanco parduzco hasta un tono verde claro, dependiendo de la variedad y edad de la caña (Becerra et al., 2016). Su versatilidad permite diversas aplicaciones, desde la generación de electricidad y pulpa hasta la fabricación de productos basados en fermentación, como el etanol, promoviendo prácticas sostenibles (Cardona et al., 2010).

La Cámara de la Industria de Pulpa, Papel y Cartón de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) señala que el bagazo de caña constituye el 12,2% de la materia prima para esta actividad, situándose después de la fibra reciclada obtenida de residuos de papel postconsumo (60,8%) y la fibra de madera de plantaciones forestales certificadas con manejo responsable (26,7%) (La República, 2022b).

Tabla 10
Materiales vistos como residuos lignocelulósicos a nivel mundial

Residuos de Material Vegetal	Composición Química (% peso seco)		
	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Tallos de madera dura	18–25	24–40	40–55
Tallos de madera blanda	25–35	25–35	45–50
Mazorcas de maíz	15	35	45
Paja de arroz	18	24	32.1
Periódico	18–30	25–40	40–55
Bagazo de caña de azúcar	19–24	27–32	32–44
Paja de trigo	16–21	26–32	29–35
Paja de cebada	14–15	24–29	31–34
Bambú	21–31	15–26	26–43
Pulpa de café	18.8	46.3	35
Residuos de plátano	14	14.8	13.2

Fuente: Sixta (2006).

Nota: se resaltan en negrilla los materiales con un contenido considerable de lignina en estado natural.

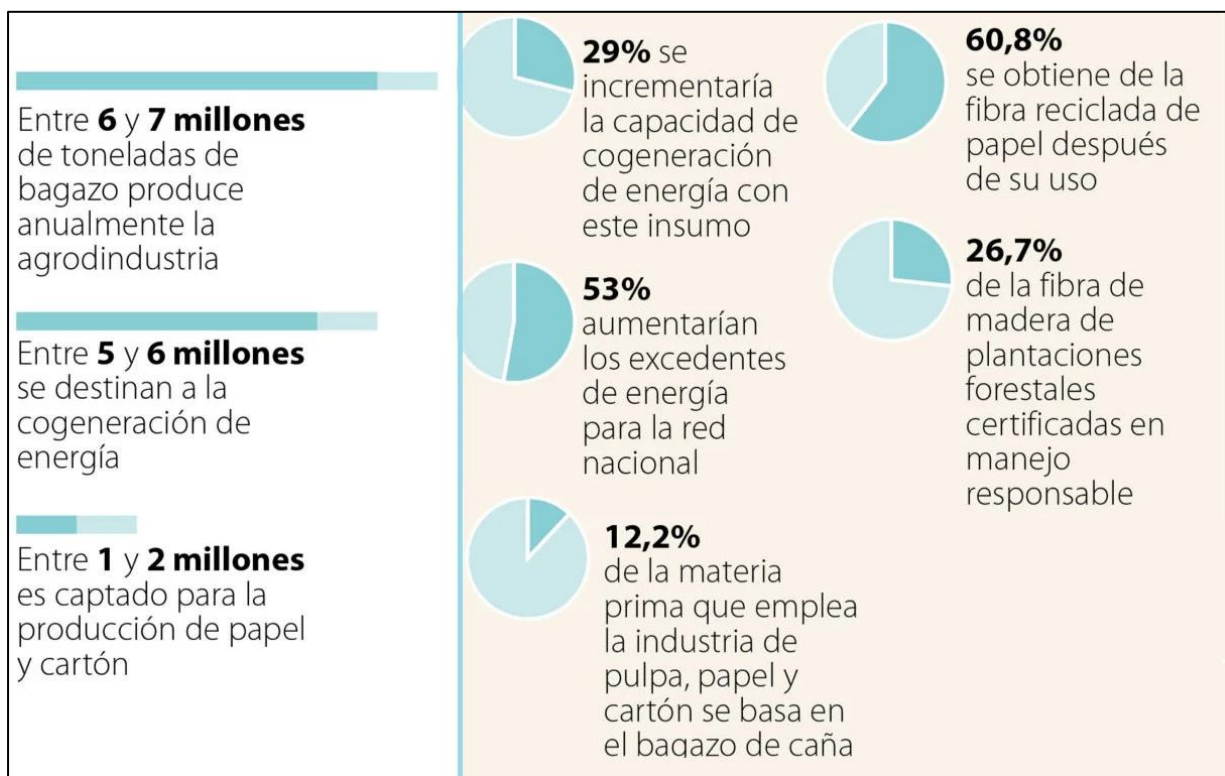
Tabla 11*Caracterización del bagazo de caña de azúcar*

Componente	Base Seca (% b.s)	Desviación Estándar
Extractivos	8.792	± 2.377
Lignina	19.710	± 0.760
Celulosa	46.748	± 4.400
Hemicelulosa	23.621	± 2.105
Cenizas	1.130	± 0.006
Total	100.000	--

Fuente: Carvajal (2015).**Ilustración 14***Bagazo de caña de azúcar***Fuente:** Trupal (2021).

Ilustración 15

Panorama bagazo de caña de azúcar en Colombia



Fuente: La República (2022b).

El sector agroindustrial de la caña en Colombia se concentra en más de 50 municipios distribuidos en cinco departamentos a lo largo del valle del río Cauca (Valle, Cauca, Risaralda, Caldas y Quindío). Colombia sobresale en la industria cañera al superar la producción de azúcar por hectárea, aunque su participación relativa no es significativa a nivel mundial, dado el predominio de grandes productores como Brasil, India, la Unión Europea y China. Según cifras de la Organización Internacional del Azúcar (OIA), para el periodo 2017-2021 ocupó el puesto 15 entre los mayores productores mundiales, con una participación del 1,3% de la producción mundial (Asocaña, 2023).

Teniendo en cuenta tal escenario, es viable explorar la utilización del bagazo de caña de azúcar para obtener lignina, dado que la agroindustria de la caña en Colombia genera anualmente entre seis y siete millones de toneladas de bagazo, destinando aproximadamente cinco a seis millones a la cogeneración de energía.

2.2.6.1.2- Cascarilla de Arroz (CA)

Es un residuo que se produce durante la molienda del arroz, alrededor de 20 a 22 kg por cada 100 kg de arroz. La cáscara, también conocida como paja, constituye la capa externa no comestible que envuelve y protege el grano, eliminándose en la fase inicial de la molienda. La composición de la cáscara de arroz incluye un 20% de ceniza, 38% de celulosa, 22% de lignina, 18% de pentosa y 2% de otros componentes orgánicos, dependiendo de factores ambientales como el clima.

Este residuo se aprovecha principalmente como materia prima para la producción de energía. No obstante, se enfrenta al desafío del alto contenido de cenizas de sílice, afectando el poder calorífico de la biomasa (Bazargan et al., 2014). A nivel mundial, se producen aproximadamente 120 millones de toneladas de cascarrilla de arroz, siendo China, India e Indonesia los mayores productores, vinculado a la producción global de arroz de 600 millones de toneladas anuales.

Ilustración 16

Cascarilla de arroz (suelto)



Fuente: Rice Knowledge Bank (2016).

En Colombia, la producción anual de arroz alcanza los 2.5 millones de toneladas, distribuidas en 455 mil hectáreas, principalmente en regiones como Tolima, Huila, Casanare, Norte de Santander, Meta, Bolívar, Arauca y Sucre. Cerca de 452 mil toneladas de esta producción corresponden a cascarilla (Peñaranda et al., 2017). Si bien a nivel mundial esta cáscara se utiliza como materia prima, una parte se quema, generando problemas ambientales y de salud, especialmente en naciones en desarrollo. Por lo tanto, resulta esencial encontrar soluciones para aprovechar plenamente sus propiedades y evitar su desecho (Adam et al., 2012).

Además, la cascarilla de arroz encuentra aplicaciones en la producción de materiales a base de silicio, pigmentos, cauchos rellenos, paneles solares, electrónica, concretos, absorbentes y energía. Con un poder calorífico de 14 MJ/kg y un alto contenido en cenizas, esta cáscara tiene un mercado significativo en la industria del acero y la construcción (Carvajal, 2015). Las materias primas de origen lignocelulósico en el territorio nacional, como el bagazo de caña y la cascarilla de arroz, cumplen con los requerimientos buscados, ya que son materiales con alto contenido de lignina. En la Tabla 12 se presentan algunas composiciones de los residuos agroindustriales en el contexto colombiano.

Tabla 12

Composición de algunos residuos agroindustriales en el contexto colombiano

Residuos Agroindustriales	Producción por cultivo (ton)	Residuos por cultivo (ton)	Celulosa	Lignina	Hemicelulosa	Humedad
Bagazo caña de azúcar	22,728,758	6,136,765	49.96	22.90	15.20	9.50
Cascarilla de arroz	2,412,220	451,085	36.89	19.77	16.08	5.40
Residuos de malta	333,798	316,667	17.44	18.69	11.13	11.00
Cascarilla de café	558,540	71,493	22.71	16.03	36.34	10.94
Paja de trigo	15,780	7,890	32.89	15.77	20.27	9.90
Mazorca de	1,53	1,07	3	1	31.9	8.30

maíz	6,290	5,403	2.10	2.84	1	
Corteza de madera	660,331	99,050	27.90	12.59	13.75	40.00
Cascarilla de soja	54,207	2,385	36.44	8.35	23.41	8.20
Residuos de fique	18,935	3,408	8.73	3.07	3.74	80.50
Cáscara de plátano	2.724.888	416,908	1.41	1.49	1.58	87.40
Cachaza de caña	22,728,758	1,508,534	5.20	1.30	3.50	77.50

Fuente: Carvajal (2015).

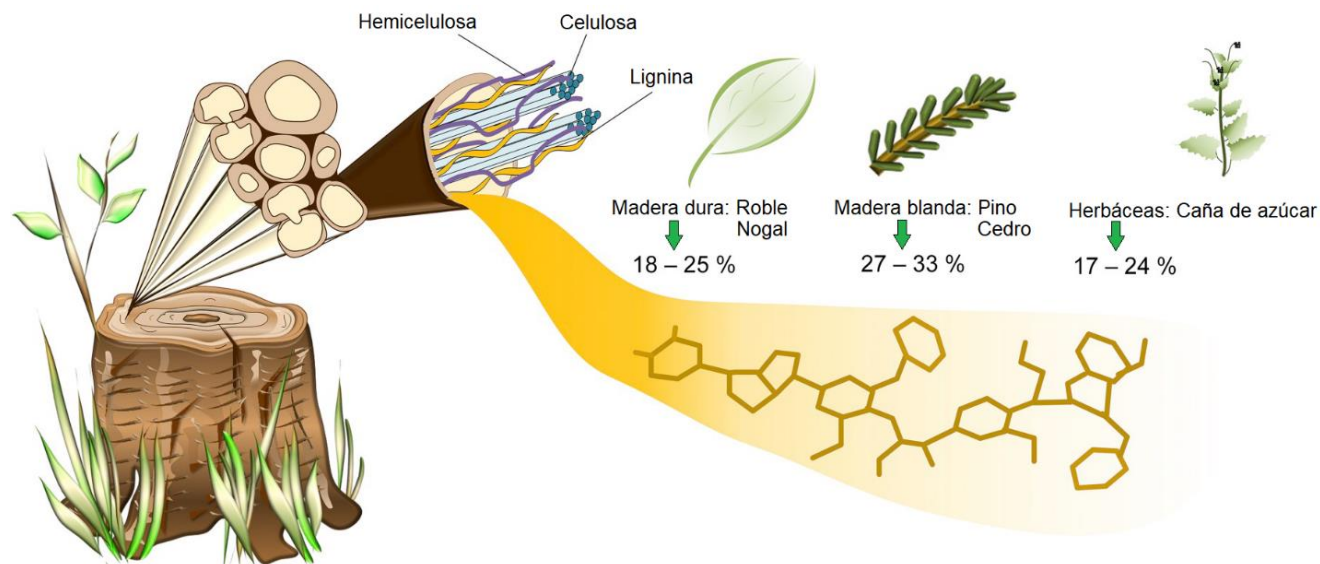
2.2.7- Lignina

2.2.7.1-Lignina- Estado Natural

La celulosa es un polímero de glucosa, siendo la principal responsable de la estructura de las fibras en la madera. La lignina, por otro lado, rodea y recubre estas fibras de celulosa, proporcionando resistencia y rigidez a la estructura celular de la madera (Jędrzejczak et al., 2021). La publicación de Becker y Wittmann (2019) destaca también a la lignina como estabilizador estructural, facilitador de la conducción de agua y protector contra la descomposición en diversas plantas, incluyendo madera dura, madera blanda y herbáceas.

La lignina es una macromolécula tridimensional altamente entrecruzada que posee altura, ancho y profundidad. Está compuesta por tres tipos de fenoles sustituidos: coniferilo (G), sinapilo (S) y p-cumaroilo (H). Estos fenoles se generan mediante la polimerización enzimática, facilitada por agentes o catalizadores, lo que resulta en la formación de una amplia variedad de grupos funcionales y enlaces (Watkins et al., 2015). Según Becker y Wittmann (2019), la madera blanda tiene una cantidad significativa de lignina tipo G, mientras que la madera dura presenta una combinación de G y S. Además, en plantas como hierbas y pastos la lignina puede contener una mezcla de G, S y H.

Ilustración 17
Componentes de la matriz lignocelulósica



Fuente: Becker y Wittmann (2019).

Nota: Las plantas terrestres contienen más fracciones de lignocelulosa.

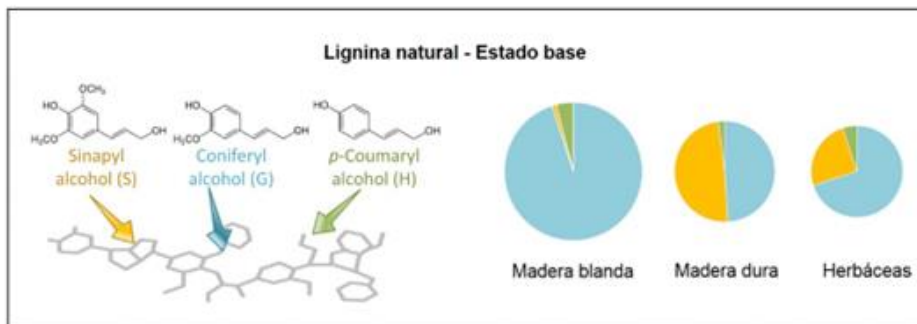
Naturalmente, la lignina es de color blanco, pero puede oscurecerse debido a reacciones químicas en un entorno alcalino. Otros procesos que contribuyen al cambio de color incluyen las reacciones de condensación de la lignina y la oxidación de los grupos fenólicos (Gellerstedt y Henriksson, 2008). La cantidad de lignina varía entre plantas, como se observa en la Figura 17. En esta representación, el tamaño del círculo indica la concentración de lignina, mientras que el segmento destaca la fracción de los componentes mencionados.

Por lo tanto, la lignina no solo varía en cantidad y tipo entre plantas, sino que su formación se realiza a través de la unión de estos monolignoles principales mediante reacciones químicas, catalizadas por enzimas como lacasas y peroxidasa. Las enzimas desempeñan un papel central en la formación de tales componentes, construyendo cadenas de lignina resistentes. Así, contribuyen a la estructura y funcionalidad de la lignina en diversos tipos de plantas (Becker y Wittmann, 2019).

En cuanto a la caracterización química, la definición de la lignina no es tan clara como la de los otros polímeros de la matriz debido a la complejidad externa que posee, su difícil aislamiento y su caracterización estructural (Sánchez, 2008).

Ilustración 18

Distribución de monolignoles en especies con lignina

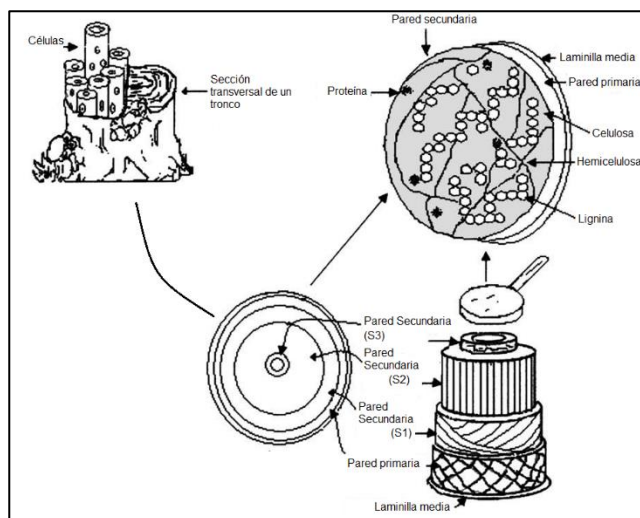


Fuente: Becker y Wittmann (2019).

Nota: Las plantas varían en la cantidad de lignina (representada por el tamaño del círculo) y en la proporción de constituyentes fenilpropanoides (S, G, H) (indicada por el tamaño del segmento).

Ilustración 19

Transición detallada de la matriz lignocelulósica

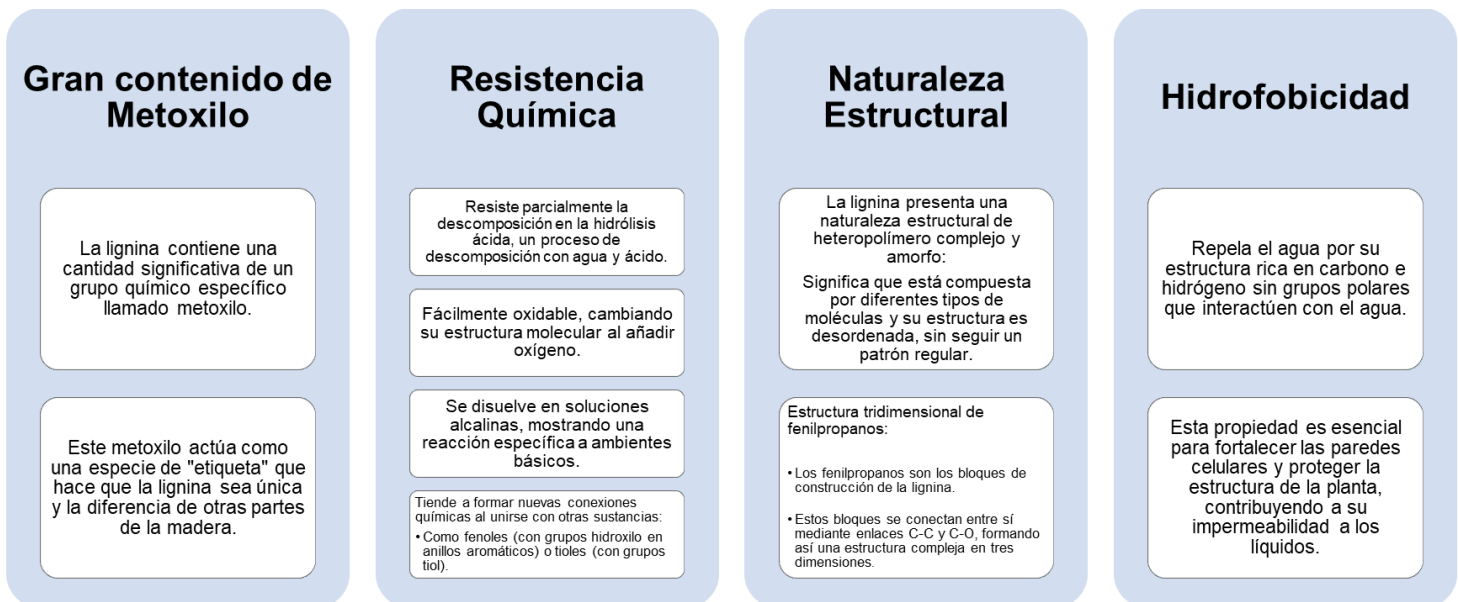


Fuente: Sánchez (2008).

Nota: La composición de la lignina se caracteriza por ser heteropolimérica, amorfa y estar interconectada con otros elementos celulares.

La Figura 19 describe algunas de las características y propiedades que definen la estructura y función de la lignina. Al respecto, se resalta que abordar la naturaleza química de ésta desde la perspectiva de la Ingeniería Civil es un desafío, ya que los términos relacionados son complejos y no se exploran a fondo en la disciplina. No obstante, se ha realizado una adaptación para comprender la literatura relacionada y ofrecer explicaciones más accesibles.

Ilustración 20
Características y propiedades de la lignina

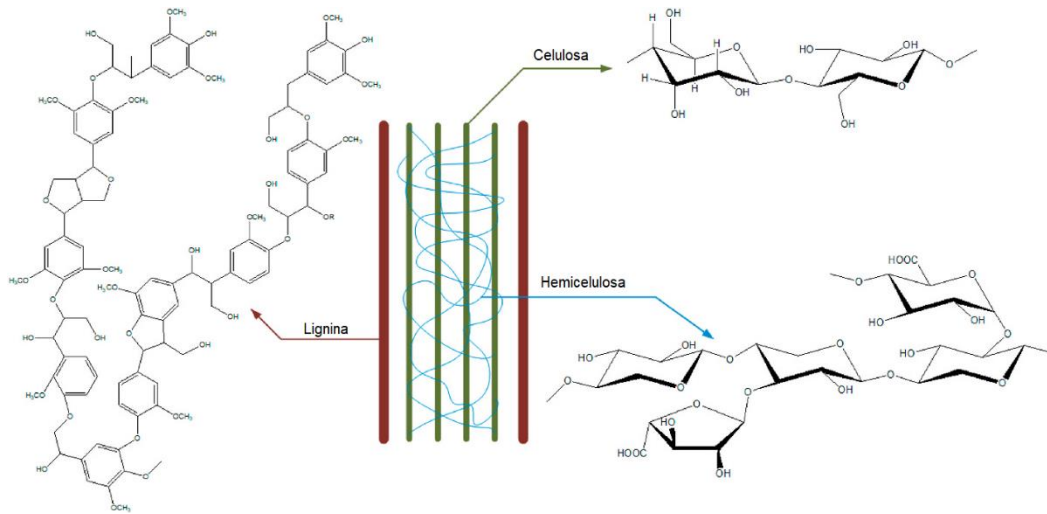


Fuente: adaptado de Carvajal (2015) y Pereira et al. (2011).

La evidencia demuestra que la lignina proporciona dureza a la pared celular al adherirse a las fibras de celulosa, permitiendo una expansión en su tamaño. Esto explica por qué las plantas leñosas tienen un mayor tamaño, ya que necesitan un transporte considerable de agua, razón por la cual las fibras de celulosa necesariamente tienden a ser amplias. Además, al unirse tanto a la hemicelulosa como a la celulosa, la lignina forma un sello físico que actúa como una barrera impenetrable en la pared celular de la planta (Sánchez, 2008).

Ilustración 21

Estructuras químicas de los componentes en la biomasa lignocelulósica

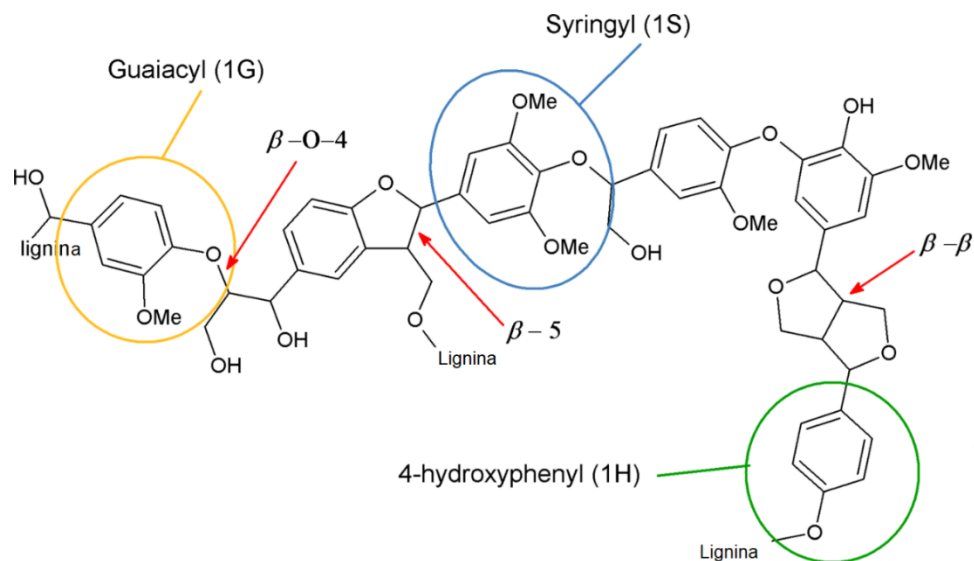


Fuente: Poveda et al. (2021).

Nota: La biomasa lignocelulósica es una matriz porosa microestructurada compuesta principalmente por lignina (14-26%), hemicelulosa (20-35%) y celulosa (35-50%).

Ilustración 22

Detalle de los monómeros o monolignoles de fenilpropano en la lignina



Fuente: Jędrzejczak et al. (2021).

Nota: La distribución de las monolignoles dependerá de la fuente vegetal.

Chen (2014) indica que anteriormente se utilizaba un modelo estructural para describir la lignina. Este modelo consiste en una estructura hipotética inferida a partir de la propia naturaleza de la lignina, ya que incluso al aislarla de una misma planta pueden surgir otras categorías de enlaces y composiciones de grupos funcionales, lo que complica la definición de una estructura definitiva.

2.2.8 - Lignina Tecnificada

Se denomina así porque es un subproducto que se obtiene durante los procesos industriales, como en el sector de la pulpa y el papel. Esta lignina se encuentra en las corrientes de licor negro tras la deslignificación o pulpeo de la madera, y difiere en composición y propiedades respecto a la lignina natural presente en las plantas (Chauhan et al., 2022). En su mayoría, la lignina tecnificada es obtenida a partir de la industria papelera, donde es utilizada como subproducto en aplicaciones energéticas de bajo valor (Jędrzejczak et al., 2021).

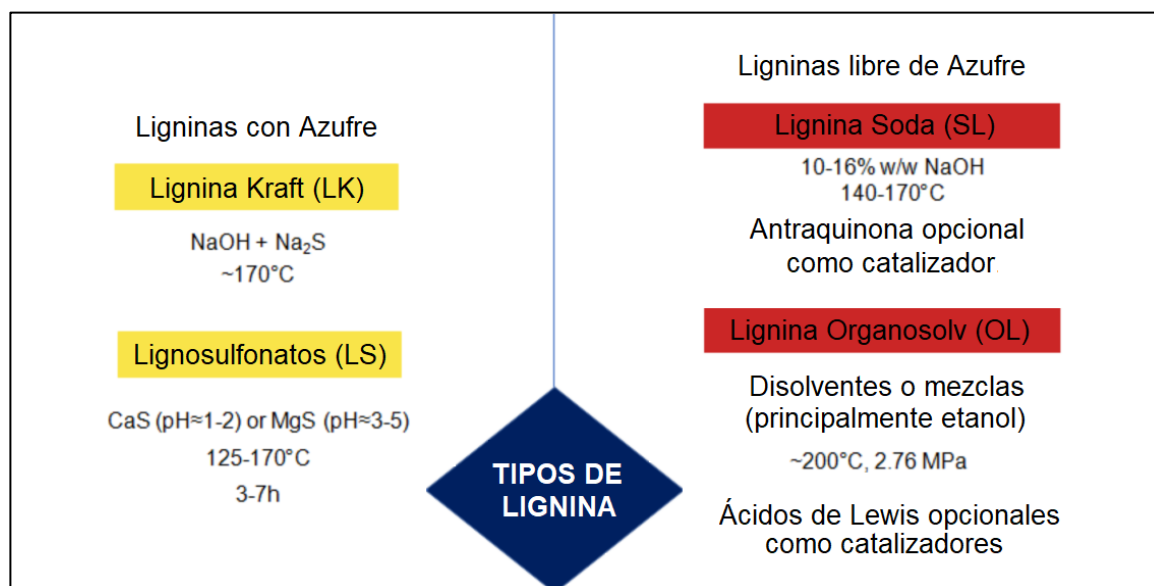
Se han propuesto posibles modelos para entender cómo interactúan las redes de monómeros de lignina descritas en el apartado de lignina natural. En la publicación de Jędrzejczak (2021), los monómeros, que son las unidades más pequeñas de la lignina, están conectados entre sí mediante enlaces éter y carbono-carbono, formados durante la polarización radical (proceso químico en el cual las moléculas monómeros se combinan para formar cadenas más largas y complejas llamadas polímeros). El enlace éter β -O-4 es el más común, representando alrededor del 40-50% del contenido de lignina, independientemente de su origen. El segundo enlace más común es el carbono-carbono β - β .

Existen diversos métodos para procesar biomasa, generando ligninas con diferentes características. Las estructuras de las ligninas tecnificadas se clasifican según los procesos industriales de pulpeo utilizados para su aislamiento (kraft, sulfito, soda o alcalino y organosolv) (Jędrzejczak et al., 2021).

Por otra parte, el contenido de azufre es un parámetro importante que influye en qué tipo de lignina se va a obtener. En la literatura se distinguen dos grupos de ligninas en función del azufre: el que contienen azufre incluye lignina kraft (LK) y lignosulfonatos (LS), producidos principalmente en procesos industriales de pulpeo de lignocelulosa; el segundo tipo, libres de azufre, lignina de soda o alcalina (SL) y lignina de organosolvente (OL).

Ilustración 23

Métodos para procesar la lignina tecnificada



Fuente: Jędrzejczak et al. (2021).

Nota: la distribución de las monolignoles dependerá de la fuente vegetal.

Tabla 13

Comparación propiedades de diferentes tipos de ligninas tecnificadas

	Kraft	Lignosulfonato	Soda	Organosolv
Pureza de la lignina	Alta	Baja - media	Alta	Muy alta
Contenido de azufre (%)	1 - 3	3 - 8	0	0
Peso molecular (kg mol ⁻¹)	1.5 - 5 (hasta 25)	1- 50 (hasta 150)	0.8 - 3 (hasta 15)	0.5 - 5
Solubilidad	Agua, Álcali	Agua	Álcali	Solventes orgánicos
Técnicas de separación	Precipitación (cambio de pH)	Ultrafiltración	Precipitación (cambio de pH)	Precipitación (adición de un disolvente insoluble)

Fuente: Luo y Abu-Omar (2017).

2.2.8.1- Reservas y Producción

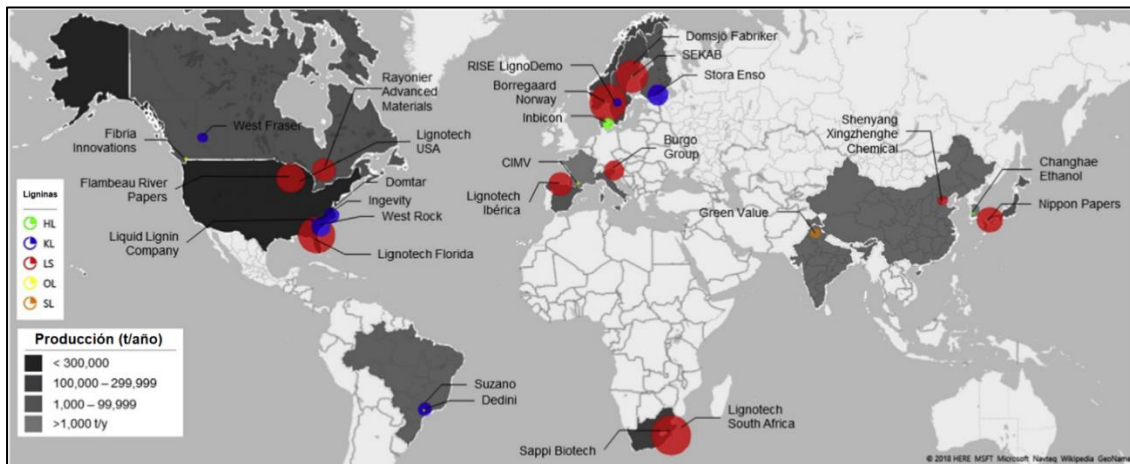
La lignina fue reconocida desde hace tiempo como el principal subproducto industrial y el segundo polímero natural más abundante en el mundo, originado en la industria de pulpa y papel desde la primera mitad del siglo XX. En 2010, se estimaba que esta industria generaba alrededor de 50 millones de toneladas de lignina anualmente, destinando el 98%-99% para la generación de energía, mientras que el remanente se empleaba en la fabricación de productos especializados de bajo valor, tales como agentes dispersantes o aglutinantes (Torres et al., 2020).

Históricamente subestimada, la lignina ha experimentado una transformación y ahora se considera un recurso con potencial para ser más que un simple subproducto industrial, convirtiéndose en una alternativa de producción sostenible (LignoCity, 2023). En cuanto al mercado, existen productores de lignina distribuidos en todo el mundo, cada uno con su tipo y cantidad específicos de lignina producida.

Los principales desafíos para aprovechar y darle valor agregado a la lignina radican en el desarrollo de procesos de transformación con las propiedades necesarias para aplicaciones específicas de valor agregado. La lignina tipo LS (lignosulfonato) es la más producida en el mundo, seguida por la KL (Lignina Kraft). Borregard Lignotech se destaca como el mayor productor mundial de LS, con instalaciones en Europa, Asia, África y América. La KL se recupera principalmente mediante la tecnología LignoBoost, propiedad y comercializada por Valmet. Finalmente, Suzano, una empresa brasileña de pulpa y papel, recupera y comercializa la lignina tipo KL sulfonada en América Latina (Figura 23).

Ilustración 24

Distribución global de los principales productores industriales de lignina

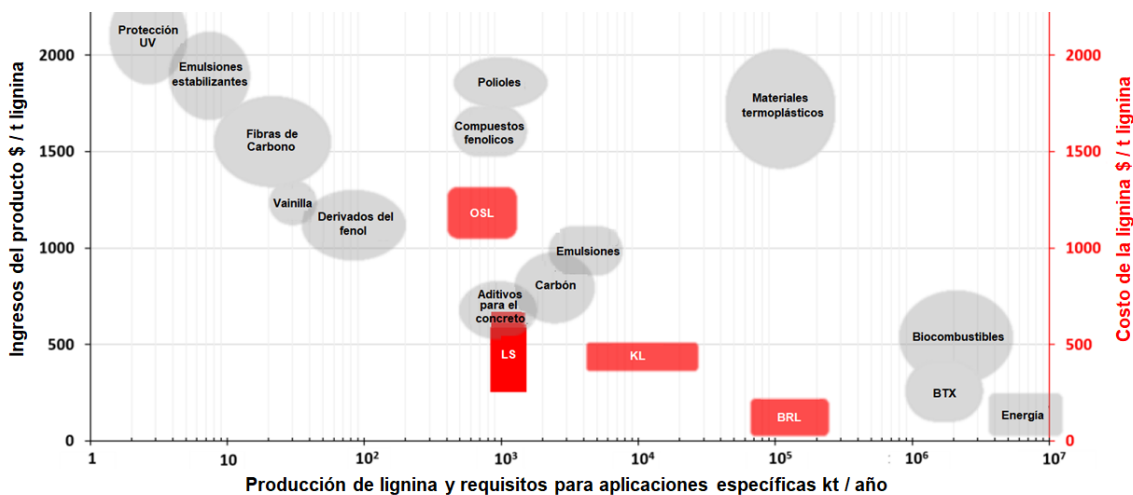


Fuente: Torres et al. (2020).

Nota: Las áreas circunscritas reflejan la producción proporcional de lignina por cada empresa, y los colores corresponden a distintos tipos de lignina: hidrolizada (HL), kraft (KL), lignosulfonatos (LS), organosolv (OL) y de soda (SL).

Ilustración 25

Potencial del mercado de lignina



Fuente: Balakshin et al. (2021).

Nota: ingresos del producto en dólares por tonelada de lignina. Abreviaturas: kilotoneladas (kt), ligninas organosolv (OSL), lignosulfonatos (LS), lignina Kraft (KL), lignina de biorrefinería (BRL) (crudas).

2.2.9- Extracción de Lignina Tecnificada

La lignina se puede encontrar en diferentes formas y aislarse mediante múltiples procesos de extracción, como tratamientos mecánicos, físicos, químicos o enzimáticos (Zakzeski et al., 2010): I) Pre-tratamiento físico (molienda). II) Fraccionamiento con disolventes (organosolv). III) Pre-tratamiento químico (ácido, alcalina, y oxidativo). IV) Pre-tratamiento biológico (utilizando hongos, predominantemente fungí).

Los procesos utilizados para aislar lignina de la matriz lignocelulósica se dividen en dos categorías principales: azufradas y libres de azufre.

2.2.9.1- Lignina Libre de Azufre (LSA)

2.2.9.1.1- Lignina Alcalina o Soda (LA)

Se somete un material lignocelulósico a tratamiento con una mezcla que contiene hidróxido de sodio NaOH al 2%, empleando una proporción sólido: líquido de 1:10 a 90 °C durante 1.5 horas. Posteriormente, la mezcla resultante es filtrada. La fracción sólida resultante está compuesta principalmente por pulpa de celulosa y hemicelulosa, mientras que la fracción líquida, denominada licor negro (licor negro de lignina), contiene una concentración elevada de lignina, excluyendo azúcares hemicelulósicos.

Tabla 14
Composición licor negro de lignina

Parámetros	Descripción
pH	13
Composición de sólidos	Menos del 18%
Lignina	Alrededor del 7%
Productos químicos	Alrededor del 7% (incluyendo hidróxido de sodio y sulfuro de sodio)
Hemicelulosa y otros azúcares	Menos del 4%
Agua	Aproximadamente 82%

Fuente: TAE (2022).

Ilustración 26*Licor negro de lignina*

Fuente: TAE (2022).

Nota: El componente es corrosivo debido a la gran cantidad de hidróxido de sodio (soda) disuelto.

2.2.9.1.2-Lignina Organosolv (OL)

Este método utiliza solventes recuperables y reutilizables como el etanol, produciendo ligninas de mayor pureza. Además, la ausencia de azufre permite ventajas para aplicaciones que requieren flujos térmicos, evitando la emisión de compuestos sulfurosos volátiles en contextos donde estas emisiones son indeseables (Chiappero et al., 2018).

El método de extracción organosolv utiliza etanol como solvente para eliminar la lignina de materiales vegetales. En general, consiste en los siguientes pasos:

(i) Preparación de la mezcla: El material vegetal se mezcla con una solución de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) al 50% (v/v). La proporción sólido: líquido es de 1: 6.

(ii) Calentamiento y descomposición: La mezcla se somete a un calentamiento a 170°C durante una hora. Durante este proceso, la lignina se descompone gracias al calor y el solvente.

(iii) Separación y resultados

La lignina disuelta en la solución resultante se separa mediante filtración del material sólido. Este procedimiento se destaca por su eficiencia en la obtención de corrientes útiles: la corriente líquida es rica en lignina, mientras que la sólida es útil para la producción de papel. Además, la capacidad de recuperar el disolvente no solo mejora la sostenibilidad del proceso, sino que también posiciona al método como una alternativa ecológica con el medio ambiente en comparación con métodos tradicionales como la fabricación de pasta de sulfito o Kraft (Carvajal, 2015).

Tabla 15
Parámetros de caracterización lignina organosolv comercial

Propiedad	Valor/descripción
Proveedor y origen	Kono Chem Co., Ltd. - Árbol Sauce Blanco (Salix Alba)
Propiedades químicas	Peso molecular: 1513.58 g/mol Fórmula molecular: C ₈₁ H ₉₂ O ₂₈
Método de extracción	Organosolv
Características de la lignina	En polvo - Color marrón - libre de azufres
Granulometría	Diámetro medio: 88.82 μm Diámetro al 10%: 8.19 μm Diámetro al 50%: 57.30 μm Diámetro al 90%: 193.28 μm

Fuente: Abedin (2021).

Ilustración 27

Lignina tipo organosolv (con solventes)



Fuente: Abedin (2021).

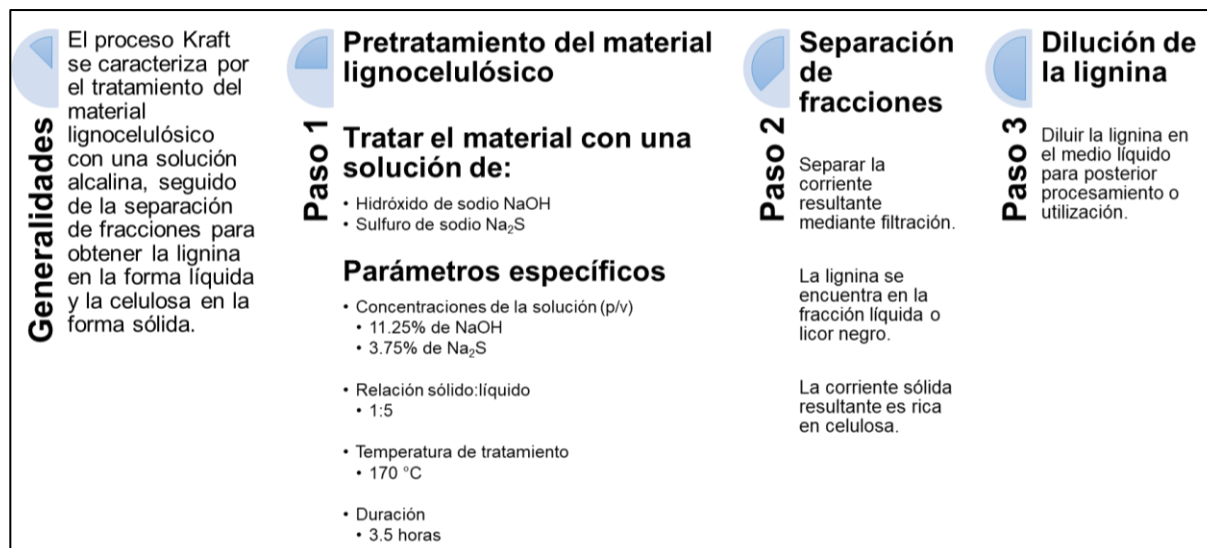
2.2.9.2- Lignina con Trazas de Azufre**2.2.9.2.1- Lignina Kraft (KL)**

El término *kraft* proviene de la palabra alemana *fuerza* o *resistencia*. Este proceso se utiliza en la industria de pulpa y papel para extraer pulpa de celulosa a partir de madera. Implica la digestión de astillas de madera en un recipiente a presión mediante una solución llamada licor blanco, compuesta por sulfuro de sodio (Na_2S) e hidróxido de sodio (NaOH) a elevadas temperaturas y presiones.

Durante la digestión, se separa la pulpa de la lignina presente en la madera, disolviendo esta última en el licor negro resultante. El licor se concentra y alimenta una caldera de recuperación, generando vapor que contribuye al proceso mediante el aporte de calor. Los productos químicos obtenidos, al mezclarse con agua para formar licor verde, se tratan con cal para regenerar los productos químicos gastados. El licor negro, rico en lignina, se aprovecha para obtener lignosulfonatos. En tal medida, el proceso Kraft se destaca por su eficiencia al separar la celulosa de la madera porque se utiliza una solución química robusta, capaz de resistir condiciones extremas (Castro et al., 2020).

Ilustración 28

Proceso lignina kraft (KL)



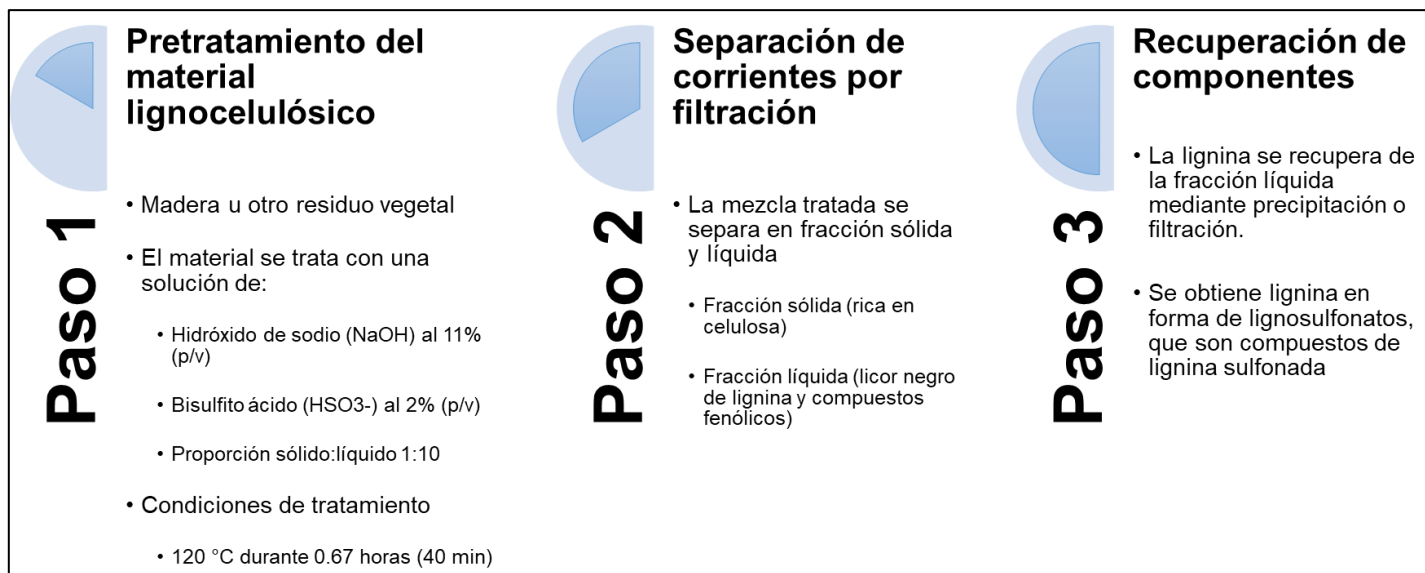
Fuente: Carvajal (2015).

La lignina obtenida tiene un contenido de azufre del 1.5% al 3% en peso, es soluble a un pH > 10 y muestra alta pureza. Además, contiene algunos grupos tiol alifáticos, que le dan un olor característico, perceptible especialmente durante el tratamiento térmico. La lignina kraft es hidrofóbica y, por lo tanto, debe modificarse para mejorar su reactividad (Jędrzejczak et al., 2021).

2.2.9.2.2- Lignosulfonatos

Implica tratar el material vegetal con una combinación de hidróxido de sodio y ácido bisulfito. Esta acción se lleva a cabo en una proporción específica y a una temperatura elevada durante un periodo breve. Como resultado, la lignina se disuelve en la fracción líquida. Posteriormente, se procede a la separación de esta parte líquida mediante filtración, culminando así en la obtención del lignosulfonato (Carvajal, 2015).

Ilustración 29
Proceso con sulfito (lignosulfonato)



Fuente: Carvajal (2015).

2.2.9.3- Obtención

i) El bagazo de caña de azúcar o la cascarilla de arroz se introduce en un tanque de mezcla, donde se añade un agente deslignificante para iniciar los procesos de extracción de lignina: soda, organosolv, kraft y sulfito, previamente descritos (1).

ii) La mezcla resultante se lleva a un intercambiador de calor para ajustar las condiciones operativas de temperatura en cada proceso de extracción (2).

iii) Luego, la corriente pasa a un reactor de tanque agitado donde ocurre la deslignificación, separando la lignina de la matriz lignocelulósica. Después, la corriente, ahora con la lignina extraída (3).

iv) Se enfría a 25°C y se somete a un proceso de filtración (4).

v) Separar los componentes (5).

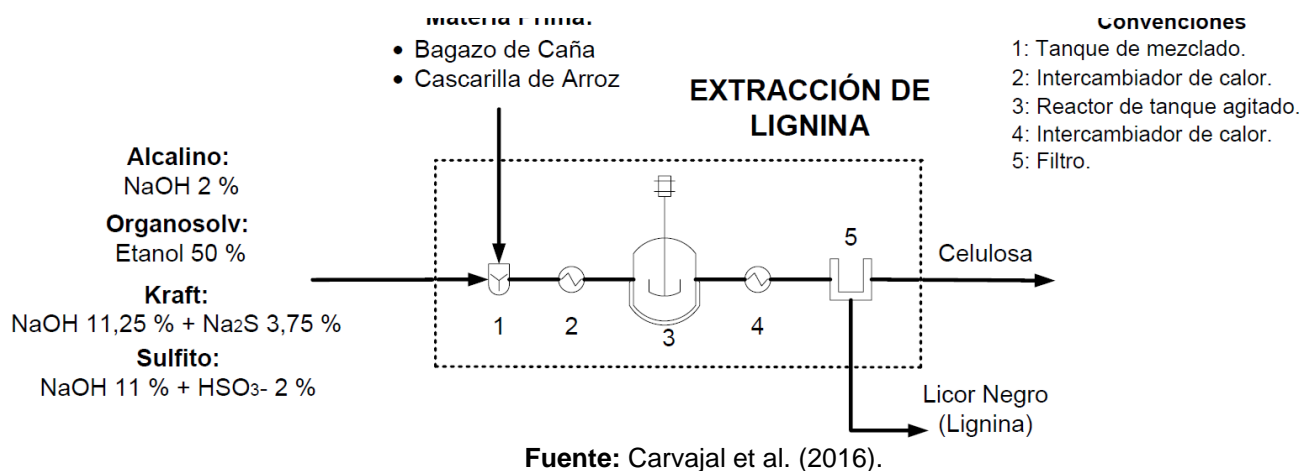
vi) La pulpa resultante se lava (6).

Este enfoque centrado en la recuperación de lignina asume que la hemicelulosa permanece con la celulosa en la fracción sólida. Además, después de las extracciones, se

consideran pequeñas fracciones de azúcares (1,1% en peso de hexosas y 1,3% en peso de xilosa) en la corriente de licor de lignina, especialmente cuando no se incluyen pasos de hidrólisis ácida, un paso específico previo de descomposición de sustancias con agua bajo condiciones ácidas, que se recomiendan (Carvajal et al., 2016).

Ilustración 30

Procesos de extracción de lignina sin hidrólisis ácida



En la Tabla 16 se presenta una recopilación de las condiciones de operación de los procesos utilizados para aislar la lignina de su matriz lignocelulósica, así como el tipo de lignina obtenida, masa molar y sus métodos de separación.

Tabla 16

Características de los distintos tipos de ligninas comerciales

Tipos de lignina	Lignina con trazas de azufre		Lignina sin trazas de azufre	
	Procesos	Lignosulfonat o	Kraft	Organosolv
Condiciones de operación	pH = 1 – 2 HSO ₃ ⁻	pH = 13 NaOH + Na ₂ S	T = 150 – 200 °C Ácido acético Ácido fórmico	pH = 11-13 NaOH

	T = 120 – 130 °C	T = 160 – 180 °C	Etanol Butanol Agua	T = 150 – 170 °C
Cenizas (%)	4.0 - 8.0	0.5 - 3.0	1.7	0.7 - 2.3
Humedad (%)	5.8	3.0 - 6.0	7.5	2.5 - 5.0
Carbohidratos (%)	-	1.0 - 2.3	1.0 - 3.0	1.5 - 3.0
Soluble en ácido (%)	-	1.0 - 4.9	1.9	1.0 - 11.0
Nitrógeno (%)	0.02	0.05	0.0 - 0.3	0.2 - 1.0
Azufre (%)	3.5 - 8.0	1.0 - 3.0	0.0	0.0
Masa molar (g mol ⁻¹)	1000 – 50000 (Hasta 150000)	1000 – 5000 (Hasta 25000)	1000 – 3000 (Hasta 15000)	500 – 5000
Método de separación	Ultrafiltración	Precipitación Cambio de pH Ultrafiltración	Precipitación Cambio de pH Ultrafiltración	Extracción con disolventes orgánicos

Fuente: Chávez y Domine (2013).

2.3.10- Usos de la Lignina

2.3.10.1- Energía

La lignina se suele quemar como fuente de combustible en las plantas de fabricación de papel. En 2010, apenas se empleó alrededor del 2% de los 50 millones de toneladas de lignina aislada de los procesos de fabricación de pasta de papel para la creación de productos de valor agregado, mientras que el resto se quemó como combustible de bajo valor (Carvajal, 2015).

Utilizar la lignina para la quema se justifica por su capacidad para liberar calor, lo cual resulta beneficioso en la producción de energía. Sin embargo, el poder calorífico de la lignina no alcanza los niveles de otros materiales convencionales como el carbón, que continúa siendo

ampliamente empleado. Precisamente, esta subutilización ha impulsado la investigación no solo a desarrollar procesos para aislar la lignina de la biomasa, sino también para diseñar productos basados en la lignina de mayor valor comercial (Hamaguchi et al., 2012).

Tabla 17
Poder calorífico de los componentes lignocelulósicos

Compuesto	Calor de combustión (MJ/kg)
Celulosa	17.6
Hemicelulosa	16.5
Lignina	23.7
Carbón	31.3

Fuente: Carvajal (2015).

Nota: La cantidad de calor generada por la lignina aún es ineficiente en relación con otras fuentes de combustión.

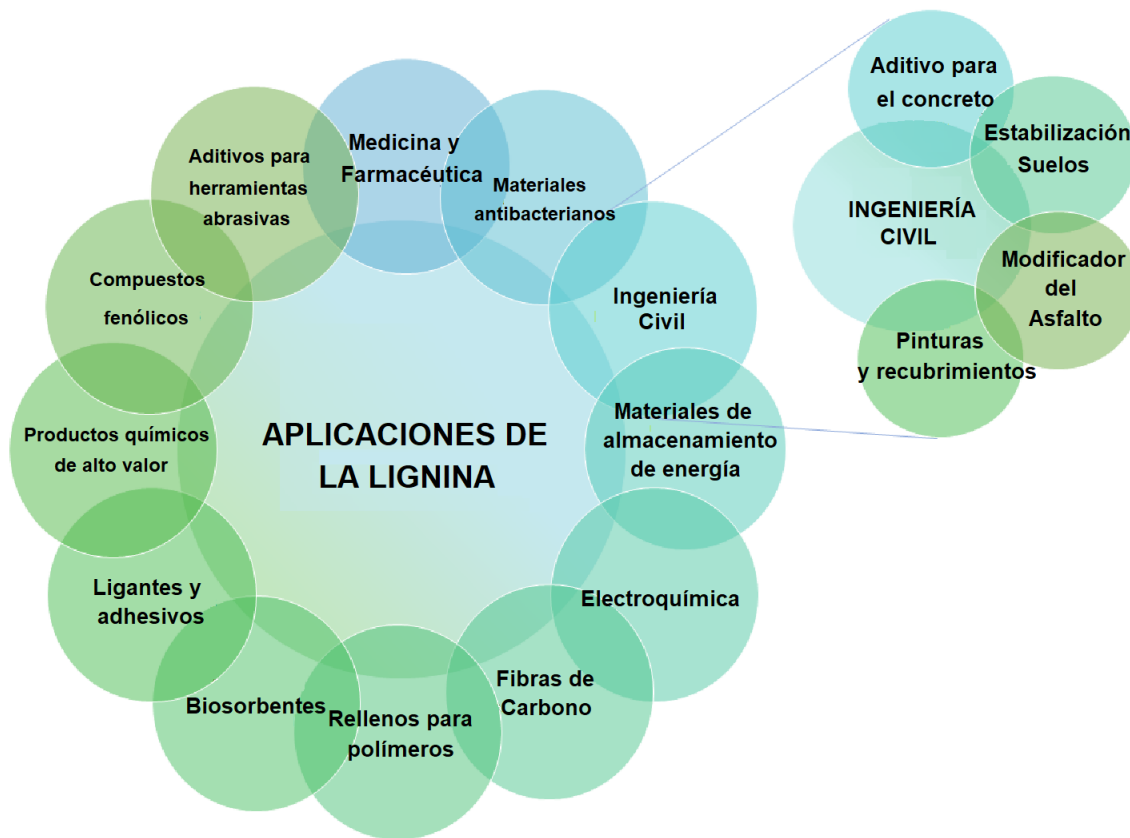
2.3.10.2- Innovación

Según un estudio realizado en Suecia, los lignosulfonatos, derivados del proceso de sulfito, son la principal fuente de lignina para aplicaciones distintas al combustible, con una producción anual aproximada de un millón de toneladas. Estos lignosulfonatos tienen un mercado consolidado como aditivos en el concreto y también se emplean como aglutinantes, adhesivos o dispersantes en la agroindustria (Abdelaziz et al., 2016).

En cuanto a la producción de compuestos químicos, según Abdelaziz (2016), la vainillina es un compuesto obtenido de la lignina de madera blanda, rica en guaiacol, un compuesto aromático con propiedades de lignina. Su producción implica un proceso alcalino-oxidativo esencial para la conversión deseada de los componentes de la lignina. Además, ésta también participa en la producción de diversos productos químicos, como combustibles, macromoléculas, hidrocarburos, fenoles y productos oxidados, entre otros.

Ilustración 31

Aplicaciones de la lignina y productos derivados

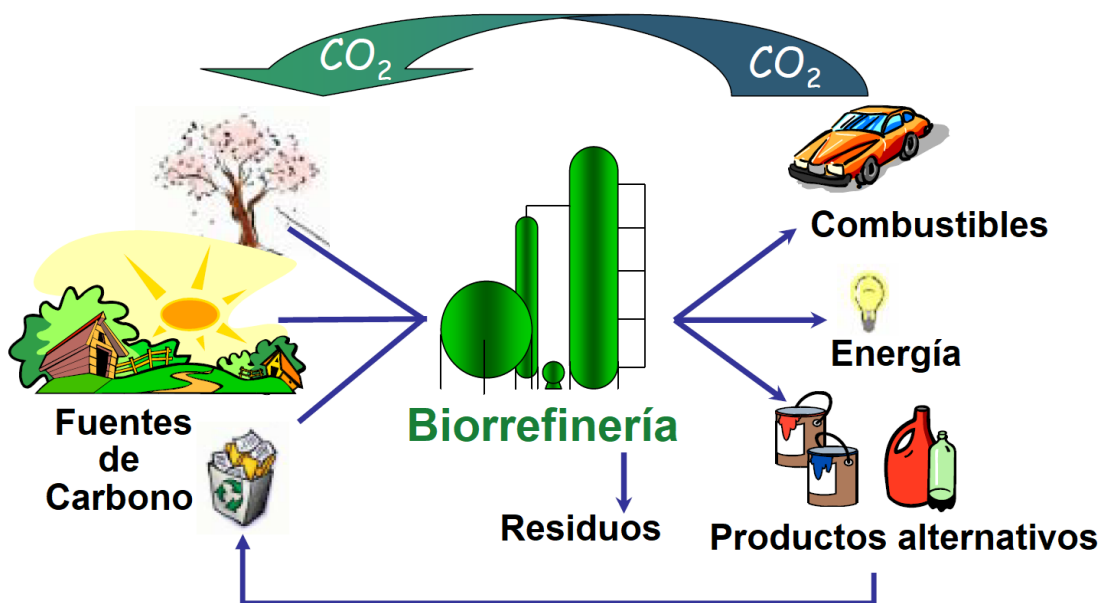


Fuente: Jędrzejczak et al. (2021).

Las biorrefinerías son instalaciones industriales que emplean biomasa como materia prima para la fabricación de diversos productos comerciales, como combustibles, disolventes o plásticos. El desarrollo tecnológico necesario para descomponer y formar enlaces de manera selectiva, junto con tecnologías avanzadas de análisis y separación, es esencial para la producción de moléculas más pequeñas (Bio3 Madrid, 2023).

La optimización de las biorrefinerías de lignocelulosa para impulsar la generación de energía y la producción de combustibles y productos químicos es fundamental, especialmente en un momento en que el mundo demanda una transición hacia prácticas industriales más sostenibles y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles (Holladay et al., 2007).

Ilustración 32
Ciclo de biorrefinería para la lignina

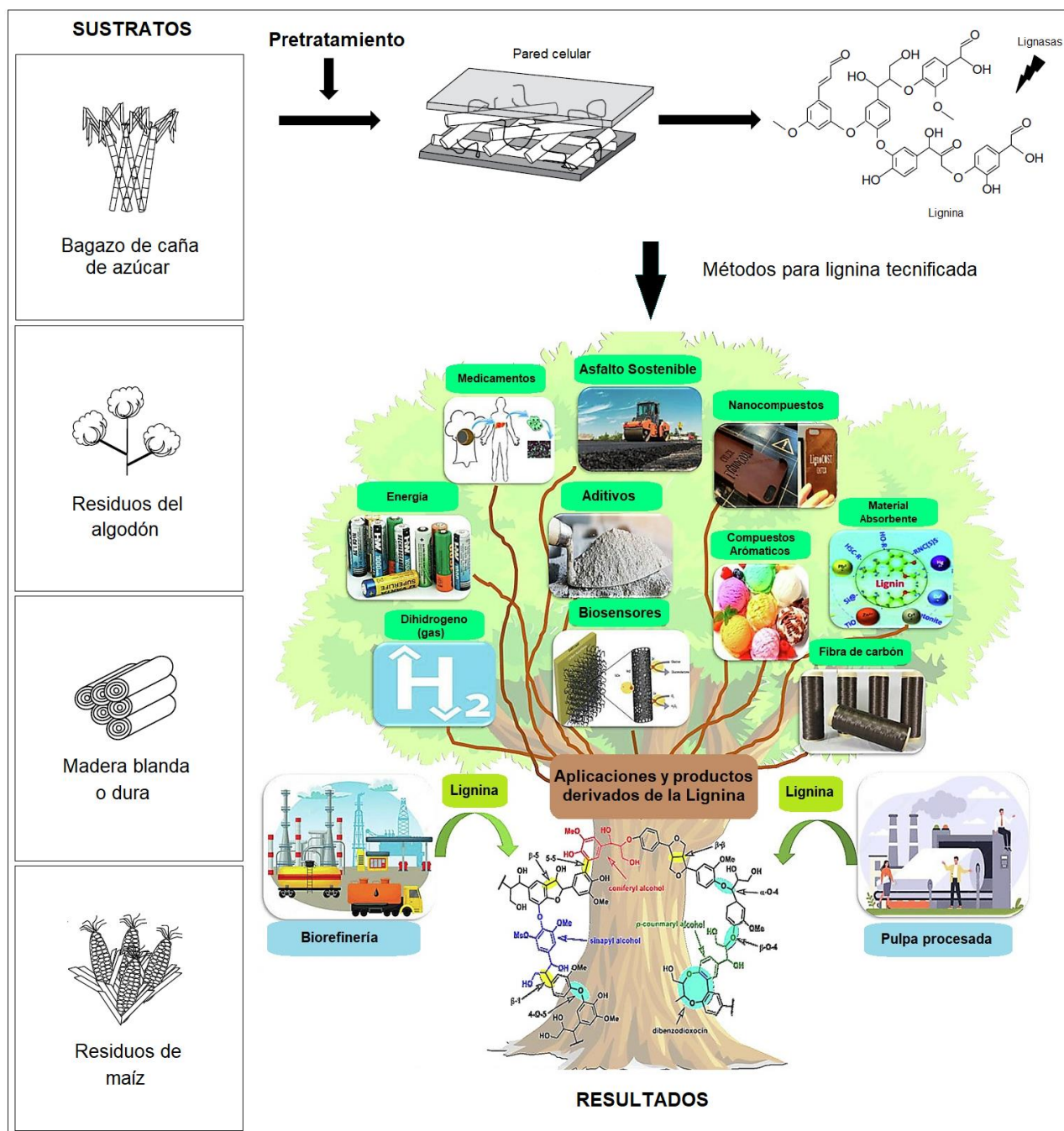


Fuente: Holladay et al., 2007.

A pesar de enfrentar desafíos técnicos que encarecen la explotación de la lignina debido a los grandes volúmenes de residuos generados durante su procesamiento, es esencial determinar la forma más eficiente de incorporar la lignina para respaldar la viabilidad económica de la biorrefinería. Es importante señalar que, debido a la naturaleza específica del tema, la discusión detallada sobre la consideración de la lignina queda fuera del alcance del presente estudio.

El proceso de biorrefinería involucra transformaciones físicas, químicas y biológicas con el objetivo principal de convertir una materia prima compleja en una variedad de productos. La diferencia clave radica en que la materia prima proviene de fuentes renovables, a diferencia del origen fósil del petróleo (Bio3, 2023).

Ilustración 33
Biomasa lignocelulósica aplicando biorrefinería

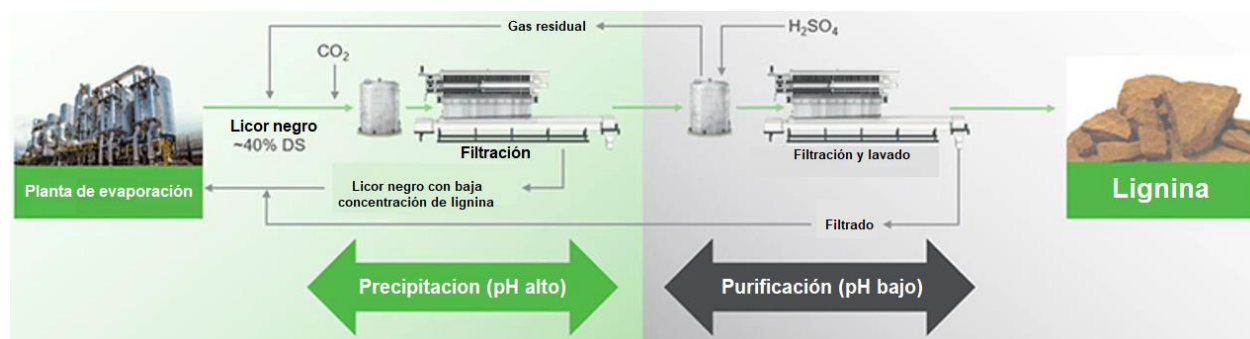


Fuente: Chauhan et al. (2022) y Jaramillo et al. (2015).

Por otra parte, LignoBoost es un proceso patentado de extracción de lignina que permite la modificación de sus propiedades a través de dos pasos: separación y lavado. Desarrollado inicialmente por universidades e institutos de investigación, este proceso es comercializado y continuamente mejorado por Valmet, una empresa finlandesa especializada en tecnologías, sistemas de automatización y servicios para las industrias de pulpa, papel y energía (Valmet Forward, 2023a).

Ilustración 34

Proceso industrial LignoBoost



Fuente: Valmet Forward, 2023a.

(i) Separación: el licor negro, obtenido mediante la evaporación, experimenta una reducción de pH mediante CO_2 y gas en el segundo paso del proceso. La lignina se precipita y se separa del licor mediante un filtro prensa, dando como resultado la obtención de lignina cruda.

(ii) Lavado: la lignina cruda se purifica mediante el lavado en una solución de bajo pH y su posterior deshidratación en un segundo filtro prensa. La pureza de la lignina depende en gran medida de las condiciones durante este paso.

3- Metodología

3.1- Tipo de Investigación: revisión bibliográfica

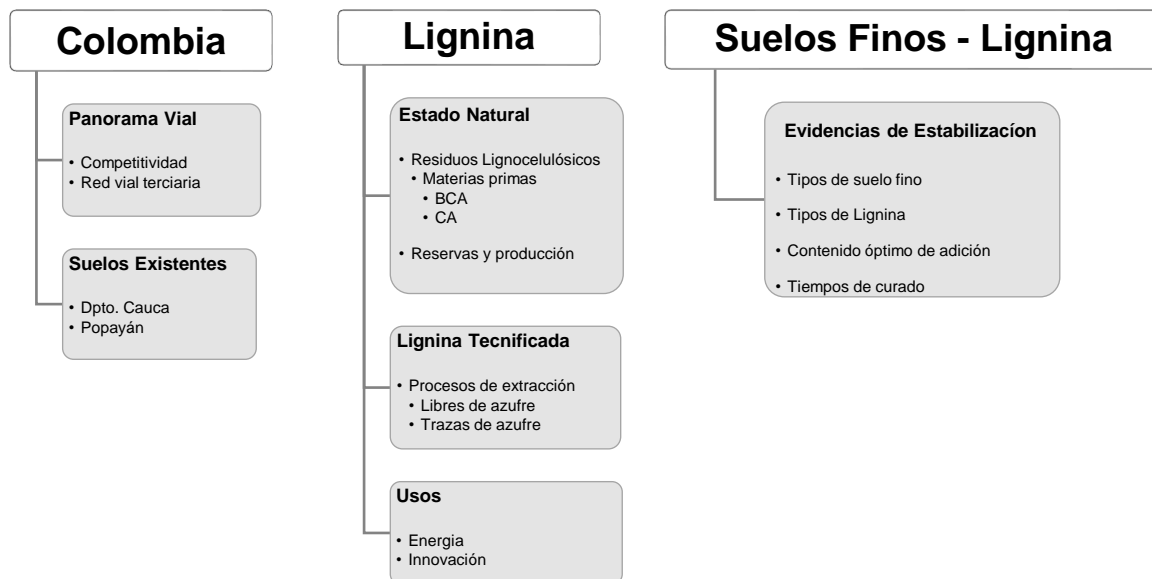
Para esta sección, se proponen unos criterios fundamentales que contribuyan a un desarrollo coherente de temáticas que apoyen a la revisión de literatura. Con lo anterior, se busca determinar la calidad, relevancia y confiabilidad de la información recopilada.

3.2- Diseño de Investigación

La investigación se ha centrado en obtener información pertinente sobre el uso de la lignina como alternativa para estabilizar suelos finos. Se consultaron diversas fuentes, como artículos científicos, libros e informes técnicos, muchas de las cuales estaban disponibles en línea (Figura 33).

Ilustración 35

Temáticas de la información recopilada



Fuente: elaboración propia.

3.3- Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad

3.3.1- Recursos y Servicios Utilizados

Se aprovecharon los recursos digitales disponibles para los estudiantes de la Universidad del Cauca, incluyendo el acceso a artículos científicos en bases de datos y libros físicos de la institución, como "Principios Básicos de Mecánica de Suelos" de Margarita Polanco. Estos recursos proporcionaron una sólida base para la investigación, garantizando la calidad y fiabilidad de la información recopilada.

3.3.2- Estrategias de Búsqueda

Se implementaron estrategias de búsqueda que consistían en identificar palabras clave específicas como "lignina" y "estabilización del suelo" para filtrar la información y localizar estudios pertinentes. Con esta estrategia, se pretendió optimizar la eficiencia de la búsqueda de información y asegurar la relevancia de los datos recopilados para el proyecto.

3.3.3- Alcance Temporal

La revisión bibliográfica se extendió desde principios de 2000 hasta 2023, abarcando un amplio espectro temporal. Esta decisión permitió incluir información actualizada y relevante, garantizando así la validez y pertinencia de los datos recopilados para el proyecto.

3.3.4- Fuentes Consultadas

Se consultaron diversas fuentes, como bases de datos académicas (Elsevier, ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar y Scopus), así como fuentes gubernamentales y sitios web de empresas productoras de lignina. La variedad de fuentes enriqueció la investigación con datos relevantes y confiables, ofreciendo una perspectiva amplia y equilibrada sobre el tema.

3.4- Criterios Éticos

Es fundamental respetar la integridad académica, lo que implica evitar el plagio y atribuir correctamente las ideas de otros autores. Para ello, es esencial asegurarse de que las fuentes utilizadas sean creíbles y confiables, respaldando nuestras afirmaciones con evidencia sólida. Además, es importante evaluar críticamente la validez y relevancia de la información recopilada durante la revisión bibliográfica. Realizar búsquedas sistemáticas contribuye a asegurar la fiabilidad y validez de los resultados. Mantener la objetividad en todo el proceso de recopilación y análisis de datos es esencial para evitar cualquier sesgo en los resultados obtenidos.

4- Resultados

4.1- Obtención de Lignina

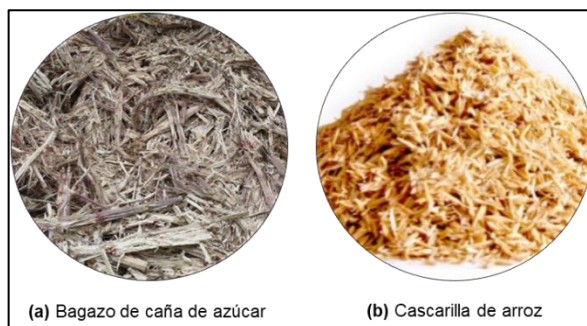
4.1.1-Materiales

4.1.1.1- Materia Prima

Inicialmente, es necesario seleccionar el recurso natural con un alto contenido de lignocelulosa. Para esta guía, se consideran los materiales vegetales no maderables. El estudio de Watkins (2015) se centra en fuentes como la paja de trigo, paja de pino, alfalfa, kenaf y fibra de lino para obtener lignina. Sin embargo, la literatura ha demostrado que la cascarilla de arroz y el bagazo de caña de azúcar podrían clasificarse como biomasa celulósica no maderable, presentando incluso un mayor porcentaje de lignina en comparación con el estudio de Watkins. Por lo tanto, es válido considerarlos para futuras experimentaciones.

Ilustración 36

Materiales vegetales no maderables potenciales de aprovechamiento



Fuente: adaptado de Ingenio Carmelita (2024) y Valdemar de la Garza (2024).

Tabla 18

Perfil de materias primas en el mercado

Parámetros	Bagazo de caña de azúcar	Cascarilla de arroz
Descripción	Bagazo entero húmedo subproducto del proceso de producción de azúcar	Fuentes de fibra, subproductos de las gramíneas
Cenizas (%)	-	13.40
Contenido de humedad (%)	48 - 50	9.30
Densidad promedio (kg/m ³)	300 - 400	-

Fuente: adaptado de Ingenio Carmelita (2024) y Valdemar de la Garza (2024).

4.1.1.2- Productos Químicos

Posteriormente, se requiere el uso de ciertos productos químicos que actúan de manera combinada o secuencial. Su función principal es romper las uniones de la lignina y separarla de la celulosa, que es el componente más abundante en la matriz lignocelulósica. Esto facilita también la separación de otros elementos presentes en el material vegetal. Así pues, los productos químicos utilizados para la extracción de lignina son el ácido fórmico (AF), ácido acético (AA), peróxido de hidrógeno y agua destilada (Watkins et al., 2015).

4.1.1.2.1- Ácidos Orgánicos

- i) **Ácido acético (vinagre estado puro):** utilizado para el aislamiento de la lignina.

- ii) **Ácido fórmico (ácido metanoico):** empleado para extracción para aislar la lignina mediante la ruptura de enlaces químicos.

4.1.1.2.2- Sustancias para Procesos Alcalinos

- i) **Hidróxido de sodio (soda cáustica):** base fuerte utilizada en procesos alcalinos para la extracción y aislamiento de la lignina.

4.1.1.2.3- Agentes Oxidantes

- i) **Peróxido de hidrógeno H₂O₂ (agua oxigenada):** utilizado como agente oxidante para aislar la lignina de la materia prima.

4.1.2- Procedimiento Experimental

4.1.2.1- Tratamiento con Ácido Fórmico/Ácido Acético

- i) **Desfibrado:** el proceso inicial necesario para la extracción de lignina de la fuente de biomasa implica cortar la biomasa en tamaños pequeños y disponerla en un matraz cónico (Matraz de Erlenmeyer).

- ii) **Mezcla:** se agrega un ácido orgánico al 85%, con una proporción de ácido fórmico/ácido acético de 70:30 en volumen. La biomasa representa el material sólido, mientras que la solución ácida actúa como un líquido interactuando con ella. La finalidad es lograr una relación fibra:líquido de 1:8, es decir, por cada parte de biomasa sólida, hay ocho partes de la solución líquida.

iii) Calentamiento y filtrado: la mezcla se hierve en una placa caliente durante 2 horas (2h). Posteriormente, el matraz y su contenido deben enfriarse a temperatura ambiente. Las fibras resultantes se filtran mediante un embudo de Büchner y se lavan con ácido fórmico al 80%, seguido de agua destilada caliente.

4.1.2.2- Tratamiento con Ácido Peroxifórmico/Ácido Peroxiacético (PAF/PAA)

Después del despulpado, las pastas tratadas con ácido fórmico (AF) y ácido acético (AA) se someten a una deslignificación mediante un tratamiento con una mezcla de solución de PAF/PAA en un baño de agua caliente a 80°C durante 2 horas.

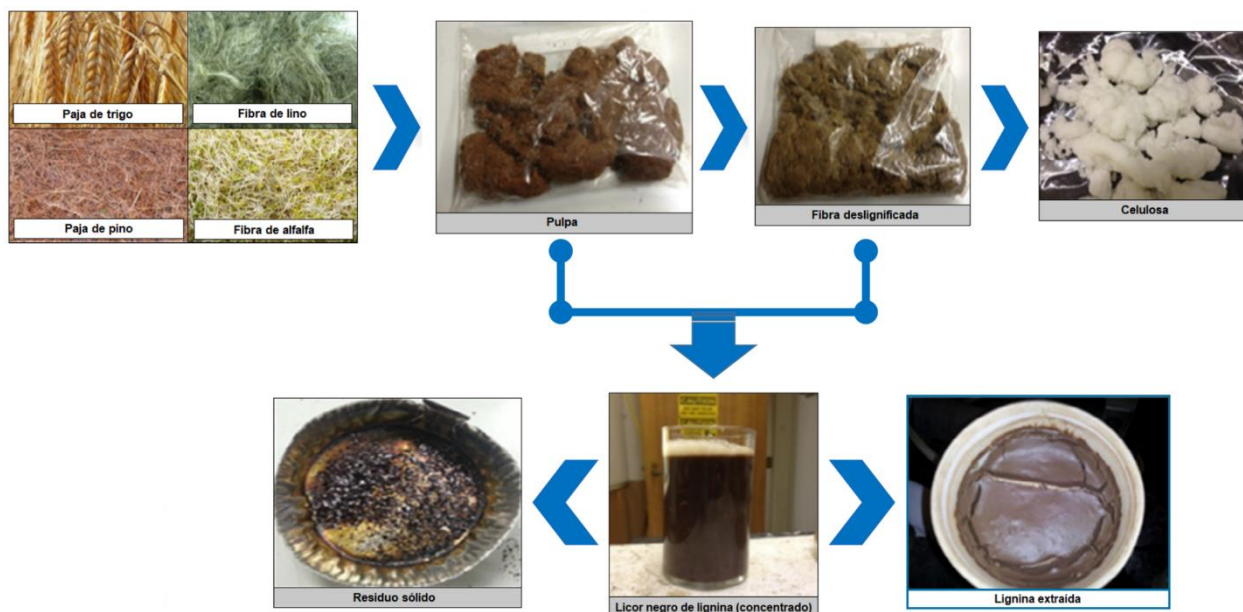
La mezcla de solución de PAF/PAA se prepara añadiendo 8 mL de H₂O₂ al 35% a una combinación de ácido fórmico/ácido acético al 85%. Finalmente, las fibras deslignificadas se filtran para separar el licor de cocción (compuesto por lignina y hemicelulosa mezcladas con ácido fórmico) de la celulosa, y se lavan con agua caliente.

4.1.3- Obtención – Lignina Extraída

Después del proceso de desfibrado y deslignificación, el licor gastado se calienta a 105°C. La lignina, inicialmente en solución ácida de ácido fórmico, se precipita al agregar cinco veces el volumen de agua destilada al concentrado. Este paso implica un cambio químico o físico que transforma la lignina nuevamente a su estado sólido. El precipitado, compuesto por partículas sólidas de lignina insoluble en agua, se separa mediante filtración en un embudo de Büchner.

Posteriormente, la lignina precipitada se lava con agua destilada y se seca al vacío sobre pentóxido de fósforo (P₂O₅). El P₂O₅ actúa como agente desecante, eliminando la humedad durante el proceso de secado al vacío. En este caso, se utiliza para absorber la humedad restante.

Ilustración 37
Secuencia obtención de Lignina



Fuente: Watkins et al. (2015).

4.2- Estabilización de Suelos Finos con Lignina

A continuación, se presenta una guía metodológica para estabilizar suelos finos con lignina basada en un análisis de la literatura mediante búsqueda en bases de datos. Para ello, se extrae información de diferentes estudios, enfocándose en aspectos como tipos de suelos finos, variedades de lignina, contenidos óptimos, períodos de curado, entre otros. Posteriormente, se identifican patrones comunes y tendencias, proporcionando una mejor comprensión de los aspectos evaluados con el propósito de establecer una base sólida para futuros estudios (Tabla 19).

Tabla 19
Abstracción Estudios de Estabilización de Suelos Finos con Lignina

#	Tipo de Suelo	Aditivo Químico	Dosis de Lignina (%)	Contenido Óptimo Lignina (%)	Tiempo de Curado (Días)	Referencia
1	Limo Arenoso (ML)	Lignina sin azufre (LSA) Ureasa	1.5-3-4-5-6	3	7-28	Sun et al. (2023)
2	Limo Expansivo (MH-ML)	Lignina sin azufre (LSA) Cemento	0.5-1-1.5-2-2.5	Lignina: 1 Cemento: 4	1-7-14	Zhang et al. (2021)

3	Limo de Alta Plasticidad (MH)	Lignosulfonato de calcio	3-5-11	3	Mín. 7	Fernández et al. (2021)
4	Arcilla (CH-CL)	Lignina sin azufre (LSA)	3-7-10-12-15	10	1-7-28-60	Liu et al. (2020)
5	Suelo Expansivo: Arcilla (51%) (CH-CL)	Lignosulfonato (LS)	0.4-0.875-2	LS: 0.875	3-7-28	Ljaz et al. (2020)
		Cal hidratada (Ca (OH) ₂)		Cal: 2.625		
6	Suelo Expansivo: Limo (52.4%) (MH-ML)	Lignina sin azufre (LSA)	3-7-10-12-15	12	28	Liu et al. (2020)
7	Limo de Baja Plasticidad (ML)	Lignina sin azufre (LSA)	2.5-8-12-15	12	1-7-28-60	Zhang et al. (2020)
8	Arcilla (CH-CL)	Lignosulfonato (LS)	0.5-0.75-1-2-3-4	0.75	4-7-15-28-35	Noorzad y Ta'negonbadi (2020)
9	Arcilla (CH-CL)	Lignosulfonato de calcio	0.5-1-2-4	Depende de la cantidad de finos en suelo	7-28	Chavali y Reshmarani (2020)
10	Arcilla Limosa (CH)	Lignina	Dilución	1:200	10-28	Zhang et al. (2020)
	Limo de Baja Plasticidad (A-4)	Ácido sulfúrico				
11	Arcilla de Baja Plasticidad (CL)	Licor negro de lignina	1-15	12	1-7	Zhang et al. (2020)
		Lignina				
		Ceniza volante				
12	Arena Limosa (SM)	Lignina	1-8	5	1-7-28 Remojo 15	Zhang et al. (2020)
13	Arcilla (CL-CH)	Lignina	1-8	5	1-7-28 Remojo 15	Zhang et al. (2020)
14	Limo (ML)	Lignina	0.5-5	2	7-28	Zhang et al. (2020)
15	Limo Arenoso	Lignina sin azufre (LSA)	0.5-4	2	7	Zhang et al. (2020)
16	Limo (ML)	Lignina	1-15	12	0-28-60	Zhang et al. (2020)
		Cal viva (CaO)				
17	Arcilla Limosa	Lignina sin azufre (LSA)	3-15	10	28	Zhang et al. (2020)
18	Limo (ML)	Lignina	1-16	Lignina: Cal 1:2	7	Zhang et al. (2020)
		Cal viva (CaO)				
19	Arcillas (CH) (CL)	Lignosulfonato (LS)	0-5	2	7-28	Zahri & Zainorabidin (2019)
20	Limo (ML)	Lignina	0.7-10-12-14-16	12	12	Kong et al. (2019)
21	Limo	Lignina	0-2-5-8-12	12	7	Zhang et al. (2018)

22	Arcilla (CH)	Lignosulfonato (LS)	0.5-0.75-1-2-3-4	0.75	7-14-28	Ta'negonbadi y Noorzad (2018)
23	Suelo Expansivo Limo	Lignosulfonato (LS)	0.5-1-1.5-2	2	7-14-28	Alazigha et al. (2018)
24	Arcilla Limosa (CH)	Lignosulfonato (LS)	0-0.5-1-2-3	2	7-14-28	Alazigha et al. (2018)
25	Limo (ML)	Lignosulfonato (LS)	2-5-8	5	7-14-28-48	Zhang et al. (2018)
26	Limo (ML)	Lignosulfonato (LS)	0-2-5-8-12-15	12	1-7-28-60	Zhang et al. (2018)
27	Arcilla (CH)	Lignosulfonato (LS)	0.5-0.75-1-2-3-4	0.75	4-7-14-28	Ta'negonbadi y Noorzad (2017)
28	Arcilla Limosa Limo	Lignina sin azufre (LSA)	8	12	0-8-15	Zhang et al. (2017)
29	Limo (ML)	Lignina	2-5-8-12-15	12	1-7	Cai et al. (2016)
30	Arcilla (CH)	Lignosulfonato (LS)	0.5-2-4-7	2	7-14-54-180	Alazigha et al. (2016)
31	Limo Arcilloso	Licor negro de lignina/Lignina	3-6-12	12	1-7-28	Ceylan et al. (2015)
	Arcilla y Limo (CL-ML)					
	Limo (ML)					
32	Limo (ML)	Lignina sin azufre (LSA)	2-5-8-12-15	12	1-7-28-60	Zhang et al. (2015)
33	Limo Arenoso Bien Gradado: Arcilla (10%)	Lignosulfonato (LS)	0.5-1-2-3-4	2	7	Chen et al. (2014)
34	Limo (ML)	Lignosulfonato de calcio	0.52-5	2	7-28	Blanck et al. (2014)
35	Arcilla (CL)	Licor negro de lignina	0-1-3-6-12-15	12	1-7	Ceylan et al. (2010)
		Lignina				
36	Arcilla (CL)	Lignosulfonato (LS)	3-8	5	28	Tingle y Santoni (2003)
37	Arcilla (CL)	Lignosulfonato de calcio	0, 2, 4, 6 y 8	6	28	Pezo y D'alembert (2022)
		cemento				
38	Arcilla (CL)	Lignina	0.75-1.50-2.50	1.50 y 1.00	8-16	Retuerto y Gonzales (2024)
39	Arena Mal Gradada con Limo (SP-SM)	Lignosulfato (LS)	0.5, 0.75, 1 y 1.25	0.75	7-28	Pardo (2023)

Fuente: elaboración propia.

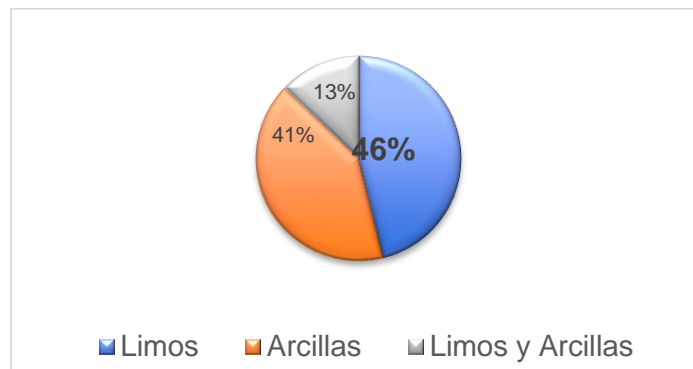
4.2.1- Muestra Patrón. Suelos finos

4.2.1.1- Tipos de Suelo

Los estudios recopilados demuestran ensayos en diferentes tipos de suelo fino, tales como limos (ML-MH) y arcillas (CL-CH), así como en algunos casos la combinación de ambos. En la Figura 37 se expone que el suelo fino tipo limo es el más estudiado, tanto a través de revisiones de literatura, experimentación de laboratorio y, en algunos casos, pruebas de campo.

Ilustración 38

Tipos de Suelo Fino Experimentados

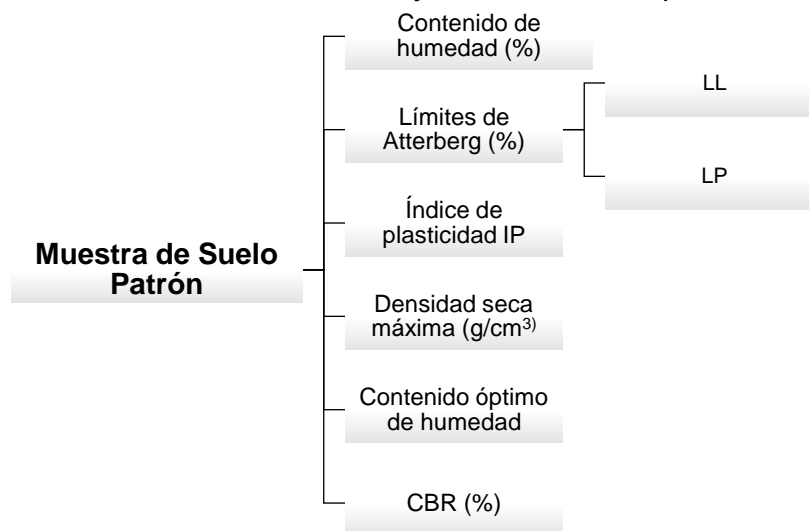


Fuente: elaboración propia

4.2.1.1.1- Características Físicas y Mecánicas de Evaluación

Ilustración 39

Evaluación características físicas y mecánicas suelo patrón



Fuente: elaboración propia.

4.2.2- Lignina como Estabilizante

4.2.2.1- Apariencia (Presentaciones)

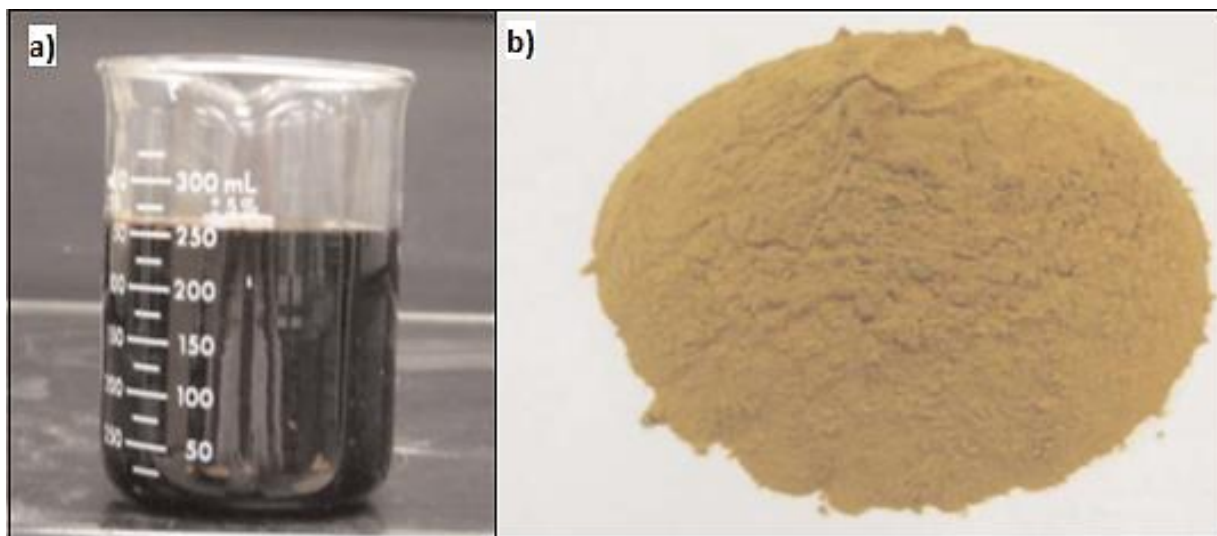
El licor negro representa la lignina en su forma líquida después del proceso de la pulpa y el papel, mientras que la lignina en polvo se obtiene mediante métodos previamente abordados en esta revisión. Dichos procesos pueden implicar la eliminación o reducción del azufre, dependiendo de la fuente y del método de extracción. Además, el contenido de lignina puede variar considerablemente debido a factores como el proceso de extracción y purificación, la mezcla con otros componentes, las especificaciones del producto y las consideraciones de coste.

i) **Licor negro de lignina:** es un combustible líquido de tonalidad marrón oscuro, con aroma ahumado que varía según la planta de origen. Su composición incluye aproximadamente un 25% de lignina y un 25% de agua. Presenta un pH de 2.2, indicando una acidez considerable (Figura 39 a).

ii) **Lignina en polvo:** contiene aproximadamente un 60% de lignina, un 30% de hemicelulosa, un 10% de celulosa y otros componentes. La lignina no contiene sustancias tóxicas y no corroe metales. Se considera que este tipo de lignina es un estado más puro (Figura 39 b).

Ilustración 40

Apariencia de la Lignina



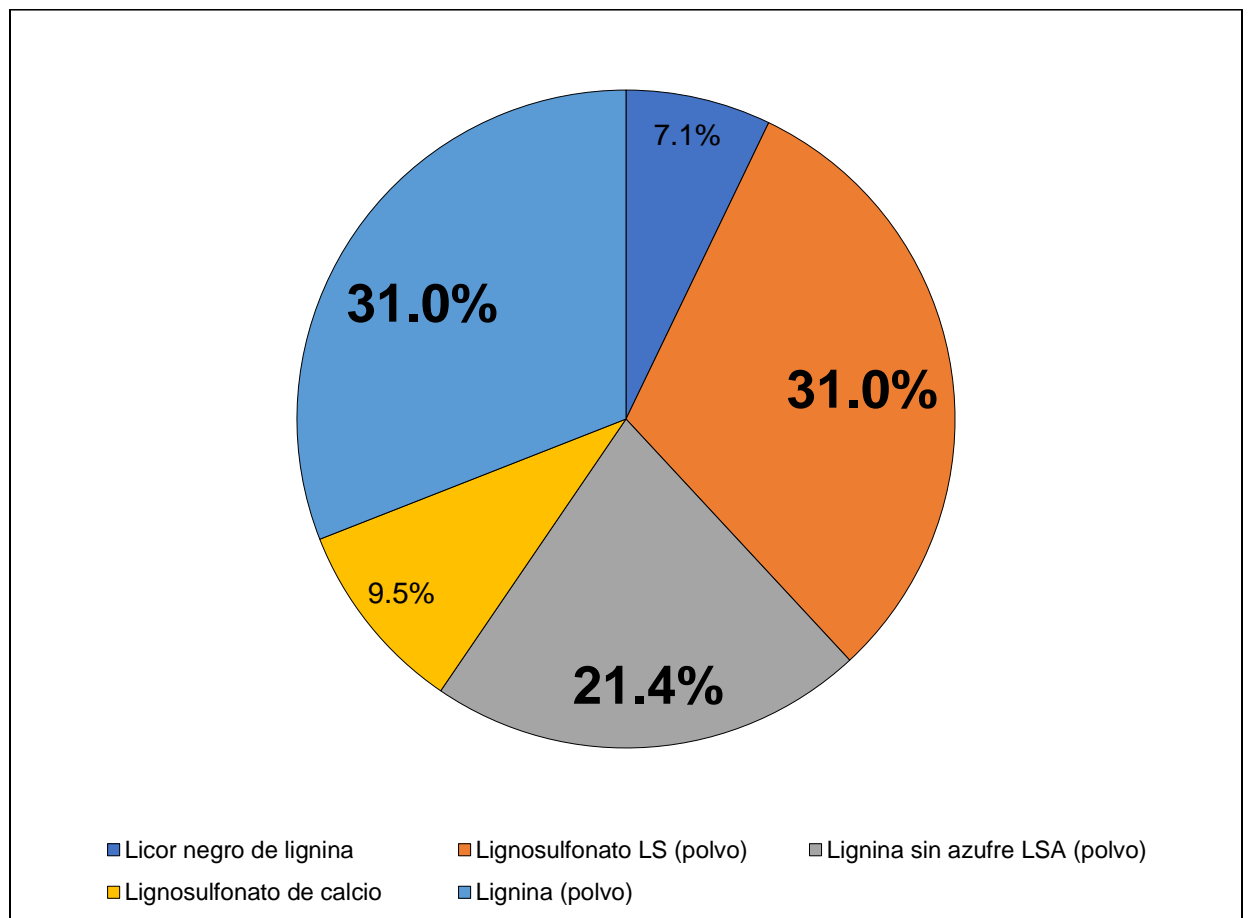
Fuente: Ceylan et al. (2010).

4.2.2.2- Tipos de Lignina

La cantidad de lignina añadida al suelo varía según la masa seca del suelo y los aditivos propuestos en cada estudio en particular. En la Figura 40 se detallan los diferentes tipos de lignina utilizados como aditivos estabilizantes alternativos. Se destaca que el lignosulfonato y la lignina en forma de polvo representan el 66.6% de los aditivos empleados. También es necesario resaltar que la lignina suele denominarse como polvo en los estudios debido a su disponibilidad comercial, lo que evita la necesidad de un proceso previo de obtención.

Ilustración 41

Tipos de lignina probadas para experimentación



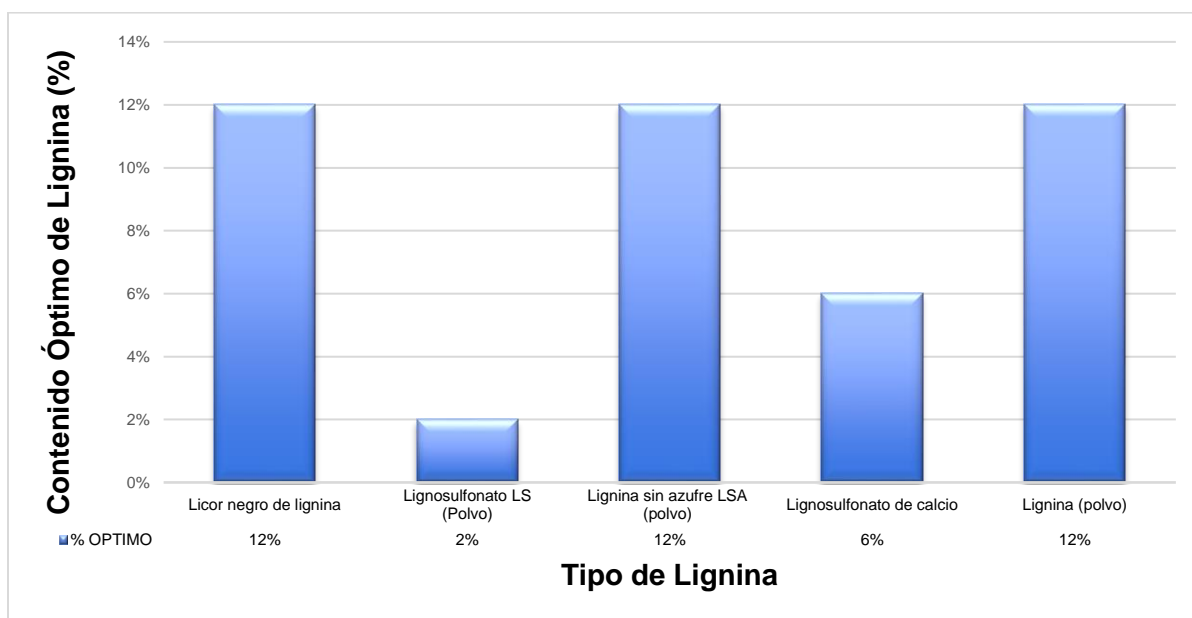
Fuente: elaboración propia.

4.2.2.3- Adición de Lignina

En los estudios revisados, la lignina se agrega al suelo fino en cantidades calculadas según la masa seca del suelo y los aditivos diseñados. Los resultados del análisis estadístico muestran que las cantidades de lignina añadidas, independientemente de su presentación, oscilan entre el 2% y el 12% del contenido óptimo para un diseño de estabilización, tal como se muestra en la Figura 41.

Ilustración 42

Porcentaje óptimo de lignina para experimentación

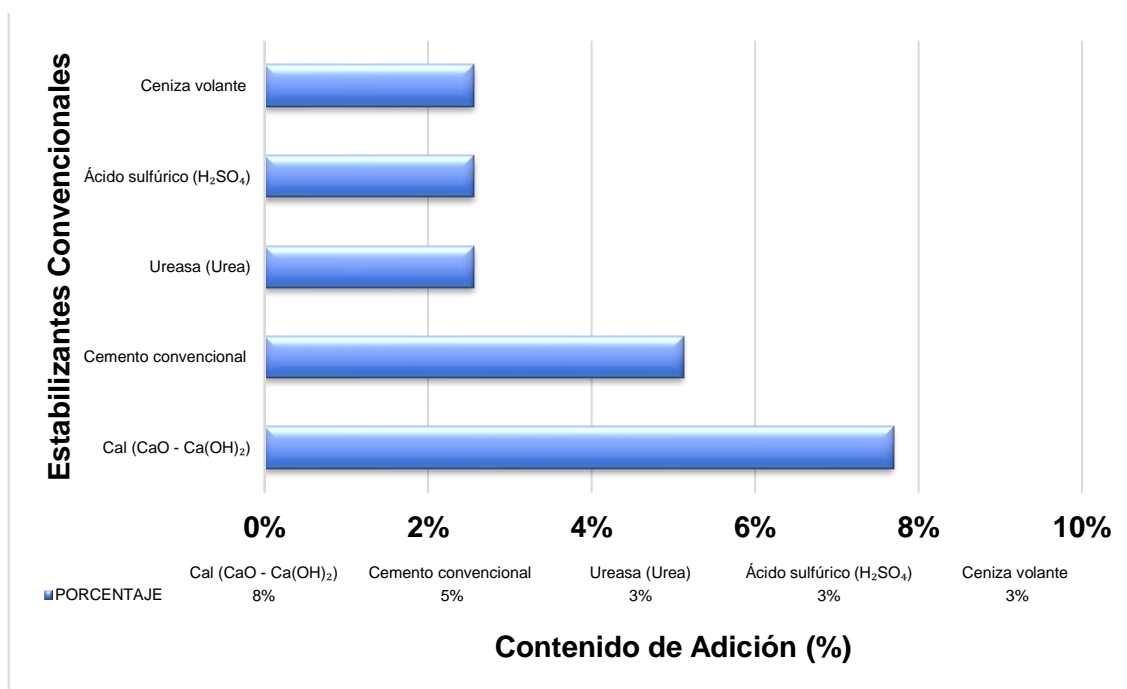


Fuente: elaboración propia.

4.2.2.4- Aditivos Complementarios

La evidencia revela que se utilizaron aditivos químicos convencionales en los procesos de estabilización de suelos finos con lignina (Figura 42). Lo anterior, con la intención de comparar rendimiento de la lignina o como aditivo complementario para reforzar la dinámica de los elementos en el proceso de estabilización. Los aditivos convencionales utilizados como refuerzo a la lignina representan el 21% del total de estudios analizados de la Tabla 19, siendo la cal y el cemento convencional los más utilizados sin sobrepasar el 8% de adición.

Ilustración 43
Aditivos convencionales complementarios



Fuente: elaboración propia.

4.2.3- Muestra Modificada: Suelo-Lignina

4.2.3.1- Mecanismo de Estabilización

En los estudios de Zhang et al. (2018, 2020), se propone un mecanismo de estabilización en el cual se afirma que, al mezclar lignina con agua en el suelo, se desencadenan varios procesos bioquímicos que conducen a la formación de un compuesto de suelo con una estructura más estable. Este mecanismo implica la protonación de la lignina, su interacción con las partículas del suelo mediante atracción electrostática, la formación de un compuesto de cementación que llena los poros y forma agregados, y el intercambio iónico con los minerales del suelo. Tal proceso se describe a continuación:

i) Protonación de la lignina: cuando la lignina se hidroliza en agua, se liberan iones de hidrógeno (H⁺) e hidroxilo (OH⁻). Estos iones de hidrógeno protonan la lignina, otorgándole así una carga positiva.

ii) Interacción electrostática: debido a la atracción electrostática, la lignina cargada positivamente se acerca a las partículas de suelo que tienen cargas negativas en su superficie.

Esta interacción reduce el grosor de la capa doble difusa en la superficie del suelo, la cual consiste en una capa de partículas cargadas que forman dos regiones distintas: una de exceso de carga positiva y otra de exceso de carga negativa. Esta reducción facilita la unión entre las partículas del suelo, mejorando así la cohesión del suelo.

iii) Formación de compuesto: la lignina protonada forma un compuesto de cementación cargado positivamente que se adhiere a la superficie de las partículas del suelo, llenando los poros y aumentando su cohesión. Esta interacción con los minerales del suelo fortalece las uniones entre las partículas, contribuyendo a la estabilidad del suelo.

4.2.3.2- Desarrollo Microestructural

4.2.3.2.1- Microscopía electrónica de barrido Scanning Electron Microscopy (SEM)

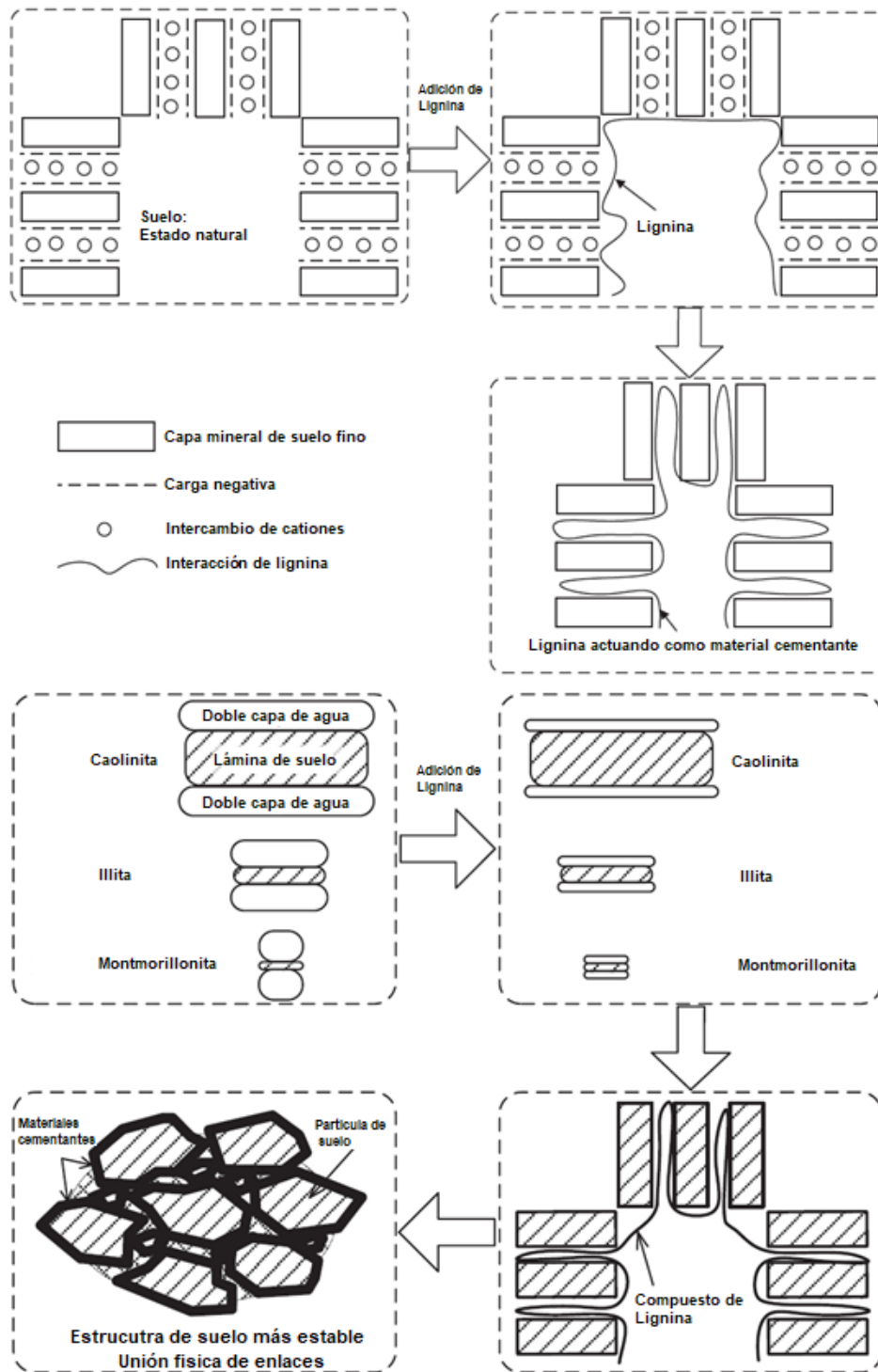
La microscopía SEM es una técnica que emplea un haz de electrones para observar muestras a escala muy pequeña, logrando una visualización de alta resolución de su superficie. Se utiliza para estudiar la morfología y composición elemental del material (ATRIA, 2023). En estas pruebas, se identifica cualitativamente el desarrollo microestructural en la matriz de muestras de suelo estabilizado a una magnificación específica. La literatura evidencia imágenes de muestras de suelo hasta por 4000 de magnificación (Figura 44).

En las pruebas SEM se realiza un análisis morfológico de la microestructura tanto de muestras representativas de suelo natural como de tratadas con lignina, donde se modifican parámetros como los contenidos del aditivo y los días de curado (Alazigha et al., 2016, 2018; Cai et al., 2016; Zhang et al., 2018; Zahri y Zainorabidin, 2019; Noorzad y Ta'negonbadi, 2020; Ijaz et al., 2020).

i) Suelo sin tratar: el tejido de la muestra de suelo sin modificar presenta vacíos dispersos, numerosos poros pequeños y una estructura discontinua y escamosa. Lo anterior supone una clara separación entre las partículas del suelo sin evidencia de impregnación o cementación entre las partículas (Figura 44 a-b).

ii) Suelo-lignina: la literatura menciona la alteración de la estructura del suelo, junto con la formación de una estructura floculada por intercambio catiónico, como aspectos relacionados con la modificación del suelo con lignina.

Ilustración 44
Mecanismo de estabilización para suelos finos estabilizados con lignina



Fuente: Zhang et al. (2018).

- **Alteración de la estructura del suelo:** la muestra modificada con lignina reduce el número, espacio y volumen de poros en el suelo. Esta disminución en la porosidad implica que la capacidad del suelo para retener agua se reduce, ya que hay menos espacio disponible para que las moléculas de agua se muevan libremente dentro de su estructura. Como resultado de esta reducción, los autores observan una disminución en el porcentaje de hinchamiento del suelo cuando se agrega el estabilizante (Figura 44 b-f).

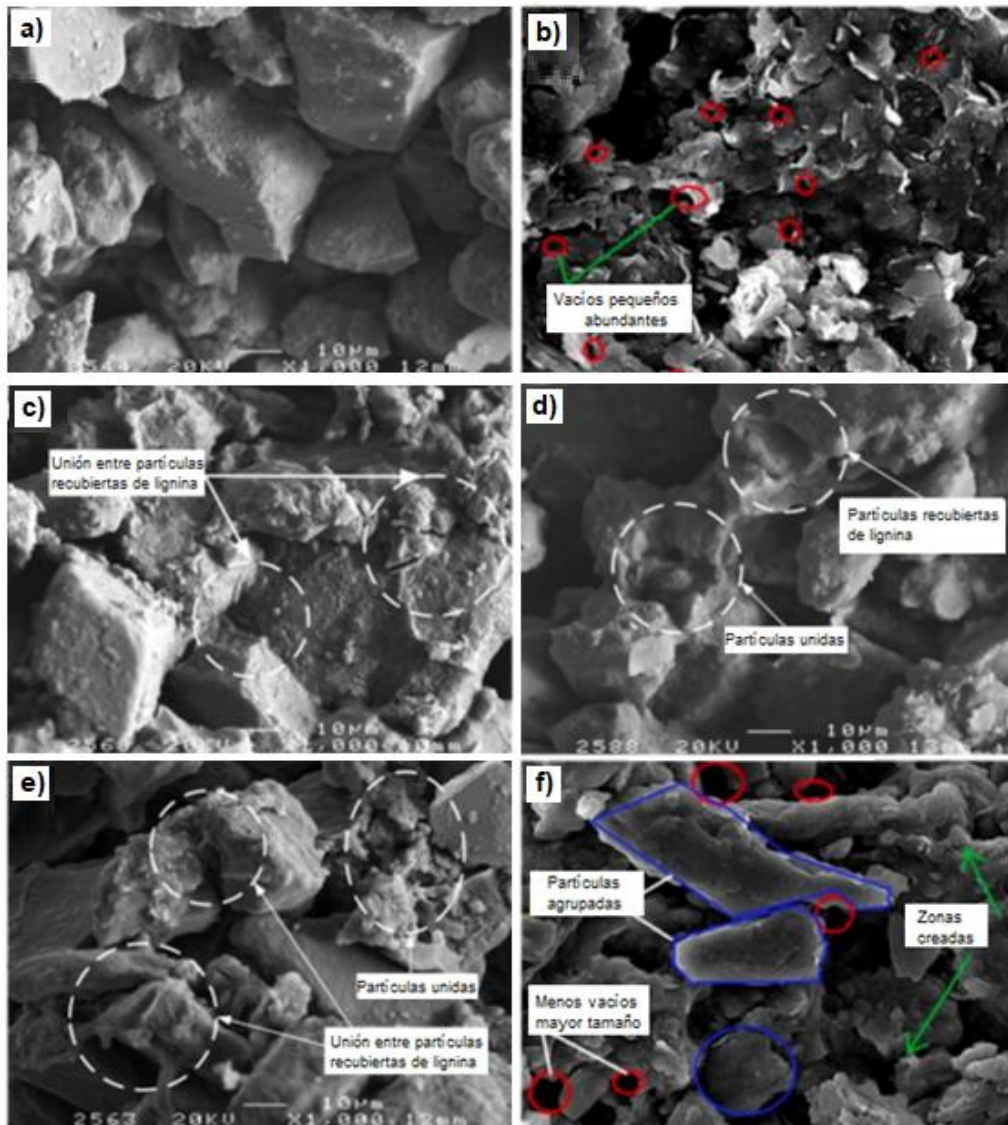
- **Influencia del contenido de lignina:** la adición de lignina interactúa con los minerales del suelo, generando un intercambio catiónico. En este proceso, los iones con carga positiva presentes en el suelo se intercambian con la solución de lignina, siendo absorbidos en respuesta a cambios en las condiciones del suelo, como el pH y la humedad. Este intercambio promueve la agregación de partículas del suelo en grupos más grandes y menos dispersos, lo que resulta en una estructura floculada que mejora la estabilidad y permeabilidad del suelo.

4.2.3.3- Evaluación de Expansión Volumétrica

La expansión del suelo se refiere al aumento de volumen que experimenta un suelo cuando absorbe agua. Dicho fenómeno puede ser especialmente relevante en suelos con alto contenido de arcilla, ya que ésta tiene una capacidad significativa para retener agua y expandirse cuando se encuentra húmeda (González y Chávez, 2021). En los estudios se observa la contracción volumétrica del suelo después de su expansión, así como su respuesta a diferentes tratamientos, como el uso de lignosulfonato y cemento como estabilizantes. La contracción se refiere a la reducción de volumen experimentada por el suelo después de absorber agua y luego perderla. En la Figura 45 se presentan los resultados del módulo de contracción (E_w) para muestras de suelo natural, lignina (tipo lignosulfonato) y cemento. En el análisis se observa una relación lineal entre las deformaciones volumétricas y el contenido de humedad hasta el 50%. Según Alazigha et al. (2018), las muestras tratadas con lignosulfonato y cemento exhiben una contracción menor en comparación con las muestras no tratadas. El grado de contracción del suelo mejoró en un 13% con el tratamiento de lignosulfonato y en un 16% con el tratamiento de cemento.

Ilustración 45

Desarrollo microestructural de suelo fino tratado con lignina

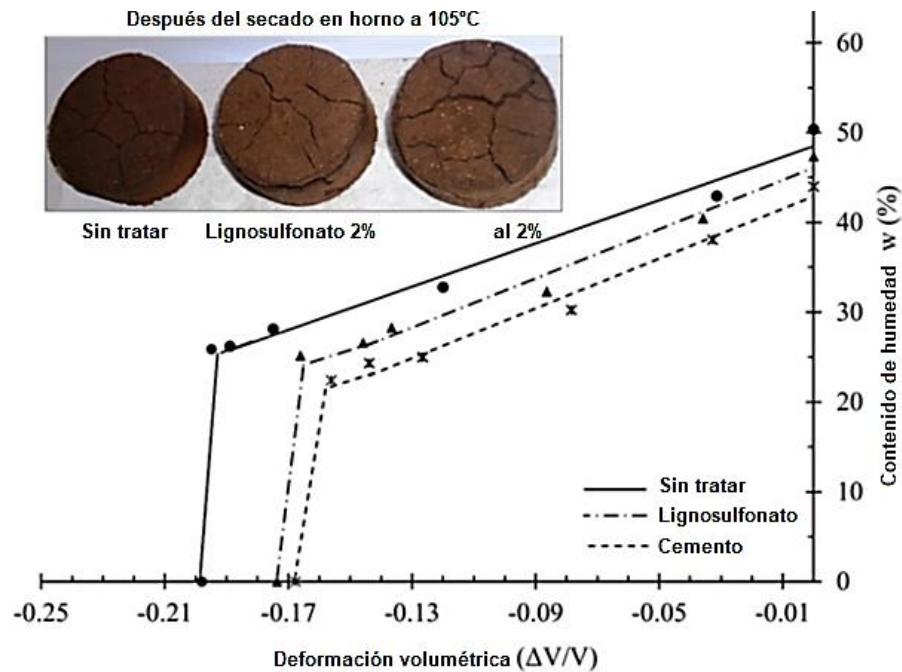


Fuente: Alazigha et al. (2016), Cai et al. (2016), Zhang et al. (2018), Zahri y Zainorabidin (2019), Noorzad y Ta'negonbadi (2020) y Ijaz et al. (2020).

Nota: las imágenes magnificadas están ampliadas 1.000 veces, excepto b y f, que se encuentran ampliadas 4.000 veces.

Ilustración 46

Efecto del lignosulfonato y cemento en la contracción volumétrica del suelo



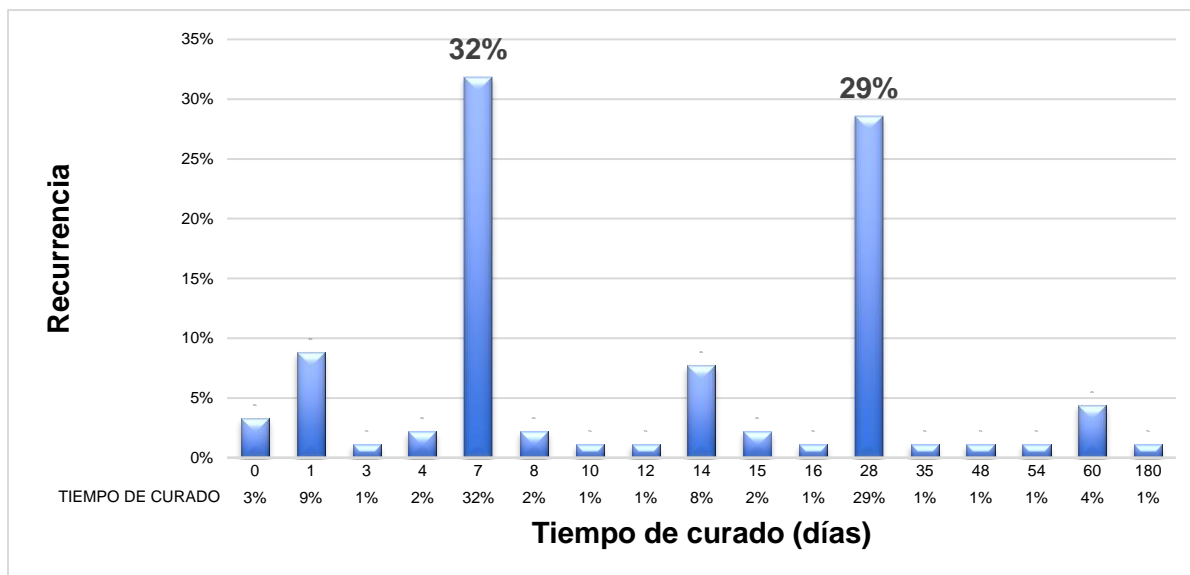
Fuente: Alazigha et al. (2018).

Nota: el suelo que se experimenta es un tipo de arcilla expansiva.

4.2.3.4- Tiempos de Curado

La mezcla se coloca en un recipiente de forma que se puedan contener selladas las muestras de suelo durante el proceso de curado, manteniendo así condiciones de humedad y temperatura constantes para permitir que las muestras se curen de manera uniforme y controlada (Liu et al., 2020). En ese sentido, los períodos registrados en el análisis estadístico varían hasta 180 días de curado. No obstante, cerca del 29% de los estudios utilizan un procedimiento estándar de 7 a 28 días, tal como indica la Figura 46.

Ilustración 47
Tiempos de curado



Fuente: elaboración propia.

4.2.3.5- Compactación, Sellado y Curado

Liu et al. (2020) y Alazigha et al. (2018) describen procesos similares. Inicialmente, se mezcla a fondo la lignina y el suelo seco durante aproximadamente cinco minutos para distribuir uniformemente el aditivo. Posteriormente, se agrega agua destilada en cantidad equivalente al contenido óptimo de humedad del suelo seco y se reposa en bolsas de plástico selladas, generalmente durante 24 horas, antes de proceder con la preparación de los especímenes para cada prueba. La mezcla se agita manualmente durante cinco minutos adicionales para garantizar una distribución uniforme de la humedad.

Después, se recomienda compactar las muestras al 95% de la densidad máxima del suelo natural. Las muestras se sellan y se curan a una temperatura constante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $92 \pm 3\%$ en una sala de curado durante un período entre 7 y 28 días.

4.2.3.6- Durabilidad

Alazigha et al. (2018) optaron por mostrar gráficamente los resultados del estudio sobre la durabilidad (Figura 47). La investigación evalúa el desempeño del lignosulfonato y del cemento

para determinar la resistencia de muestras de suelo-estabilizante compactadas frente a ciclos repetidos de humectación y secado de la norma ASTM D559.

i) **Suelo sin tratar:** durante los ciclos de mojado, la muestra experimenta una pérdida de masa en comparación con las muestras que contienen aditivos. Los autores observan que después del segundo ciclo se registra una desintegración completa durante la prueba.

ii) **Suelo-Lignina:** con la adición de lignina del 2% (lignosulfonato), Alazigha et al. (2018) registra un incremento en la resistencia del suelo. Al término del primer ciclo, la pérdida de masa fue solo del 7.7%. Sin embargo, esta pérdida aumentó al 32.4% al finalizar el segundo ciclo.

iii) **Suelo-Cemento (comparación):** el suelo tratado con 2% de cemento experimentó la menor pérdida de masa en condiciones de mojado y secado, con solo un 2.5% y un 9.2% de pérdida de masa al final del primer y segundo ciclo, respectivamente. Esto sugiere que el cemento proporciona un enlace químico adicional entre los minerales de arcilla.

4.2.4- Procedimientos de Construcción y Medidas de Protección

Se reporta que el uso de suelo estabilizado con lignina como capa de sub-base puede ser utilizada para mejorar las propiedades mecánicas del suelo. No obstante, los autores recopilados en la revisión registran desafíos técnicos que deben abordarse antes de utilizar este tipo de estabilización en la construcción. Para las pruebas de laboratorio, generalmente se mezcla suelo seco tamizado con polvo de lignina o solución de lignina para crear una mezcla homogénea, y luego la mezcla se compacta al tamaño diseñado para formar el espécimen de prueba.

4.2.4.1- Consideraciones

i) **Almacenamiento del polvo de lignina:** es necesario contar con un lugar y un método adecuados para almacenar el polvo de lignina y así garantizar su calidad.

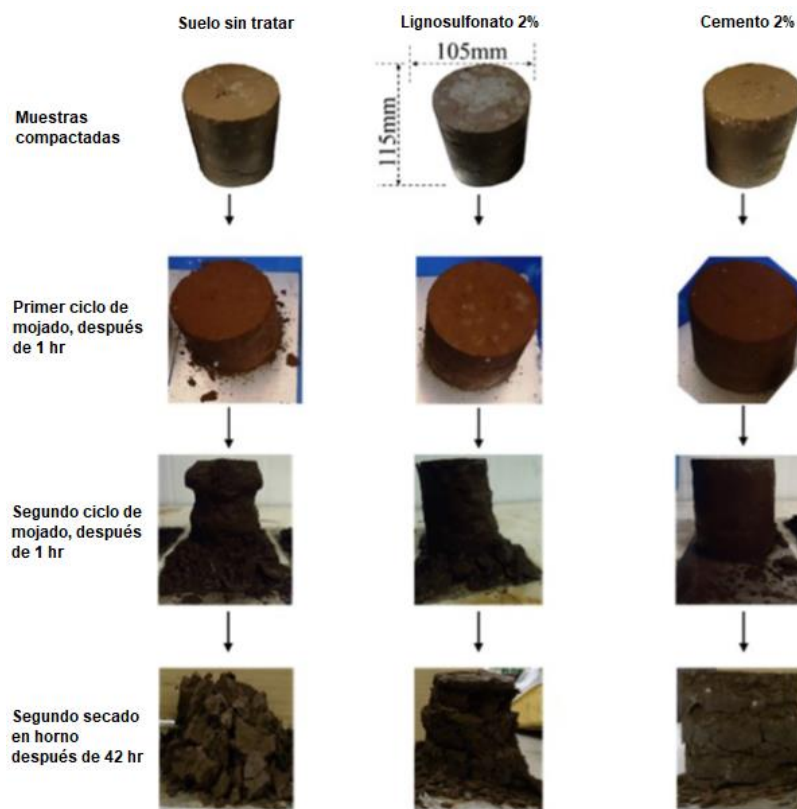
ii) **Mezcla homogénea:** se requiere maquinaria de agitación óptima para obtener una mezcla homogénea de suelo-agua-lignina en grandes volúmenes. Los bloques de suelo con lignina pueden dificultar la compactación y adherirse a las palas mezcladoras, lo que reduce la eficiencia de mezcla.

iii) **Condiciones de curado:** se deben proporcionar condiciones específicas de curado para garantizar la mejora de la resistencia del suelo estabilizado con lignina.

iv) **Contaminación secundaria:** existe preocupación por la contaminación secundaria cuando se utilizan suelos estabilizados con lignina como materiales de construcción, ya que la intrusión de agua puede inducir la disolución de solutos. Por lo tanto, es importante desarrollar medidas de protección efectivas para prevenir la contaminación del entorno circundante.

Ilustración 48

Comparación de la durabilidad

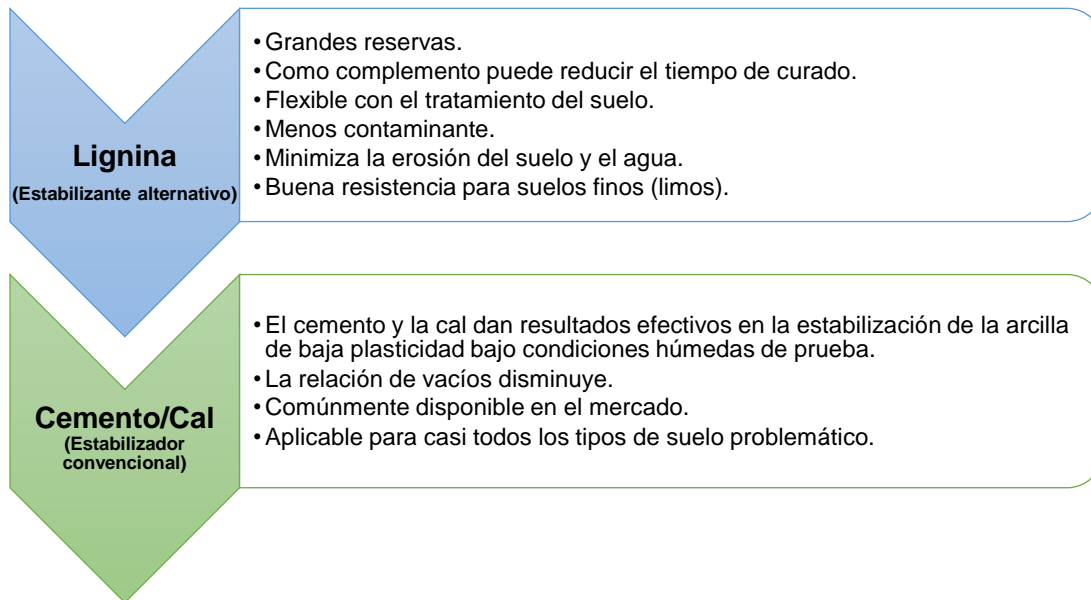


Fuente: Alazigha et al. (2018).

4.2.4- Rendimiento

Ilustración 49

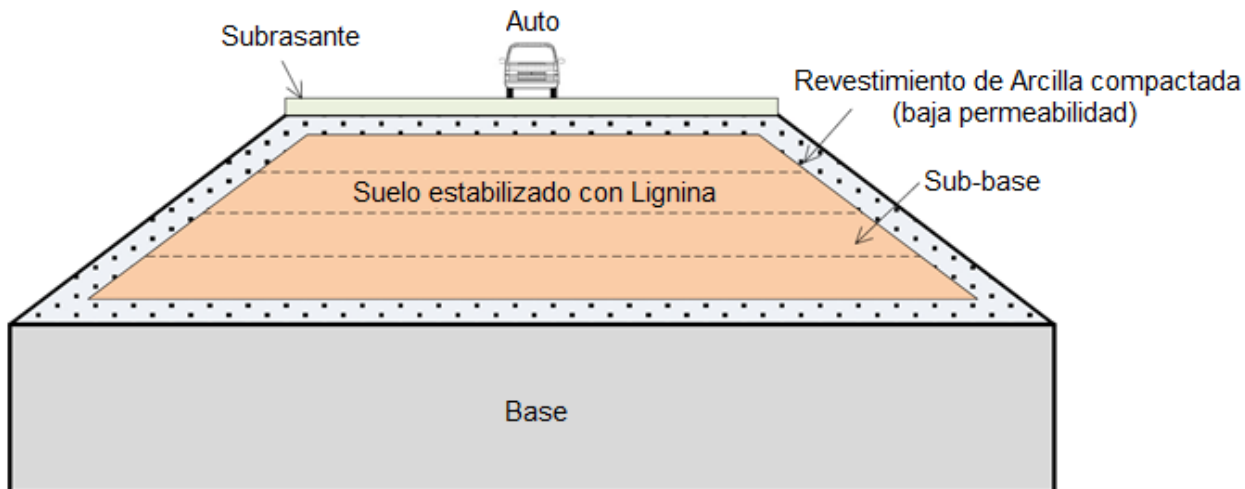
Ventajas de estabilizadores alternativos y tradicionales



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 50

Estructura de terraplén para suelo estabilizado con lignina



Fuente: Zhang et al. (2020).

5- Conclusiones y Recomendaciones

5.1- Conclusiones

- Tipos de suelo

Los limos representan el tipo de suelo más utilizado en los estudios analizados, con una participación del 46%. Las arcillas ocupan el segundo lugar, con una participación del 41%. La combinación de limos y arcillas, en diferentes dosificaciones, se presenta en un 13% de los estudios. En tal medida, se evidencia una marcada preferencia por el uso de limos y arcillas en la estabilización de suelos expansivos. La combinación de ambos tipos de suelo también muestra potencial para este tipo de aplicación.

- Aditivos convencionales

La cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaO) se posiciona como el aditivo convencional más empleado, representando el 8% del total de aditivos utilizados (convencionales y no convencionales). Esto equivale al 36,4% de los aditivos químicos convencionales utilizados como estabilizantes en suelos expansivos. Por lo tanto, se consolida como el aditivo convencional de mayor relevancia en la estabilización de suelos expansivos.

- Aditivos a base de lignina

Entre los aditivos no convencionales, el lignosulfonato (LS) destaca con una participación del 31,7%. La lignina le sigue en cuanto a uso, con una presencia del 29,3%. Las dosificaciones óptimas para LS y lignina se sitúan en 2% y 12%, respectivamente. Los aditivos a base de lignina, particularmente el lignosulfonato y la lignina, se perfilan como alternativas prometedoras para la estabilización de suelos expansivos, ofreciendo resultados favorables en estudios previos.

- Tiempos de curado

Los tiempos de curado más utilizados en los estudios analizados corresponden a 7 días (32%) y 28 días (29%), por lo cual se consideran los más comunes y efectivos en la estabilización de suelos expansivos.

5.2- Recomendaciones

Respecto a la estabilización de suelos expansivos, se recomienda priorizar el uso de limos y arcillas, al igual que enfocar los esfuerzos de investigación y aplicación en el uso de éstos, ya sea individualmente o en combinación, debido a su alta presencia y resultados favorables en estudios previos. También se plantea la importancia de explorar combinaciones óptimas de limos y arcillas. Se sugiere profundizar en estudios que exploren sus proporciones ideales para maximizar la efectividad de la estabilización en suelos expansivos.

En cuanto a aditivos convencionales, es conveniente continuar investigando métodos para optimizar el uso de la cal como estabilizante de suelos expansivos, buscando reducir su impacto ambiental y mejorar su eficiencia. También es fundamental evaluar alternativas sostenibles a la cal, como aditivos provenientes de residuos o materiales reciclados para la estabilización de suelos expansivos.

Debido a la pertinencia de validar el uso de lignosulfonato y lignina se recomienda realizar estudios a mayor escala donde se empleen como estabilizadores de suelos expansivos en proyectos reales. A su vez, se sugiere profundizar en la investigación para determinar sus dosificaciones óptimas en función de las características específicas del suelo expansivo a tratar.

Finalmente, se recomienda considerar la evaluación de tiempos de curado superiores a 28 días para determinar su impacto en la resistencia y durabilidad a largo plazo de la estabilización del suelo expansivo. También es preciso realizar estudios que analicen la cinética del proceso de estabilización con diferentes tipos de suelo, aditivos y tiempos de curado para optimizar el diseño de mezclas y procedimientos de estabilización.

6- Referencias

Abdelaziz, O., Brink, D. y Prothmann, J. (2016). Biological valorization of low molecular weight lignin. *Biotechnology Advances*, 34, 1318-1346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.001>

Abedin, R. (2021). Evaluación del impacto de la lignina como modificador o reemplazo del asfalto (Tesis de maestría). <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/4216e0fb-cf04-44c1-9e7e-83656ab67bd7/download>

Adam, F., Appaturi, J. y Iqbal, A. (2012). The utilization of rice husk silica as a catalyst: Review and recent progress. *Catalysis Today*, 190(1), 2-14. doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.056

Alazigha, D., Indraratna, B., Vino, J. y Heitor, A. (2018). Mechanisms Of Stabilization Of Expansive Soil With Lignosulfonate Admixture. *Transportation Geotechnics*, 14, 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.001>

Alazigha, D., Indraratna, B., Vinod, J. y Ezeajugh, L. (2016). The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 169(3), 182-193. <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00002>

Alazigha, D., Vinod, J., Indraratna, B. y Heitor, A. (2018). Potential use of lignosulfonate for expansive soil stabilisation. *Environmental Geotechnics*, 6(7), 480-488. <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00051>

Arafat, S., Kumar, N., Wasiuddin, N., Owhe, E. y Lynam, J. (2019). Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties. *Journal of Cleaner Production*, 217, 456-468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.238>

Asocaña (2023). *Sector agroindustrial de la caña*. Cali. https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215&as_qdr=y15

ATRIA Innovation (2023). *Microscopía electrónica de barrido (SEM), ¿para qué me sirve?* <https://atriainnovation.com/blog/microscopia-electronica-de-barrido-sem-utilidades/>

Balakshin, M., Capanema, E., Sulaeva, I. y Schlee, P. (2021). New opportunities in the valorization of technical lignins. *ChemSusChem*, 14(4), 1016-1036. <https://doi.org/10.1002/cssc.202002553>

Bazargan, A., Gebreegziabher, T. y Hui, C. (2014). The effect of alkali treatment on rice husk moisture content and drying kinetics. *Biomass and bioenergy*, 70, 468-475. doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.018

Becerra, A., Buitrago, A. y Pinto, P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 12(20), 133-

149.

https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Sostenibilidad+del+aprovechamiento+del+bagazo+de+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar+en+el+Valle+del+Cauca%2C+Colombia&btnG=

Becker, J. y Wittmann, C. (2019). A field of dreams: Lignin valorization into chemicals, materials, fuels, and health-care products. *Biotechnology Advances*, 37, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.02.016>

Bio3 (2023). *Bioeconomía circular en el entorno urbano*. <https://madrid.bio3project.es/>

Blanck, G., Cuisinier, O. y Masrouri, F. (2014). Soil treatment with organic non-traditional additives for the improvement of earthworks. *Acta Geotechnica*, 9, 1111-1122. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0251-6>

Cai, G., Zhang, T., Liu, S., Li, J. y Jie, D. (2016). Stabilization mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data. *Marine Georesources y Geotechnology*, 34(4), 331-340. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.966217>

Cardona, C., Quintero, J. y Paz, I. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. *Bioresource technology*, 101(13), 4754-4766. doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.097

Carvajal, J. (2015). *Evaluación técnica, económica y ambiental de una biorefinería a partir de materias primas con alto contenido en lignina en el contexto colombiano* (Tesis doctoral). <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55716/1093219754.2015.pdf?sequence=1>

Carvajal, J., Gómez, Á. y Cardona, C. (2016). Comparison of lignin extraction processes: Economic and environmental assessment. *Bioresource Technology*, 214, 468-476. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.103>

Castro, A., Cheng, S. y Cross, J. (2020). Solvolysis of Kraft Lignin to Bio-Oil: A Critical Review. *Clean Technologies*, 2, 513-528. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2040032>

Centro de Desarrollo Tecnológico para la Innovación de la Infraestructura Vial (CDT Vial Unicauca) (2018). <https://vri.unicauca.edu.co/cdtvial/>

Ceylan, H., Gopalakrishnan, K. y Kim, S. (2010). Soil Stabilization with Bioenergy Coproduct. *Transportation Research Record*, 2186(1), 130-137. <https://doi.org/10.3141/2186-14>

Ceylan, H., Kim, S., Uzer, A. y Yang, B. (2015). Strength performance of Iowa soils stabilized with biofuel industry co-product. *Procedia Engineering*, 125, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.069>

Chauhan, P., Agrawal, R., Satlewal, A., Kumar, R., y Gupta, R. (2022). Next generation applications of lignin derived commodity products, their life cycle, techno-economics and societal

analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 197, 179-200. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.146>

Chavali, V. y Reshmarani, B. (2020). Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate. *International Journal of Geo-Engineering*, 11(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00124-1>

Chávez, M., y Domine, M. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46. https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Lignina%2C+estructura+y+aplicaciones%3A+m%3%A9todos+de+despolimerizaci%3%B3n+para+la+obtenci%3%B3n+de+derivados+arom%3%A1ticos+de+inter%3%A9s+industrial&btnG=

Chen, H. (2014). Chemical composition and structure of natural lignocellulose. *Biotechnology of lignocellulose*, 25-71. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6898-7_2

Chen, Q., Indraratna, B., Carter, J. y Rujikiatkamjorn, C. (2014). A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt. *Computers and Geotechnics*, 61, 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.06.010>

Chiappero, L., Dagnino, E., Estenoz, D., Chamorro, M. y Nicolau, V. (2018). Valorización de lignina Organosolv proveniente de cascarilla de arroz como potencial sustituto de fenol en resinas de fenol-formaldehído. Universidad Tecnológica Nacional. <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/3295/Publicacion8.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Departamento Nacional de Planeación (2021). *Mejoramiento de vías terciarias Vías de tercer orden*. Bogotá. https://proyectostipo.dnp.gov.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=125:mejoramiento-de-vias-terciarias-vias-de-tercer-orden&Itemid=207#:~:text=El%20mejoramiento%20de%20v%C3%ADas%20terciarias,de%20la%20red%20vial%20terciaria.

Departamento Nacional de Planeación (2023). *Inversión de recursos públicos en infraestructura de vías terciarias*. Bogotá. <https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/inversion-de-recursos-publicos-en-infraestructura-de-vias-terciarias.aspx>

Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M. y Pulkki, R. (2020). Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>

Doherty, W., Mousavioun, P. y Fellows, C. (2011). Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. *Industrial Crops and Products*, 33, 259-276. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.022>

El País (2022). *Las carreteras de Colombia, entre las más lentas del mundo por la corrupción y las construcciones de mala calidad*. España. https://elpais.com/america-colombia/2022-07-12/las-carreteras-de-colombia-entre-las-mas-lentas-del-mundo-por-la-corrupcion-y-las-construcciones-de-mala-calidad.html?event_log=oklogin

Fernández, M., Orlandi, S., Codevilla, M., Piqué, T. y Manzanal, D. (2021). Performance of calcium lignosulfonate as a stabiliser of highly expansive clay. *Transportation Geotechnics*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100469>

Findeter (2023). *Inversión en vías secundarias y terciarias en Colombia*. <https://www.findeter.gov.co/blog/estructurar-y-financiar-el-desarrollo/inversion-en-vias-secundarias-y-terciarias-en-colombia>

Food and Agriculture Organization (FAO) (2024). Consistencia del suelo. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm#top

Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z., y Yu, M. (2020). High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063>

Gellerstedt, G., y Henriksson, G. (2008). Chapter 9 - Lignins: Major Sources, Structure and Properties. *Journals & Books*, 201-224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00009-0>

Geología Publicaciones (2019). *Clasificación de suelos*. <https://post.geoxnet.com/clasificacion-de-suelos/>

González, J. y Chávez, O. (2021). Evaluación de la expansión en suelos presaturados. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(4), 1-14. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.4.027>

Hamaguchi, M., Cardoso, M., y Vakkilainen, E. (2012). Alternative Technologies for Biofuels Production in Kraft Pulp Mills—Potential and Prospects. *Energies*, 5(7), 2288-2309. <https://doi.org/10.3390/en5072288>

Hataf, N., Ghadir, P., y Ranjbar, N. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer, 170, 1493-1500. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256>

Holladay, J., Bozell, J., White, J. y Johnson, D. (2007). Top value-added chemicals from biomass. Volume II-Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin. *Pacific Northwest National Lab*. <https://www.osti.gov/biblio/921839>

Ijaz, N., Dai, F., Meng, L., Rehman, Z. y Zhang, H. (2020). Integrating lignosulphonate and hydrated lime for the amelioration of expansive soil: A sustainable waste solution. *Journal of Cleaner Production*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119985>

Infobae (2024). La plantación de árboles podría no ser suficiente para enfrentar el cambio climático. <https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2024/01/17/la-plantacion-de-arboles-podria-no-ser-suficiente-para-enfrentar-el-cambio-climatico/>

Ingenio Carmelita (2024). *Bagazo*. <https://ingeniocarmelita.com/bagazo/>

Jaramillo, P., Gomes, H., Monclaro, A., Silva, C. y Filho, E. (2015). Lignocellulose-degrading enzymes: An overview of the global market. *Fungal biomolecules: sources, applications and recent developments*, 73-85. <https://doi.org/10.1002/9781118958308.ch6>

Jędrzejczak, P., Collins, M., Jesionowski, T. y Klapiszewski, Ł. (2021). The role of lignin and lignin-based materials in sustainable construction. A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 624-650. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.125>

Jones, D., y Surdahl, R. (2014). A New Procedure for Selecting Chemical Treatments or Unpaved Roads. *Transportation Research Record*, 2433(1), 87-99. <https://doi.org/10.3141/2433-10>

Kachoian, R. (2021). Evaluación del impacto de la lignina como modificador o reemplazo del asfalto (Tesis de maestría, Universidad de los Andes). <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/55009>

Kong, X., Song, S., Wang, M., y Zhao, Q. (2019). Experimental research of low liquid limit silt stabilized by lignin in the flooding area of Yellow river. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 5211-5217. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00975-1>

La República (2019). El Inviás acelera la inversión para las carreteras terciarias en Colombia. <https://www.larepublica.co/economia/el-invias-acelera-la-inversion-para-las-carreteras-terciarias-en-colombia-2868027>

La República (2020). En agosto comenzarán obras de mantenimiento y rehabilitación en 183 vías terciarias. <https://www.larepublica.co/economia/en-agosto-comenzaran-obras-de-mantenimiento-y-rehabilitacion-en-183-vias-terciarias-3021603>

La República (2022a). Colombia descendió un puesto en el nuevo ranking anual de competitividad del IMD. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/colombia-cayo-un-lugar-en-el-ranking-de-competitividad-que-hace-el-imd-anualmente-3385224>

La República (2022b). Empresas que se le miden a usar el bagazo de caña en sus productos. <https://www.larepublica.co/especiales/practicas-sostenibles/conozca-algunas-empresas-que-se-le-miden-a-usar-el-bagazo-de-cana-en-sus-productos-3376854>

Lawoko, M. y Samec, J. (2022). Kraft lignin valorization: Biofuels and thermoset materials in focus. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100738>

LignoCity (2023). We use lignin to help create sustainable products. <https://lignocity.se/en/#:~:text=We%20use%20lignin%20to%20help%20create%20sustainable%20products&text=And%20that%20is%20exactly%20what%20large%20network%20and%20unique%20resources>.

Lim, H., Yusup, S., Minh, A. y Samsuri, S. (2021). Review on Conversion of Lignin Waste into Value-Added Resources in Tropical Countries. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 5285-5302. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01307-8>

Liu, Y., Chang, M., Wang, Q., Wang, Y., Liu, J., Cao, C., Zheng, W., Bao, Y. y Rocchi, I. (2020). Use of sulfur-free lignin as a novel soil additive: A multi-scale experimental investigation. *Engineering Geology*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105551>

Liu, Y., Zheng, W., Wang, Q., Cao, C., Chang, M. y Rocchi, I. (2020). Evaluating sulfur-free lignin as a sustainable additive for soil improvement against frost resistance. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119504>

Loh, Y., Sujana, D. y Rahman, M. (2013). Sugarcane bagasse. The future composite material: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 75, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>

Luo, H. y Abu-Omar, M. (2017). Chemicals From Lignin. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 3, 573-585. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10235-0>

Maceda, A., y Soto, M. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>

Ministerio de Transporte (2022). *Transporte en Cifras*. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/9443/transporte-en-cifras/>

Monsalve, M. (2017). El lado verde de la industria papelera. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/ambiente/el-lado-verde-de-la-industria-papelera-article-682470/>

Montejo, A. y Montejó, A. (2018). *Estabilización de suelos. Ediciones de la U.*

Niyomukiza, J. (2021). Recent advances in the stabilization of expansive soils using waste materials: A review. *Earth and Environmental Science*, 623. doi:10.1088/1755-1315/623/1/012099

Noorzad, R., y Ta'negonbadi, B. (2020). Volume change behavior of stabilized expansive clay with lignosulfonate. *Scientia Iranica*, 27(4), 1762-1775. 10.24200/SCI.2018.50210.1575

Norgbey, E., Huang, J., Hirsch, V., Jie, W. y Wang, M. (2020). Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads. *Construction and Building Materials*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116957>

Pardo, T. (2023). Comportamiento mecánico de suelos arcillosos tratados con lignosulfonato, para fines de cimentación (Tesis). Universidad Señor de Sipán. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/11071>

Peñaranda, L., Montenegro, S. y Giraldo, P. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 141-150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>

Pereira, P., Hilario, M., Voorwald, H. y Mulinari, D. (2011). Sugarcane bagasse pulping and bleaching: thermal and chemical characterization. *BioResources*, 6(3), 2471-2482. t: <https://www.researchgate.net/publication/279554181>

Pezo, H. y D'alembert, E. (2022). Incorporación de lignosulfonato de calcio y cemento para mejorar las propiedades de la subrasante en la carretera Paruro–Cusco (Tesis). Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/100050>

Polanco, M. (2009). *Principios básicos de mecánica de suelos*. Universidad del Cauca.

Portafolio (2022). Solo 10% de la red vial rural está en buen estado, según Invías. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/estado-de-las-vias-solo-10-de-la-red-vial-rural-esta-en-buen-estado-segun-invias-571993>

Poveda, J., Solarte, J. y Cardona, C. (2021). The potential use of lignin as a platform product in biorefineries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110688>

Retuerto, G. y Gonzales, A. (2022). Incremento de la capacidad de soporte de los suelos inestables de la Av. Naranjal en San Martín de Porres-Lima, mediante estabilización con biopolímero Lignina (Tesis). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/660232>

Ricaldoni, J. (2017). Curso de Geología de Ingeniería e Introducción a la Mecánica de Suelos. https://www.academia.edu/download/33531285/tablas_abacos_08.pdf

Rice Knowledge Bank (2016). *Rice husk*. <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/rice-by-products/rice-husk>

Rivera, J., Aguirre, A., Mejía, R. y Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos. Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador técnico*, 84(2), 202-226. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Sánchez, C. (2008). Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27, 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.001>

Semana (2022). Inversión de Mintansporte en vías terciarias para los campesinos. <https://www.semana.com/hablan-las-marcas/articulo/el-balance-de-las-vias-terciarias-durante-la-administracion-duque/202226/>

Sena, G., Almeida, E. y Duarte, J. (2008). Eco-friendly new products from enzymatically modified industrial lignins. *Industrial Crops and Products*, 27(2), 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.016>

Singh, R., Singh, S., Trimukhe, K., Pandare, K., Gokhale, D. y Varma, A. (2005). Lignin-carbohydrate complexes from sugarcane bagasse: Preparation, purification, and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 62(1), 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.011>

Sixta, H. (2006). *Handbook of Pulp*. Wiley VCH. <https://www.lcrl.ppc.ubc.ca/files/2013/01/2006-Pulp-Handbook.pdf>

Stora Enso (2023). *Lignin – nature’s own binder that can replace fossil-based materials*. <https://www.storaenso.com/en/products/lignin>

Sun, Y., Zhong, X., Lv, J., Wang, G. y Hu, R. (2023). Experimental Study on Different Improvement Schemes of EICP-Lignin Solidified Silt. *Materials*, 16(33), 999. <https://doi.org/10.3390/ma16030999>

TAE (2022). El licor negro es fuente de energía para la industria del papel y la celulosa. <https://www.revistatae.com.br/Noticia/66850/licor-negro-e-fonte-de-energia-para-a-industria-de-papel-e-celulose>

Ta'negonbadi, B., y Noorzad, R. (2017). Stabilization of Clayey Soil using Lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, 12, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.004>

Ta'negonbadi, B., y Noorzad, R. (2018). Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: An experimental investigation. *Transportation Geotechnics*, 17, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.001>

Tingle, J. y Santoni, R. (2003). Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives. *Transportation Research Record*, 1819(1), 72-84. <https://doi.org/10.3141/1819b-10>

Tingle, J., Newman, K., Larson, S., Weiss, C. y Rushing, J. (2007). Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. *Transportation Research Record*, 2, 59-67. <https://doi.org/10.3141/1989-49>

Tribot, A., Amer, G. y Abdou, M. (2019). Wood-lignin: Supply, extraction processes and use as bio-based material. *European Polymer Journal*, 112, 228-240. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.01.007>

Trupal (2021). Bagazo de caña de azúcar, materia prima para la producción de empaques. <https://www.trupal.com.pe/blog/bagazo-de-cana-de-azucar-materia-prima-para-la-produccion-de-empaquas-2/>

Ulate, A. (2017). Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales. *Boletín Técnico*, 8, 1-13. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/908>

Valdemar de la Garza (2024). *Cascarilla de arroz*. <https://www.delagarzamateriasprimas.com/producto/cascarilla-de-arroz/>

Valmet Forward (2023a). LignoBoost. The process. <https://www.valmet.com/pulp/other-value-adding-processes/lignin-extraction/lignoboost-process/>

Valmet Forward (2023b). Turning pulp mill side streams to value-adding products. <https://www.valmet.com/pulp/other-value-adding-processes/>

Villamizar, A. (2023). ¿Pueden las juntas comunales construir vías y ofrecer internet? El Colombiano. <https://www.elcolombiano.com/negocios/comunidades-conectadas-invir-comunidades-energeticas-contratos-a-juntas-de-accion-comunas-petro-contratos-a-dedo-directos-jac-infraestructura-DJ23194373>

Watkins, D., Nuruddin, M. y Hosur, M. (2015). Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(1), 26-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.009>

Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W. y Han, W. (2021). Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124663>

Yang, B., Zhang, Y., Ceylan, H., Kim, S. y Gopalakrishnan, K. (2018). Assessment of soils stabilized with lignin-based byproducts. *Transportation Geotechnics*, 17, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.10.005>

Yang, Y., Zhang, T. y Liu, S. (2021). Utilization of biomass-based by-product lignin to suppress moisture loss-induced shrinkage of silty soil. *Journal of Cleaner Production*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129281>

Zahri, A. y Zainorabidin, A. (2019). An overview of traditional and non traditional stabilizer for soft soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). doi:10.1088/1757-899X/527/1/012015

Zakzeski, J., Bruijninx, P., Jongerius, A. y Weckhuysen, B. (2010). The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals. *Chemical Reviews*, 110(6), 3552-3599. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cr900354u>

Zeballos, L., Lorenci, A., Oliveira, V., Grace, S., Guimarães, L., Lorenci, L., Faulds, C. y Socol, C. (2020). Lignin as a potential source of high-added value compounds: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121499>

Zhang, T., Cai, G. y Liu, S. (2017). Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4243-4257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.002>

Zhang, T., Cai, G. y Liu, S. (2018a). Reclaimed Lignin-Stabilized Silty Soil: Undrained Shear Strength, Atterberg Limits, and Microstructure Characteristics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002492](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002492)

Zhang, T., Cai, G., y Liu, S. (2018b). Application of Lignin-Stabilized Silty Soil in Highway Subgrade: A Macroscale Laboratory Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002203)

Zhang, T., Cai, G., y Liu, S. (2018c). Assessment of mechanical properties in recycled lignin-stabilized silty soil as base fill material. *Journal of Cleaner Production*, 17, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.011>

Zhang, T., Liu, S., Cai, G. y Puppala, A. (2015). Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt. *Engineering Geology*, 196, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.07.003>

Zhang, T., Liu, S., Zhan, H., Ma, C. y Cai, G. (2020a). Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119293>

Zhang, T., Songyu, L., Hongbin, Z., Chong, M. y Guojun, C. (2019). Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials. *Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119293>

Zhang, T., Yang, Y. y Liu, S. (2020b). Application of biomass by-product lignin stabilized soils as sustainable geomaterials: A review. *Science of the Total Environment*, 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138830>

Zhang, Y., Zhang, W., Shi, X., Guo, T. y Chen, Z. (2021). Experimental study on unconfined compressive strength of expansive soil improved by lignin and cement. *E3S Web of Conferences*, 236. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123602010>

7- Anexos

7.1- Disponibilidad de Equipos

Los equipos mencionados a continuación son los necesarios para llevar a cabo el proceso de extracción, purificación y caracterización de la lignina. La inclusión de otros equipos puede depender de la metodología específica y del proceso de extracción detallado en este documento. La búsqueda e identificación de equipos se realizó precisamente para evaluar su disponibilidad en los distintos laboratorios de la Universidad del Cauca.

Tabla 20

Equipos de laboratorio, experimentación con Lignina.

Ítem	Proceso	Equipo	Disponibilidad	Laboratorio
1	Recepción materia prima (bagazo de caña de azúcar).	Contenedor de residuos	SI	Geotecnia (Fac. Civil)
2	Molienda del bagazo: para aumentar la eficiencia de la digestión ácida.	Molino	-	-
3	Digestión ácida o alcalina: tratamiento del bagazo con ácido y sulfuro (opcional) para descomponer la biomasa y liberar la lignina. Se obtiene licor negro: solución con lignina disuelta (Con o sin azufre).	Reactor de digestión	SI	Química (Fac. Educación)
4	Centrifugación: separación de la lignina del licor negro en una lignina purificada.	Centrífuga	SI	Química (Fac. Educación)
5	Purificación y separación de la lignina de otros componentes del licor.	Columnas de cromatografía	SI	Química (Fac. Educación)
6	Análisis de la composición y pureza de la lignina.	Espectrofotómetro	SI	Química (Fac. Educación) Ambiental (Fac. Civil)
7	Microscopía: morfología de la lignina y su interacción con otros materiales	Microscopio	SI	Química (Fac. Educación) Ambiental (Fac. Civil)

8	Secado: de la lignina purificada para obtenerla en forma de polvo.	Horno de secado	SI	Geotecnia (Fac. Civil) Química (Fac. Educación) Ambiental (Fac. Civil)
---	--	-----------------	----	---

Fuente: elaboración propia.

7.2- Estudios Lignina - Asfalto




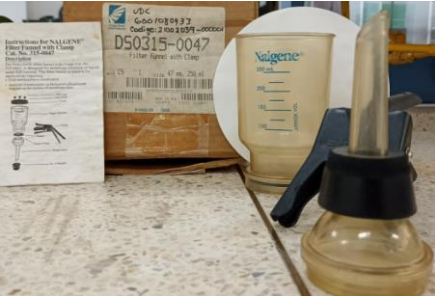


Tabla 21
Estudios Lignina-Asfalto.

Ítem	Tipo	Aditivo Químico	Dosis de Lignina (%)	Contenido Óptimo Lignina (%)	Referencia	Año
1	Asfalto	Lignina (Kraft)	0, 2, 4, 6, 8 y 10	5 a 10	Norgbey Eyram et al.	2020
		Lignina (polvo)	2, 4 y 6	6	Arafam Shams et al.	2019
Lignina (polvo)		2, 4, 6 y 8	8	Zhang Yi & Wang Xuancang	2020	
Lignina (LSA)		2, 4, 6 y 8	8	Gao Junfeng et al.	2020	
Lignina (polvo)		3, 6, 9 y 12	6 a 12	Zahedi Mohsen & Zarei Ali	2020	
Lignina (polvo)		2 y 8	Ratio 4: 1 (Asfalto: Lignina)	Wu Jiantao	2020	
Lignina (polvo)		0, 4, 8 y 12	12	Abedin Reza	2021	
Lignina (polvo)		0 y 12	12	Fu Xin & Mao He	2021	

Fuente: elaboración propia.

7.3- Registro Fotográfico de Equipos

Tabla 22
Equipos disponibles Universidad del Cauca

Balanzas	Hornos
	
Espectrofotómetro	Filtración
	
Columnas de Cromatografía	Espectrómetro de Infrarrojo
	

Cromatografía de Líquidos**Filtración al Vacío****Filtración Büchner****Licor negro de Lignina**

Fuente: elaboración propia.